# Entwurf und Anwendung einer erweiterten Zustandsüberwachung zur Verlässlichkeitssteigerung selbstoptimierender Systeme

# zur Erlangung des akademischen Grades eines DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau

der Universität Paderborn

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Christoph Sondermann-Wölke aus Bielefeld

Tag des Kolloquiums: 5. Dezember 2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

### Schriften des Lehrstuhls für Mechatronik und Dynamik

#### Band 3

#### Christoph Sondermann-Wölke

## Entwurf und Anwendung einer erweiterten Zustandsüberwachung zur Verlässlichkeitssteigerung selbstoptimierender Systeme

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag Aachen 2015

#### 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.: Paderborn, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3791-3 ISSN 2198-7947

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

## Geleitwort des Herausgebers

Neue technische Entwicklungen entstehen heute immer öfter an den Grenzen zwischen den Disziplinen, dort, wo verschiedene Denkweisen sich begegnen und miteinander wechselwirken. Die Entwicklung neuer Systeme setzt immer mehr ein interdisziplinäres Denken und Handeln voraus. In diesem Spannungsfeld lebt die Mechatronik, eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts.

Mechatronische Systeme bestehen aus einer mechanischen Grundstruktur, die durch Integration von Sensoren und Aktoren sowie durch informationsverarbeitende Komponenten ein hohes Maß an Flexibilität und Leistungsfähigkeit gewinnt. Die Mechatronik stellt somit eine interdisziplinäre Kombination der Fächer Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik dar.

Der Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik gehört der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn an. Die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls sind Dynamik, Schwingungen, Reibung, Aktorik, Sensorik, Piezo- und Ultraschalltechnik, Entwurf, Optimierung und Verlässlichkeit mechatronischer Systeme. Sie spiegeln sich in den Bänden dieser Schriftenreihe, in denen Ergebnisse unserer Forschung veröffentlicht werden. Die Schriftenreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen der Universität und der praktischen Anwendung zu verbessern.

Herr Dr.-Ing. Ch. Sondermann-Wölke hat eine Vorgehensweise zur Entwicklung einer Zustandsüberwachung zur Verlässlichkeitssteigerung von selbstoptimierenden Systemen erarbeitet und in der vorliegenden Dissertation dargestellt. In seiner Arbeit geht er insbesondere auf die Entwicklung einer erweiterten Zustandsüberwachung in den frühen Entwurfsphasen ein. Das mehrstufige Verlässlichkeitskonzept als wesentlicher Bestandteil der erweiterten Zustandsüberwachung wird von Herrn Sondermann-Wölke auf ein praktisches Beispiel angewandt. Umfangreiche numerische und experimentelle Untersuchungen sichern die Vorgehensweise und die Anwendung der erweiterten Zustandsüberwachung ab. Herr Sondermann-Wölke hat damit ein schwieriges ingenieurwissenschaftliches Problem durchdrungen und einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung von Zustandsüberwachungen zur Verlässlichkeitssteigerung von fortschrittlichen mechatronischen Systemen geliefert.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus". Bei dieser Arbeit haben mich viele Menschen unterstützt, bei denen ich mich herzlich bedanken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro danke ich für die gute Betreuung meiner Arbeit während der Tätigkeit an seinem Lehrstuhl sowie für die vertiefenden Diskussionen und wertvollen Anregungen zu verschiedenen Fragestellungen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die Unterstützung meiner Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Koch danke ich für die Begleitung während meines Studiums als Betreuer des Studiengangs Ingenieurinformatik und für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskomission. Herrn Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer danke ich für die kollegiale Beratung während meiner Tätigkeit als Leiter des Arbeitskreises "Sicherheit und Stabilität" und dort insbesondere für die Unterstützung bei der Buchpublikation des Arbeitskreises sowie für die Übernahme des Beisitzes innerhalb der Promotionskomission.

Dr.-Ing. Tobias Hemsel danke ich für das Vertrauen, welches er in mich gesetzt hat, als er mich in einer Zeit einstellte, in der er kommissarisch die Leitung des Lehrstuhls übernommen hatte. Darüber hinaus danke ich ihm für die unzähligen Fachgespräche und Hinweise sowie für die gemeinsamen Publikationen, welche meine Arbeit bereichert haben. Den Kollegen Christian Sprock, Tobias Meyer, Sebastian Schulze und James Kuria Kimotho danke ich für die intensive Zusammenarbeit im Bereich der Verlässlichkeit mechatronischer Systeme. Marina Kassühlke gilt ein besonderes Dankeschön. Die "Seele" des Lehrstuhls berät, ermuntert, unterstützt "ihre" Mitarbeiter und sorgt somit für ein gutes Miteinander. Für ihre Kollegialität danke ich auch Simon Althoff, Peter Bornmann, Martin Liekenbröcker, Jan Neuhaus und allen weiteren Mitarbeitern des Lehrstuhls.

Ich danke allen Mitarbeitern im Sonderforschungsbereich für die vertrauensvolle und Grenzen überwindende Zusammenarbeit. Stellvertretend seien hier Peter Iwanek, Maren Vaßholz, Christian Hölscher, Claudia Priesterjahn und Jens Geisler genannt.

Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung eines Studiums. Gemeinsam mit meinen Geschwistern und deren Partnern haben Sie mich während meines privaten und beruflichen Lebenswegs fortwährend unterstützt.

Der größte Dank gilt meiner Frau Alexandra für ihre Liebe, ihre Zeit und ihre Geduld. Nur durch sie und den starken Rückhalt, den sie mir gab, konnte ich diese Arbeit zu einem erfolgreichen Ende führen. Ein letzter Dank gilt meinen beiden Kindern Jonathan und Tabea, die mich immer wieder überraschen und begeistern und die mir zeigen, was im Leben wichtig ist.

Schloß Holte, im Juli 2015

## Kurzfassung

Das Wirkparadigma der Selbstoptimierung ermöglicht mechatronischen Systemen sich autonom und flexibel an veränderte Betriebssituationen anpassen zu können. Um selbstoptimierende Systeme verlässlich zu gestalten und darüber hinaus Selbstoptimierung zur Verlässlichkeitssteigerung des Systems zu nutzen, werden in dieser Arbeit der Entwurf und die Anwendung einer erweiterten Zustandsüberwachung dargestellt. Darin wird eine klassische Zustandsüberwachung mit dem Wirkparadigma der Selbstoptimierung verbunden.

Für den Entwurf der erweiterten Zustandsüberwachung wird aufgezeigt, welche Schritte erforderlich sind, damit das Wirkparadigma der Selbstoptimierung genutzt und gleichzeitig das selbstoptimierende System abgesichert werden kann. Die Basis für den Entwurf der erweiterten Zustandsüberwachung stellt die Spezifikation der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme dar. So können das System und die erweiterte Zustandsüberwachung in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses konsistent entworfen werden.

Hinsichtlich der Anwendung werden drei Aspekte betrachtet. Erstens werden die Entwurfsschritte anhand des Anwendungsbeispiels umgesetzt und bewertet. Zweitens werden die unterschiedlichen Betriebsstrategien auf einem realen Demonstrator implementiert und erprobt, um vor allem das Konzept des Umschaltens auf verlässlichkeitsorientierte Ziele im Fehlerfall zu bewerten. Drittens werden Simulationen durchgeführt, die über die Möglichkeiten des realen Demonstrators hinausgehen. Die exemplarische Anwendung zeigt, dass die erweiterte Zustandsüberwachung eine Steigerung der Verlässlichkeit im Betrieb mittels Selbstoptimierung ermöglicht.

#### **Abstract**

The active paradigm of self-optimization enables mechatronic systems to adapt autonomously and flexibly to changing operating conditions. To make self-optimizing systems dependable and, in addition, to use self-optimization to improve the dependability of the system, the purpose of this dissertation is to demonstrate the design and application of an advanced condition monitoring. Therefore, a classical condition monitoring is combined with the active paradigm of self-optimization.

For the design of an advanced condition monitoring the steps, which are required to use self-optimization and at the same time to ensure the self-optimizing system, are shown. The basis for the design of an advanced condition monitoring is the specification of the principle solution of a self-optimizing system. Thus, the system and the advanced condition monitoring can be designed consistently in the early stages of the development process.

Within the application three aspects are considered. First, the design steps are applied and evaluated with respect to the application example. Second, the different operating strategies are implemented on a real demonstrator and tested to evaluate mainly the concept of switching to dependability oriented objectives in case of failures. Third, simulations are carried out, which go beyond the possibilities of the real demonstrator. The exemplary application demonstrates that the advanced condition monitoring is able to improve the dependability in operation by means of self-optimization.

## Vorveröffentlichungen

- [DHK+09] DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009
- [KSWMS13a] KIMOTHO, J. K.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; MEYER, T.; SEXTRO, W.: Application of Event Based Decision Tree and Ensemble of Data Driven Methods for Maintenance Action Recommendation. In: International Journal of Prognostics and Health Management 4 (2013)
- [KSWMS13b] KIMOTHO, J. K.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; MEYER, T.; SEXTRO, W.: Machinery Prognostic Method Based on Multi-Class Support Vector Machines and Hybrid Differential Evolution Particle Swarm Optimization. In: Chemical Engineering Transactions 33 (2013), S. 619–624
  - [KSWR12] KLÖPPER, B.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; ROMAUS, C.: Probabilistic Planning for Predictive Condition Monitoring and Adaptation Within the Self-Optimizing Energy Management of an Autonomous Railway Vehicle. In: *Journal of Robotics* and Mechatronics 24 (2012), Nr. 1, S. 5–15
  - [KSWRV09] KLÖPPER, B.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; ROMAUS, C.; VÖCKING, H.: Probabilistic Planning Integrated in a Multi-level Dependability Concept for Mechatronic Systems. In: Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, March 30 April 2, 2009, Nashville, Tennessee, USA, 2009, S. 104–111
  - [LTSWS11] LURYE, O.; TRÄCHTLER, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; SEXTRO, W.: Verlässlichkeitsanalyse des Degradationsverhaltens mechatronischer Systeme mit mehreren Betriebsstrategien. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): Tagung Technische Zuverlässigkeit Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte. VDI-Berichte 2146, VDI Verlag, Düsseldorf, 2011, S. 99–110
- [MSWKS13] MEYER, T.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; KIMOTHO, J. K.; SEXTRO, W.: Controlling the Remaining Useful Lifetime using Self-Optimization. In: Chemical Engineering Transactions 33 (2013), S. 625–630
- [MSWS+13] MEYER, T.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; SEXTRO, W.; RIEDL, M.; GOUBER-MAN, A.; SIEGLE, M.: Bewertung der Zuverlässigkeit selbstoptimierender Systeme mit dem LARES-Framework. In: GAUSEMEIER, J. ET AL. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 18./19. April 2013, Paderborn. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [PSWTH11] PRIESTERJAHN, C.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; HÖLSCHER, C.: Component-based Hazard Analysis for Mechatronic Systems. In: Proc. of the MoBE-RTES workshop at the 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-oriented Real-time Distributed Computing, March 2011, Newport Beach, California, USA. 2011
- [SWGHH09] SONDERMANN-WÖLKE, C.; GEISLER, J.; HIRSCH, M.; HEMSEL, T.: Verlässlich-keit im aktiven selbstoptimierenden Spurführungsmodul eines schienengebundenen Fahrzeugs. In: 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 2./3.

- April 2009, Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009, S. 231–243
- [SWGM+08] SONDERMANN-WÖLKE, C.; GEISLER, J.; MÜLLER, T.; TRÄCHTLER, A.; BÖ-
  - CKER, J.: The active guidance module of a rail-bound vehicle as an application for the dependability oriented design in self-optimizing systems. In: ASME2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, August 3-6, 2008, Brooklyn, New York, 2008
  - [SWGS10] SONDERMANN-WÖLKE, C.; GEISLER, J.; SEXTRO, W.: Increasing the reliability of a self-optimizing railway guidance system. In: Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), January 25-28, 2010, San Jose, California, USA, 2010
- [SWHS+10] SONDERMANN-WÖLKE, C.; HEMSEL, T.; SEXTRO, W.; GAUSEMEIER, J.; POOK, S.: Guideline for the dependability-oriented design of self-optimizing systems. In: 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), July 13-16, 2010, Osaka, Japan. 2010, S. 739-744
- [SWMD+12] SONDERMANN-WÖLKE, C.; MEYER, T; DOROCIAK, R.; GAUSEMEIER, J.; SEXTRO, W.: Conceptual Design of Advanced Condition Monitoring for a Self-Optimizing System based on its Principle Solution. In: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (ESREL), June 25-29, 2012, Helsinki, Finland. 2012
  - [SWS09] SONDERMANN-WÖLKE, C.; SEXTRO, W.: Towards the Integration of Condition Monitoring in Self-optimizing Function Modules. In: 2009 Computation World: Future Computing, Service Computation, Cognitive Adaptive, Content, Patterns, November 15-20, 2009, Athens. Greece, 2009, S. 15-20
  - [SWS10] SONDERMANN-WÖLKE, C.; SEXTRO, W.: Integration of Condition Monitoring in Self-Optimizing Function Modules Applied to the Active Railway Guidance Module. In: *International Journal on Advances in Intelligent Systems* 3 (2010), Nr. 1 & 2, S. 65–74
  - [SWSG10] SONDERMANN-WÖLKE, C.; SEXTRO, W.; GEISLER, J.; TRÄCHTLER, A.: Experimentelle Untersuchung der Selbstoptimierung innerhalb des RailCab-Spurführungsmoduls. In: GAUSEMEIER, J. ET AL. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 18. und 19. März 2010, Paderborn. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010, S. 411–420
- [SWSRT11] SONDERMANN-WÖLKE, C.; SEXTRO, W.; REINOLD, P.; TRÄCHTLER, A.: Zuverlässigkeitsorientierte Mehrzieloptimierung zur Aktorrekonfiguration eines X-bywire-Fahrzeugs. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): Tagung Technische Zuverlässigkeit Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte. VDI-Berichte 2146, VDI Verlag, Düsseldorf, 2011, S. 291–303

## Inhaltsverzeichnis

	inlo .1	<b>eitung</b> Verläs	slichkeit als Herausforderung in selbstoptimierenden Systemen
_	.2	Zielset	zung der Arbeit
2 S	Stan	d der	Forschung
2	.1	Verläs	slichkeit mechatronischer Systeme
		2.1.1	Beeinträchtigungen
		2.1.2	Kenngrößen und deren Maße
		2.1.3	Mittel
2	.2	Zustai	ndsüberwachung und -diagnose
2	.3		ose
2	.4	Instan	dhaltungsstrategien
2	.5	Online	e-Adaption der Verlässlichkeit
2	.6	Zusam	nmenfassung
3 E	rw	eiterte	Zustandsüberwachung für selbstoptimierende Systeme
	.1		cklungsprozess selbstoptimierender Systeme
_	.2		tung der Verlässlichkeit
		3.2.1	Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse
		3.2.2	Fehlerbaumanalyse
		3.2.3	Zuverlässigkeitsblockdiagramm
		3.2.4	Markov-Modelle
		3.2.5	Petri-Netze
		3.2.6	Bayessche Netze
		3.2.7	Vergleich und Auswahl
3	.3		weiterte Zustandsüberwachung im Überblick
_	.4		
		3.4.1	Systemanalyse
		3.4.2	Verlässlichkeitsanalyse
		3.4.3	Diagnose und Prognose
		3.4.4	Mehrstufiges Verlässlichkeitskonzept
		3.4.5	Konfigurationssteuerung
3	.5	0 0	bsphase
		3.5.1	Messung und Trendverfolgung
		3.5.2	Vergleich mit dem mehrstufigen Verlässlichkeitskonzept
		3.5.3	Diagnose
		3.5.4	Prognose
		3.5.5	Maßnahmen
		3.5.6	Instandhaltung
		0.0.0	1110/00110110110110115

4	Das	selbst	optimierende Spurführungsmodul - ein Anwendungsbeispiel	59			
	4.1	Entwurfsphase					
		4.1.1	Systemanalyse	60			
		4.1.2	Verlässlichkeitsanalyse	70			
		4.1.3	Testfahrten mit dem Demonstrator	77			
		4.1.4	Diagnose und Prognose	83			
		4.1.5	Mehrstufiges Verlässlichkeitskonzept	86			
		4.1.6	Konfigurationssteuerung	88			
	4.2	Simula	ation der Betriebsphase	90			
		4.2.1	Simulation eines Wirbelstromsensorausfalls	90			
		4.2.2	Monte Carlo Simulation des Ausfallverhaltens	91			
	4.3	Resüm	nee der Anwendbarkeit und Überprüfung des Konzepts	100			
5	Zus	Zusammenfassung und Ausblick 10					
Lit	teratu	ırverze	ichnis	104			
Α	A Mehrzieloptimierung						
В	B Berechnung von Bayesschen Netzen						
С	C Fehlerbaumanalyse Spurführungsmodul						