TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Amina Ziegenbein

Prädiktive Qualität durch Werkzeugmaschinensignale: Effekte der Datenvorbereitung auf Klassifikationsergebnisse maschineller Lernverfahren

Schriftenreihe des PTW „Innovation Fertigungstechnik“

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

PTW TU DARMSTADT

Prädiktive Qualität durch Werkzeugmaschinensignale: Effekte der Datenvorbereitung auf Klassifikationsergebnisse maschineller Lernverfahren

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Amina Ziegenbein, M. Sc./M. Sc.

aus Bangkok

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs, MBA
Tag der Einreichung:	26.04.2022
Tag der mündlichen Prüfung:	28.06.2022

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Amina Ziegenbein

Prädiktive Qualität durch Werkzeugmaschinensignale: Effekte der Datenvorbereitung auf Klassifikationsergebnisse maschineller Lernverfahren

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8760-4
ISSN 1864-2179

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 klassische Qualitätssicherung (QS) in der diskreten Fertigung basiert auf der Ex-post Analyse der Bauteilqualität durch Messungen. Diese Messungen sowie die Prozessschritte vor und nach dem Messprozess (Bauteilentnahme, -transport, Vermessung, Interpretation, usw.) sind ohne direkten Wertschöpfungsbeitrag, kostenintensiv und darüber hinaus auch zeitaufwändig. Besonders bei Teileentnahme aus der laufenden Produktion wird die Fertigung in der Regel nicht gestoppt, was zusätzlich das Risiko der Produktion von Ausschuss erhöht.

Die steigende Verfügbarkeit von Daten aus der Werkzeugmaschine selbst sowie die verbesserte Anwendungsfreundlichkeit von Machine Learning (ML)-Algorithmen legen es nahe, mithilfe von trainierten ML-Modellen aus den Prozessdaten eine Vorhersage über die Teilequalität zu treffen. Sobald dies mit einer hohen Verlässlichkeit gelingt, besteht die Chance, aktuelle QS-Prozesse deutlich aufwandsärmer zu gestalten und ggf. Ausschuss proaktiv zu vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit untersucht Frau Dr. Ziegenbein daher am Beispiel der Zerspanung zum einen die Nutzbarkeit von Werkzeugmaschinensteuerungsdaten als Eingangsgrößen für die Qualitätsprädiktion und zum anderen die Leistungsfähigkeit ausgewählter ML-Verfahren und hier insbesondere den Einfluss der Datenvorbereitung auf die Vorhersagegenauigkeit der Klassifikation von Bauteilen. Dabei leitet sie wichtige Erkenntnisse für den erfolgreichen Einsatz von ML in der diskreten Fertigung ab. Dabei wird u. a. deutlich, dass die Datenvorbereitung keine einschränkende Wirkung auf den anschließenden Einsatz unterschiedlicher ML-Algorithmen hat, sofern die Hyperparameter der Induktoralgorithmen den Rahmenbedingungen angepasst werden. Vielmehr entsteht eine Optimierungsaufgabe zwischen Aufwand der Datenakquise und -aufbereitung und dem Nutzen der aus den Daten modellierbaren Klassifikatoren. Diese und weitere Erkenntnisse dieser Arbeit sind für den künftigen, erfolgreichen Einsatz von ML-Verfahren in der prädiktiven Qualitätssicherung von hoher Bedeutung.

Darmstadt, im Juli 2022 Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich gilt mein besonderer Dank, nicht nur für die wissenschaftliche Betreuung, sondern insbesondere für das entgegengebrachte Vertrauen und die Offenheit beim Erschließen eines neuen Forschungsgebiets in der Produktionsforschung und seiner Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA für sein fachliches Interesse und die bereitwillige Übernahme des Korreferats. Ich bedanke mich außerdem für die mir zur Verfügung gestellte Rechenzeit auf den Hochleistungsrechnern Lichtenberg an den Nationales Hochleistungsrechnen an Hochschulen (NHR)-Zentren NHR4CES an der TU Darmstadt. Diese werden auf Grundlage der Beschlüsse der Gemeinsame Wissenschaftskonferenz (GWK) zum NHR durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die am NHR beteiligten Landesregierungen gefördert.

Besonders herausheben möchte ich das stets engagierte Support-Team am PTW, das mich in den unterschiedlichsten Belangen immer wieder hervorragend unterstützt hat und danke stellvertretend Christine Sutton, Annette Heb, Boris Prinzisky, Alexander Rühl und Mirko Feick. Daneben möchte ich mich herzlich bei den Kolleg:innen bedanken, die meine Institutszeit zu einem prägenden Lebensabschnitt gemacht haben, insbesondere bei meiner eigenen Forschungsgruppe (MiP) und der Gruppe TEC. Die hervorragende Arbeit im Bereich der Maschinenanbindung hat entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen, ebenso wie die stets hilfsbereite Unterstützung bei der Nutzung der Versuchshalle und -maschinen, für die ich vor allem Alexander Fertig danke.

Mein besonderer Dank gilt außerdem Dr.-Ing. Patrick Stanula, mit dem ich das Themengebiet der erweiterten Datenanalyse in der Produktion erschließen konnte, und Dr.-Ing. Eva Bosch für unsere fachlichen Diskussionen und wertvolle Anregungen. Für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit danke ich insbesondere Judith Möller und Dr.-Ing. Timo Scherer.

Darüber hinaus danke ich meinen Freundinnen, die mich auf meinem Weg begleitet, unterstützt und motiviert haben. Der größte Dank gilt meinem Vater, dem ich diese Arbeit widme. Er hat mir das Studium und damit auch die Promotion ermöglicht und mir in jeder Phase meines Lebenswegs nichts als unerschütterliches Vertrauen entgegengebracht.

Darmstadt, im Juli 2022 Amina Ziegenbein

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis xi

Symbolverzeichnis xv

Abbildungsverzeichnis xix

Tabellenverzeichnis xxi

1 Einleitung 1
1.1 Zielsetzung und Forschungsansatz 2
1.2 Aufbau der Arbeit 4

I Grundlagen 7

2 Systemrahmen 9
2.1 Prädiktive Qualität 9
2.2 Konkretisierung der Forschungsfrage 11
2.3 Systemrahmen 13
2.4 Prozessmodelle 14

3 Stand der Forschung 21
3.1 Maschinelles Lernen 21
3.1.1 Klassifikation 22
3.1.2 Ensemble-Methoden 29
3.1.3 Hyperparameteroptimierung 31
3.2 Modellqualität 33
3.2.1 Testdatensatzziehung 36
3.2.2 Metriken 38
3.3 Feature Engineering 40
3.3.1 Featureextraktion 44
3.3.2 Featureprojektion 45
3.3.3 Featureauswahl 48
3.4 Datenqualität 53
3.4.1 Herkunft und Definition 53

3.4.2 Metriken und Datenqualität für Machine Learning 54

4 Forschungslücke 59
4.1 Datenqualität 59
4.2 Feature Engineering 61
4.3 Modellevaluation 65

II Voruntersuchung 69

5 Datenakquise 71
5.1 Versuchsplanung und Durchführung 71
5.1.1 Versuchsplanung 71
5.1.2 Versuchsdurchführung 74
5.2 Datenverständnis 76
5.2.1 Datenqualität 77
5.2.2 Signalauswahl 80

6 Vorversuche 83
6.1 Labeling 86
6.2 Rauscheinfluss 87
6.3 Featurematrixdesign 89
6.4 Zwischenvalidierung Erklärungsbeitrag 92
6.5 Featurebewertung 94
6.6 Filtermethode 96
6.7 Hauptkomponentenanalyse 99
6.8 Evaluierungsstrategie 101
6.8.1 Modellkapazität 102
6.8.2 Stichprobengröße 103
6.9 Zwischenfazit 107

III Hauptuntersuchung 109

7 Experimentelles Design 111
7.1 Versuchsdesign 111
7.2 Versuchsablauf 114
7.3 Vorbereitung 116
7.4 Klassifikationsergebnisse 118
7.5 Zwischenfazit 121

8 Datenauswertung 125
8.1 Abhängige und erklärende Variablen 125
8.2 Effekte der Datenvorbereitungsschritte 127
8.3 Übertragung auf weitere Klassifikatoren 132
8.4 Zusammenfassung 134

9 Diskussion und Implikationen für die Praxis 137
9.1 Diskussion der Vorgehensweise 137
9.2 Diskussion der Ergebnisse 140
9.2.1 Signalvorauswahl 140
9.2.2 Klassenausgleich 143
9.2.3 Featurevorauswahl 144
9.2.4 Featurematrixdesign 145
9.2.5 Filtermethode 147
9.2.6 Hauptkomponentenanalyse 148
9.2.7 Induktorauswahl 150
9.2.8 Zusammenfassung 152

10 Fazit 157

Literatur 161

A Statistische Grundlagen 203
A.1 Gauss-Markov Bedingungen 203
A.2 Stichprobengröße 204

B Anhang 207