

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Markus Netzer

**Intelligente Anomalieerkennung
für hochflexible Produktionsmaschinen**
Prozessüberwachung in der
Brownfield Produktion

Band 266

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Markus Netzer

**Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible
Produktionsmaschinen**
Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 266

**Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible
Produktionsmaschinen**
Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

M.Eng. Markus Netzer

Tag der mündlichen Prüfung: 16.02.2023
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9011-6

ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für sein Vertrauen, die Betreuung der wissenschaftlichen Arbeit mit Übernahme des Hauptreferats, sowie für die inspirierende persönliche Förderung in den vergangenen Jahren. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie den wissenschaftlich fachlichen Austausch. Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des wbk möchte ich mich für den engen Zusammenhalt und die andauernde Unterstützung bedanken. Die gemeinsame Zeit am Institut werde ich immer in bester Erinnerung wahren. Allen technischen und organisatorischen Mitarbeitenden des wbk möchte ich für die immerwährende Unterstützung danken. Bei meinen Kollegen und Freunden Philipp Gönnheimer, Tobias Schlagenhauf, Tobias Storz, Florian Oexle und Aaron Schmidt möchte ich mich im Besonderen bedanken.

Allen studentischen Mitarbeitenden möchte ich besonderen Dank aussprechen, da sie wesentlich zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei Julian Martin, Jonas Michelberger, Lukas Winkler, Eva Begemann, Christopher Baier, Philipp Alexander, Philipp Wurche, Lutz Köhler, Robin Kopp, Patrick Horlacher und Yannic Palenga.

Meinen herzlichsten Dank möchte ich abschließend meiner Familie aussprechen. Der andauernde Rückhalt ermöglichte mir das Studium und die Promotion. Allen voran gilt der Dank meiner Freundin Marion, meinen Eltern Anita und Siegfried Netzer und meiner Schwester Stefanie.

Karlsruhe, 16. Februar 2023

Markus Netzer

Abstract

Under the term "Industry 4.0" approaches of data infrastructure in productions have been developed and applied to a large extent in the last decade. Nevertheless, the full potential of data-driven analyses can hardly be exploited, as many production machines are characterized by a high degree of complexity and diversity of processes. Furthermore, the amount and variance of data in brownfield applications is usually too small to apply self-learning methods. The integration of user knowledge to data-driven methods has not been holistically researched. In this dissertation approaches for fault detection in different highly flexible production machines and the integration of domain knowledge of a user are introduced. While existing methods are focused on model training of repetitive processes, the novel approach of this dissertation is to create a concept to detect faults with a very small amount of data. Intervention limits of the logic are self-learning and adapt themselves in case of a process or product change. Process differentiation is based on process segmentation using pattern recognition methods. After segmenting historical data streams and determining representative patterns, the segments are redetected in online signals. After a similar segment has been detected, unsupervised anomaly detection is performed. An anomaly classification by using self-learning methods and the formalized domain knowledge enables the output of recommended actions for the user or machine operator. All developed methods are validated on three selected industrially relevant application examples. The methods are implemented in an app.

Kurzfassung

Unter dem Begriff "Industrie 4.0" wurden im letzten Jahrzehnt Ansätze der Dateninfrastruktur in Produktionen entwickelt und in großem Umfang angewendet. Dennoch kann das volle Potenzial datengetriebener Analysen kaum ausgeschöpft werden, da viele Produktionsanlagen durch eine hohe Komplexität und Prozessvielfalt gekennzeichnet sind. Zudem ist die Datenmenge in der Praxis meist zu gering, um selbstlernende Methoden anzuwenden. Die Integration von Anwenderwissen in datengetriebenen Methoden ist bisher nicht ganzheitlich erforscht. In dieser Dissertation werden Ansätze zur Anomalieerkennung in verschiedenen hochflexiblen Produktionsmaschinen und die Integration von Domänenwissen eines Anwenders vorgestellt. Während sich bestehende Methoden auf das Modelltraining von sich wiederholenden gleichen Prozessen konzentrieren, besteht der neuartige Ansatz dieser Arbeit darin, ein Konzept zur Fehlererkennung mit einer sehr geringen Datenmenge zu entwickeln. Eingriffsgrenzen sind variabel und lassen sich durch selbstlernende Algorithmen im Falle einer Prozess- oder Produktänderung anpassen. Die Prozessdifferenzierung basiert auf einer Prozesssegmentierung mit Methoden der Mustererkennung. Nach der Segmentierung historischer Datenströme und der Bestimmung repräsentativer Muster werden die Segmente in Online-Signalen wiedererkannt. Nachdem ein ähnliches Segment erkannt wurde, wird eine unüberwachte Anomalieerkennung durchgeführt. Eine Anomalie-Klassifikation mit Hilfe selbstlernender Methoden und des formalisierten Domänenwissens ermöglicht die Ausgabe von Handlungsempfehlungen für den Benutzer oder Maschinenbediener. Alle entwickelten Methoden werden an drei ausgewählten industriell relevanten Anwendungsbeispielen validiert. Die Methoden werden in einer App implementiert.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	VI
Begriffserklärung	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Stand von Forschung und Technik	7
2.1 Die Produktionsmaschine – Grundverständnis	7
2.1.1 Fertigungsverfahren	7
2.1.2 Produktionskennzahlen	8
2.1.3 Lebensphasen einer Maschine	8
2.2 Störungsarten und deren Herausforderungen in Produktionsmaschinen	9
2.2.1 Störungen in Produktionsmaschinen	9
2.2.2 Herausforderungen und Auswirkungen von Störungen	10
2.2.3 Instandhaltungsstrategien	12
2.3 Industrie 4.0	13
2.3.1 Datentypen	13
2.3.2 Zeitreihenanalyse	13
2.3.3 Datenaufnahme bei Produktionsmaschinen	14
2.3.4 Herausforderungen in Brownfield Anwendungen	15
2.4 Condition Monitoring im Kontext von Industrie 4.0	16
2.4.1 Arten der Zustandserkennung	17
2.4.2 Schematischer Aufbau eines Condition Monitoring Systems	18
2.4.3 Herausforderungen bei der Anwendung von Condition Monitoring Systemen	19
2.4.4 Zusammenfassung und Bewertung von industriellen Condition Monitoring Systemen	20
2.5 Mustererkennung und Zeitreihen	21
2.5.1 Datenrepräsentation	25

2.5.2	Features	26
2.5.3	Distanzmetriken	27
2.5.4	Clusteralgorithmen	29
2.5.5	Fazit zu Clusterverfahren	32
2.5.6	Zusammenfassung und Bewertung der Mustererkennung	32
2.6	Anomalieerkennung	32
2.6.1	Anomalieerkennung in Zeitreihen	36
2.6.2	Zusammenfassung und Bewertung der Anomalieerkennung	43
2.7	Wissensbasiertes Expertensystem zur Integration von Anwenderwissen	44
2.7.1	Wissenshierarchie	45
2.7.2	Wissensbasierte Methoden zur Merkmalsextraktion	45
2.7.3	Wissensrepräsentation	46
2.7.4	Qualitative Trendanalyse	47
2.7.5	Zusammenfassung und Bewertung der wissensbasierten Ansätze	49
2.8	Bewertung des Standes von Forschung und Technik	49
2.9	Fazit zum Stand von Forschung und Technik	49
2.10	Aktuelle Defizite in Forschung und Technik	50
2.11	Zusammenfassung der Defizite und Lösungsansätze	52
3	Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise	54
3.1	Präzisierung der Zielsetzung	54
3.2	Vorgehensweise zur Zielerfüllung	56
4	Einflussanalyse und Detektierbarkeit von Störungen	58
4.1	Motivation und Abstrahierung als System	58
4.2	Methodische Analyse der Einflussgrößen	59
4.2.1	Ableitung generischer Störungsgruppen	59
4.2.2	Analyse der Einflussgrößen	60
4.3	Auswertung und Interpretation der Erkenntnisse	62
4.4	Grenzen der Verfahren in der praktischen Anwendung	62
4.5	Fazit der Detektierbarkeit von Störungen	63

5	Mustererkennung in Zeitreihen	64
5.1	Datenvorbereitung / Glättung	66
5.1.1	Ableitung der Anforderungen	67
5.1.2	Diskussion über mögliche Konzepte zur Rauschhandhabung	68
5.1.3	Konzeptauswahl	70
5.1.4	Implementierung	70
5.1.5	Aufteilung der geglätteten Zeitreihe in Segmente	72
5.1.6	Fazit der Rauschminderung	73
5.2	Distanzbestimmung mittels einer Metrik	75
5.2.1	Bewertung	79
5.2.2	Fazit der Distanzbestimmung und Normierung	80
5.3	Dichtebasiertes Clusterverfahren	80
5.3.1	Bewertung zur Wahl des Clusteransatzes	81
5.3.2	Wahl und Optimierung des Such-Parameters	82
5.3.3	Fazit der erweiterten Bandwidth Berechnung	83
5.4	Berechnung eines repräsentativen multidimensionalen Musters	84
5.5	Fazit der Offline-Datensegmentierung	87
5.6	Wiederfinden von Mustern in Online-Signalen	88
5.6.1	Referenz- und Informationssignale	88
5.6.2	Aktualisieren des Puffers	91
5.6.3	Parameterwahl	93
5.6.4	Kennzahlberechnung	94
5.7	Fazit der Datensegmentierung und der Online-Mustererkennung	98
6	Anomalieerkennung	99
6.1	Prinzip der Anomalieerkennung	99
6.1.1	Leistungsspektrum	99
6.1.2	Distanzbestimmung	100
6.1.3	Anomaliedetektion anhand eines Toleranzbandes	100
6.1.4	Schwellwertbasiertes Toleranzband	101

6.1.5	Hüllkurvenbasiertes Toleranzband	102
6.1.6	Fazit der unüberwachten Anomalieerkennung	103
7	Post-Processing – Klassifikation von Anomalien	104
7.1	Feedback-Loop des Anwenders	104
7.2	Fazit des Feedback-Loops des Anwenders	105
7.3	Integration eines Labels zur Klassifikation von Anomalien	105
7.3.1	Lösungsansatz	106
7.3.2	Vergleichslogiken	108
7.3.3	Statistische Ansätze	108
7.3.4	Ansätze unter Verwendung von Methoden des maschinellen Lernens	110
7.3.5	Bewertung des Ansatzes mittels Verfahren des Maschinellen Lernens	112
8	Integration von Domänenwissen	113
8.1	Formalisierung von Domänenwissen zur Beschreibung von Wissen	115
8.1.1	Einführung lokaler Trendstrukturen	115
8.1.2	Nomenklatur und Anomaliesyntax	117
8.1.3	Beispielhafter Anwendungsfall Fräsprozess – Lunker/Poren	119
8.2	Automatisierte Klassifikation über formalisiertes Domänenwissen	120
8.2.1	Lokale Extremstellensuche	120
8.2.2	Autoskalierung	121
8.2.3	Ermittlung lokaler Trendstrukturen	121
8.2.4	Anomalieprofil-Abgleich	122
8.2.5	Fazit der Formalisierung von Domänenwissen	124
9	Umsetzung und Validierung der Anomalieerkennung	125
9.1	MVC Ansatz – Die Architektur	125
9.2	Aufbau und Funktionsweise der Anomalieerkennungs-App	127
9.3	Anwendung 1: Prozessüberwachung bei der Zerspanung	130
9.3.1	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	131
9.3.2	Bewertung und Grenzen	138
9.4	Anwendung 2: Bauteilverlustüberwachung einer Transportkinematik	139

9.4.1	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	140
9.4.2	Bewertung und Grenzen	144
9.5	Anwendung 3: Prozessüberwachung bei der Elektromotoren-Produktion	145
9.5.1	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	146
9.5.2	Bewertung und Grenzen	148
9.6	Zusammenfassende Bewertung der Validierung	148
10	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Publikationsliste des Autors	I
	Literaturverzeichnis	III
	Abbildungsverzeichnis	XVIII
	Tabellenverzeichnis	XXIV
	Anhang	XXV

Formelzeichen und Abkürzungen

Alle Formelzeichen und Abkürzungen sind an entsprechenden Stellen im Dokument erläutert. Es wird daher aufgrund der Übersichtlichkeit auf ein dediziertes Formelverzeichnis verzichtet.

Begriffserklärung

Alle im Text erstmalig in *kursiv* beschriebenen Notationen werden nachfolgend in ihrer Bedeutung erläutert oder sind im Text nach ihrer Einführung erklärt.

Es werden grundsätzlich, soweit möglich, genderneutrale Formulierungen gewählt. An manchen Stellen ist aufgrund von grammatikalischen, syntaktischen oder den lesefluss betreffenden Gründen nicht immer die genderneutrale Formulierung gewählt. Der Begriff des Expertensystems oder des sogenannten Anwenders wird in Einklang mit der Literatur im generischen Maskulin verwendet.

Begriff	Erklärung
allowedErrors	Erlaubte Datenpunkte außerhalb der Hüllkurve.
Bandweite/bandwidth	Suchweiten-Parameter des Clusterverfahrens.
DataBufferSize	Größe des Datenpuffers bei der Fensterung im Datenstreaming.
DataDelta	Datenbereich für die neu gepufferten Datenpunkte im Datenstreaming.
DetectionThreshold	Toleranzangabe der Hüllkurve bei der Anomalieerkennung.
DifferenceScore	Normierte Kennzahl der Ähnlichkeit zwischen Offline-Segment und Online-Signalabschnitt im Datenpuffer.
InDataPercentage	Prozentuale Angabe der Überschneidung von Offline-Segment im Online-Datenpuffer.
LSTM	Long-Short-Term Memory (Machine Learning Verfahren).
PredictionDifference	Genauigkeitsangabe zwischen Offline-Segment und Signalabschnitt im Online-Datenpuffer.
SVM	Support-Vector-Machine (Machine Learning Verfahren).
ThresholdMultiplier	Einstellbarer Parameter zur Offset-Verschiebung der Hüllkurve.
transfer learning	Verfahren zur Übertragung von Modellen auf neue Anlagen im Bereich des maschinellen Lernens