

**Forschungsbericht
Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Benjamin Hendrik Lindemann

**Datengetriebene Kompensation
anomalier Prozessdynamiken
in Automatisierungssystemen
auf Basis adaptiver LSTM-Netze**

Band 1/2021

Universität Stuttgart

Datengetriebene Kompensation anomaler Prozessdynamiken in Automatisierungssystemen auf Basis adaptiver LSTM-Netze

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Benjamin Hendrik Lindemann
aus Lohne (Oldenburg)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Tag der mündlichen Prüfung: 09.06.2021

Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme
der Universität Stuttgart

2021

IAS-Forschungsberichte

Band 1/2021

Benjamin Hendrik Lindemann

**Datengetriebene Kompensation anomaler
Prozessdynamiken in Automatisierungssystemen
auf Basis adaptiver LSTM-Netze**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8186-2

ISSN 1610-4781

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich, für Betreuung dieser wissenschaftlichen Arbeit, die vielen konstruktiven Diskussionen und wertvollen Hinweise und Anregungen in den letzten Jahren sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA danke ich für die lehrreiche und angenehme Zusammenarbeit im BMWi-Projekt EMuDig 4.0, für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Meinem Projektpartner im BMWi-Projekt, Herrn Dr. sc. techn. Celalettin Karadogan, danke ich für die gute Zusammenarbeit beim Aufbau der Stuttgarter Modellfabrik.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die gegenseitige Unterstützung, die vielen guten und konstruktiven Diskussionen sowie die freundschaftliche Atmosphäre am und auch außerhalb des IAS. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Nasser Jazdi für seine fortwährende Unterstützung während der Arbeit und die vielen wertvollen Gespräche.

Ebenso gilt mein Dank den zahlreichen Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten einen Beitrag zur technischen Umsetzung des Konzepts geleistet haben.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Isabel, meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung, den Rückhalt und die Motivation.

Stuttgart, im Juni 2021

Benjamin Lindemann

Widmung

Diese Arbeit widme ich meinem Großvater Heinrich Schockemöhle.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Zusammenfassung	ix
Abstract	x
1 Einleitung	1
1.1 Datengetriebene Prozessmodellierung	1
1.2 Problemstellung und Abgrenzung	2
1.3 Herausforderungen	3
1.4 Anforderungen an die Konzeption	5
1.5 Zielsetzung der Arbeit	6
1.6 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen	10
2.1 Nichtlineare zeitvariante Prozessmodellierung	11
2.1.1 Anomalien.....	11
2.1.2 Rekurrente neuronale Netze.....	13
2.1.3 Long short-term memory	15
2.1.4 Autoencoder.....	17
2.1.5 Sequence-to-Sequence Netze.....	18
2.2 Kompensation anomaler Systemdynamiken	19
2.2.1 Beobachteransatz	20
2.2.2 Modellbasierter prädikativer Ansatz.....	21
3 Stand der Wissenschaft und Technik	22
3.1 Nichtlineare zeitvariante Prozessmodellierung	23
3.1.1 Detektion von Anomalien.....	24
3.1.2 RNN und LSTM zur Modellierung	27
3.1.3 Weitere Netzarchitekturen	29
3.1.4 Sequence-to-Sequence LSTM	32
3.1.5 Bewertung der Ansätze	34
3.2 Kompensation anomaler Systemdynamiken	35
3.2.1 Diskrete bauteilbezogene Ansätze	36
3.2.2 Ansätze für mehrstufige Prozesse.....	39
3.2.3 Modellbasierte prädikative Ansätze.....	41
3.2.4 Adaptive Ansätze.....	43
3.2.5 Bewertung der Ansätze.....	45
3.3 Aufzeigen des Forschungsbedarfs	47

4	Konzept zur adaptiven Qualitätssicherung	49
4.1	Beschreibung der Konzeptidee	49
4.2	Ansatz zur Prozessmodellierung	53
4.2.1	Modellierung einzelner Fertigungsprozesse	54
4.2.1.1	Numerische Simulation diskreter Fertigungsprozesse	54
4.2.1.2	Ableitung von diskreten E/A-Modellen	56
4.2.2	Modellierung mehrstufiger Prozessketten	57
4.2.2.1	Graphentheoretischer Modellierungsansatz	58
4.2.2.2	Integration der diskreten E/A-Modelle	59
4.3	Ansatz zur Qualitätssicherung	61
4.3.1	Erweiterung des Prozessmodells	61
4.3.2	Detektion anomaler Systemdynamiken	67
4.3.2.1	Beobachterstruktur zur Detektion von Anomalien	67
4.3.2.2	Weiterverarbeitung der erfassten Anomalie-Daten	70
4.3.3	Modellierung anomaler Systemdynamiken	74
4.3.3.1	LSTM-basierte Prädiktionsmodelle	74
4.3.3.2	Kooperativer Prädiktionsansatz	82
4.3.4	Kompensation anomaler Systemdynamiken	84
4.3.4.1	Rekursive Verknüpfung kooperativer Prädiktionen	85
4.3.4.2	Anpassung der Stellgrößen zur Kompensation von Anomalien	88
5	Realisierung	93
5.1	Überblick über das Gesamtsystem	94
5.2	Komponente zur Datenerfassung	95
5.2.1	Subkomponente Bauteilrückverfolgung und Datenverarbeitung	95
5.2.2	Subkomponente Datenverwaltung und -sicherheit	97
5.3	Komponente zur adaptiven Qualitätssicherung	99
5.3.1	Subkomponente Detektion	100
5.3.2	Subkomponente Modellierung	100
5.3.3	Subkomponente Kompensation	101
5.4	Komponente für die Benutzeroberfläche	102
6	Evaluierung	106
6.1	Evaluierungsfall 1: Anomalie-Detektion und Prädiktion	107
6.1.1	Beschreibung der Prozessketten: Modellfabrik und Otto Fuchs	108
6.1.2	Diskussion und Bewertung der empirischen Ergebnisse	108
6.2	Evaluierungsfall 2: Kompensation von Anomalien und Nutzerassistenz	115
6.2.1	Beschreibung der Prozessketten: Modellfabrik und Otto Fuchs	115
6.2.2	Diskussion und Bewertung der empirischen Ergebnisse	117
6.3	Abgleich mit Anforderungen und Zielsetzung der Arbeit	122
7	Schlussbetrachtung	124
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	124
7.2	Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten	126
8	Literaturverzeichnis	127