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

wbk
Institut für Produktionstechnik

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

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

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

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

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