

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

Philipp Gönzheimer

**Automatisierte Bereitstellung  
von Maschinensteuerungsdaten  
in Brownfield-Produktionssystemen**

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen  
am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 279



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  
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Philipp Gönninger

**Automatisierte Bereitstellung  
von Maschinensteuerungsdaten  
in Brownfield-Produktionssystemen**  
Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen  
am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 279



**Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten  
in Brownfield-Produktionssystemen**  
Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen  
am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

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

angenommene

**Dissertation**

von

Philipp Gönzheimer, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 25.03.2024

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

Assoc. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Wüst

### **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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9488-6

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort der Herausgeber**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. 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 wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. 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

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger



## **Vorwort des Verfassers**

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

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferent, die persönliche Unterstützung, die Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter und später auch als Gruppenleiter für Werkzeugmaschinen und Mechatronik sowie Oberingenieur. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger und Herrn Assoc. Prof. Dr.-Ing. Thorsten Wüst für ihr Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Korreferate sowie bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für den Prüfungsvorsitz.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie Ehemaligen des wbk, insbesondere aus meinem Forschungsbereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung, möchte ich mich für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken. Die kollegiale Atmosphäre, die vielen gemeinsamen Stunden und Erlebnisse am wbk und darüber hinaus sowie die entstandenen Freundschaften werden mich immer auf eine einmalige Zeit zurückblicken lassen. Hervorheben möchte ich auch die zahlreichen Studierenden, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Erfolg meiner Arbeit am wbk und auch dieser Dissertation beigetragen haben.

Abschließend möchte ich mich ganz besonders bei meiner ganzen Familie bedanken, bei meinem Bruder Christoph für den konstruktiven Austausch und seine Ratschläge, aber vor allem bei meinen Eltern Gabriele und Hans Peter für ihre stetige Unterstützung und ihren Rückhalt, die mir mein Studium und die daran anschließende Promotion erst ermöglicht haben.

Karlsruhe, im März 2024

Philipp Gönzheimer





## **Abstract**

Industry 4.0 has been a success story for many companies over the last ten years, not least because of the ever-growing number of profitable applications. However, the implementation of Industry 4.0 often poses a major challenge for companies, particularly in brownfield production with legacy machines, due to heterogeneous equipment and data structures. The communication connection of existing machines as well as the identification and assignment of signals to Industry 4.0 applications is often a manual and time-consuming process for users.

This dissertation develops approaches for the automated provision of machine control data in brownfield production systems. The aim of the developed system is the automated extraction of data from interfaces of existing machines as well as the identification and assignment of targeted signals for Industry 4.0 applications from the extracted data sets. To achieve this, connectors for data exchange with existing control systems and communication protocols in the brownfield are created on the basis of open source components. In the next step, concepts for automated signal identification based on analytical and machine learning approaches are developed. The hybrid solution system derived from both approaches is then integrated into an assistance system together with the established connectors. Part of the assistance system is a guided mode that directs the user through the provisioning process from the selection of the data source to the output of the signal assignment. Finally, the approach is validated on selected demonstrators with regard to its functionality and transferability.



## **Kurzfassung**

Industrie 4.0 war in den letzten zehn Jahren für viele Unternehmen eine Erfolgsgeschichte, nicht zuletzt aufgrund der nach wie vor wachsenden Anzahl an gewinnbringenden Anwendungen. Vor allem in der Brownfield-Produktion mit Bestandsmaschinen stellt die Umsetzung von Industrie 4.0 aufgrund heterogener Anlagen- und Datenstrukturen jedoch häufig eine große Herausforderung für Unternehmen dar. Die kommunikationstechnische Anbindung von Bestandsmaschinen sowie die Identifikation und Zuordnung von Signalen zu Industrie 4.0-Anwendungen ist für Anwender häufig ein manueller und zeitaufwändiger Prozess.

Im Rahmen dieser Dissertation werden Ansätze für die automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen entwickelt. Ziel des entwickelten Systems sind die automatisierte Extraktion von Daten aus Schnittstellen von Bestandsmaschinen sowie die Identifikation und Zuordnung angestrebter Signale für Industrie 4.0-Anwendungen aus den extrahierten Datensätzen. Dafür werden zunächst auf Basis von Open Source-Bausteinen Konnektoren für den Datenaustausch mit im Brownfield existierenden Steuerungssystemen und Kommunikationsprotokollen erarbeitet. Im darauffolgenden Schritt werden Konzepte zur automatisierten Signalidentifikation auf Basis von analytischen sowie Machine Learning-Ansätzen entwickelt. Das von beiden Ansätzen abgeleitete hybride Lösungssystem wird darauf aufbauend zusammen mit den erarbeiteten Konnektoren in ein Assistenzsystem integriert. Teil des Assistenzsystems ist ein geführter Modus, der den Anwender von der Auswahl der Datenquelle bis zur Ausgabe der Signalzuordnung durch den Bereitstellungsprozess leitet. Der Ansatz wird abschließend an ausgewählten Demonstratoren hinsichtlich seiner Funktionalität und Übertragbarkeit validiert.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>Begriffserklärungen und Erläuterungen</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1 Motivation	7
1.2 Zielsetzung	9
1.3 Aufbau der Arbeit	9
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>12</b>
2.1 Effektivitätssteigerungen durch Industrie 4.0	12
2.1.1 Gesamtanlageneffektivität	12
2.1.2 Anwendungen im Bereich Industrie 4.0	12
2.2 Produktionsmaschinen	13
2.2.1 Werkzeugmaschinenarten und -komponenten	13
2.2.2 Antriebssysteme	17
2.2.3 Steuerungs- und Regelungstechnik	19
2.3 Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten	25
2.3.1 Kommunikation in der Automatisierungstechnik	25
2.3.2 Datenschnittstellen im Brownfield	28
2.3.3 Maschinenanbindung und Zugriffsmöglichkeiten	29
2.3.4 Identifikation von Signalen	30
2.4 Analyse von Zeitreihendaten	31
2.4.1 Verarbeitung von Zeitreihendaten	32
2.4.2 Maschinelles Lernen zur Klassifikation von Zeitreihendaten	35
2.4.3 Industrielle Anwendungen	40
2.5 Bewertung des Stands der Forschung und Technik	42
2.5.1 Fazit zum Stand der Forschung und Technik	42
2.5.2 Aktuelle Defizite in Forschung und Technik	43

<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>45</b>
3.1	Konkretisierung der Zielsetzung	45
3.2	Vorgehensweise zur Zielerreichung	47
<b>4</b>	<b>Kommunikationstechnische Maschinenanbindung und Extraktion von Maschinendaten</b>	<b>48</b>
4.1	Eingrenzung des Modellierungsraums	48
4.2	Datenextraktion in Brownfield-Maschinen	49
4.2.1	Betrachtung der Zugriffsmöglichkeiten von Datenquellen	49
4.2.2	Umsetzung der Datenextraktion	50
<b>5</b>	<b>Identifikation von Maschinensteuerungssignalen</b>	<b>58</b>
5.1	Analytische Signalidentifikation	60
5.1.1	Konzept	60
5.1.2	Datensätze	64
5.1.3	Stufe 1 – Filterung trivialer Klassen	67
5.1.4	Stufe 2 – Extraktion der Positionssignale	70
5.1.5	Stufe 3 – Bestimmung weiterer Signale durch regelbasierte Klassifikation	72
5.1.6	Stufe 4 – Identifikation von Spindelsignalen	75
5.1.7	Stufe 5 – Kinematische Zusammenhänge	77
5.1.8	Stufe 6 – Signalgruppierung der Achsen	80
5.1.9	Ergebnisse und Bewertung	82
5.2	ML-basierte Signalidentifikation	85
5.2.1	Konzept	85
5.2.2	Datensätze	87
5.2.3	Verwendete ML-Modelle	88
5.2.4	Vorverarbeitung	90
5.2.5	Signalidentifikation mit neuronalen Netzen	97
5.2.6	Signalidentifikation mit Random Forests	105
5.2.7	Ergebnisse und Bewertung	110
5.3	ML-basierte Signalidentifikation mit Korrelationsregeln	115
5.3.1	Konzept	116

---

5.3.2	Datensätze	118
5.3.3	Stufe 1 – Machine Learning-basierte Klassifikation	119
5.3.4	Stufe 2 – Gruppierung von Zeitreihen	125
5.3.5	Stufe 3 – Achszuweisung	126
5.3.6	Ergebnisse und Bewertung	129
5.4	Hybrider Ansatz zur Signalidentifikation	140
5.4.1	Konzept	141
5.4.2	Datensätze	144
5.4.3	Stufe 1 – Datenvorverarbeitung	145
5.4.4	Stufe 2 – Machine Learning-basierte Extraktion von Positionssignalen	147
5.4.5	Stufe 3 – Analytische Identifikation aller Signale	148
5.4.6	Ergebnisse und Bewertung	155
<b>6</b>	<b>Systemintegration</b>	<b>160</b>
6.1	Aufbau der Benutzeroberfläche des Assistenzsystems	160
6.2	Geführter Ablauf	161
<b>7</b>	<b>Validierung des Lösungskonzepts</b>	<b>168</b>
7.1	Validierung	168
7.1.1	Allgemeiner Aufbau	168
7.1.2	Validierung 1 – Horizontal-Fräsmaschine	169
7.1.3	Validierung 2 – Vertikal-Fräsmaschine	171
7.1.4	Validierung 3 – Honmaschine	173
7.1.5	Validierung 4 – Industrieroboter	175
7.2	Zusammenfassende Bewertung der Validierung	179
7.2.1	Bewertung innerhalb des Typs Fräszentren	179
7.2.2	Bewertung des Gesamtmodells auf Maschinen anderen Typs	180
7.2.3	Zusammenfassende Bewertung und Grenzen des Ansatzes	181
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>
8.1	Zusammenfassung	183
8.2	Ausblick	185



<b>9</b>	<b>Publikationsliste des Autors</b>	<b>187</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>191</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>

## **Formelzeichen und Abkürzungen**

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

## Begriffserklärungen und Erläuterungen

Die Bedeutung der im Haupttext verwendeten und nicht verbreiteten Fachbegriffe wird bei ihrer ersten Nennung erklärt. Über diese hinaus werden im Folgenden die zentralen in dieser Arbeit genutzten Begriffe für eine klare Definition erläutert.

Begriff	Erklärung
Brownfield	Produktionssysteme oder einzelne Maschinen, die bereits, potentiell seit längerer Zeit, in Betrieb sind
Maschinensteuerungsdaten	Daten der Maschine oder von Maschinenkomponenten, die im Steuerungssystem der Maschine verarbeitet werden
Datenextraktion	Verfügbarmachung von Maschinendaten aus potentiell schwer zugänglichen Datenquellen
Signalidentifikation	Identifikation angestrebter Signale aus Datensätzen in unbekannter Semantik
Datenbereitstellung	Anwendungsorientierter Prozess, der Datenextraktion und Signalidentifikation umfasst und damit Maschinendaten extrahiert sowie angestrebten Signalen zuordnet