TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Thomas Grosch

# Störkonturfreie Sensorintegration in Werkzeugspannfutter zur Prozessüberwachung

**Schriftenreihe des PTW „Innovation Fertigungstechnik“**

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

PTW TU DARMSTADT

# Störkonturfreie Sensorintegration in Werkzeugspannfutter zur Prozessüberwachung

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

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Thomas Grosch, M.Sc.**

aus Fulda

| | |
|---|---|
| Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. E. Abele |
| Mitberichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. C. Stroh |
| Tag der Einreichung: | 28.06.2020 |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 20.10.2020 |

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Thomas Grosch**

# Störkonturfreie Sensorintegration in Werkzeugspannfutter zur Prozessüberwachung

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2020

**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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7717-9
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 spanende Bearbeitung steht seit jeher unter dem Druck Kosten und Bearbeitungszeit zu senken bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität. Ein klassischer Ansatz zur Unterstützung der Zielerreichung in diesem Dreieck ist die Prozessüberwachung mittels zusätzlicher Sensorik. Zudem wird im Kontext der digitalen Transformation die Nutzung dieser Überwachungsdaten auch in höheren Ebenen der Automatisierungspyramide immer weiter vorangetrieben. Eine große Herausforderung bei der Entwicklung eines neuen Überwachungssystems ist es hierbei, den geeigneten Mittelweg zwischen (Signal-)Qualität, (System-)Kosten, Integrationsgrad und Konnektivität zu finden.

Der Autor hat sich der Fragestellung angenommen, wie ohne den Nachteil von Störkonturen in Kauf zu nehmen und die Randbedingungen der digitalen Transformation zu berücksichtigen eine wirkstellennahe Sensorpositionierung im Bearbeitungsprozess möglich ist. Zu diesem Zweck wird ein Werkzeugspannfutter so modifiziert, dass Sensorik zur Messgrößenerfassung, Elektronik zur Auswertung und eine funkbasierte Kommunikation unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen und Randbedingungen integriert werden können. Eines der gewählten Anwendungsszenarien ist die Schwingungsüberwachung im Fräsprozess, hierzu wird neben der technischen Entwicklung die theoretische Grundlage erarbeitet, wie Beschleunigungssignale eines rotierenden Sensorsystems richtig zu interpretieren sind. Das entwickelte sensorische Spannfutter kann auf Grund der autarken Spannungsversorgung, der Einhaltung der Spannfutter-Normen sowie der Nutzung des Bluetooth-Protokolls flexibel ohne zusätzliche Komponenten in jedem Bearbeitungszentrum mit entsprechender Spindel-Spannfutter-Schnittstelle eingesetzt werden.

Bearbeitungsversuche haben die Funktionalität des Systems und die Verifizierung der Anforderungen bestätigt. In spezifischen Versuchen konnten zudem die theoretischen Grundlagen validiert werden. Es können Fehler im Bearbeitungsprozess (bspw. Rattern) detektiert und Aussagen über den Werkzeugzustand getroffen werden. Das sensorische Spannfutter liefert Mehrwerte sowohl für den Dauerbetrieb in einer Serienfertigung als auch den kurzzeitigen Einsatz für die Einrichtung von Bearbeitungsprozessen oder der Einzelteilfertigung.

Darmstadt im Oktober 2020 Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Eberhard Abele

# Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Leiter des Fachgebiets, Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Eberhard Abele, danke ich sehr herzlich für die wissenschaftliche Betreuung, seine Unterstützung und die Durchsicht der schriftlichen Ausarbeitung. Die konstruktive und offene Zusammenarbeit habe ich immer sehr geschätzt.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Carsten Stroh für das entgegengebrachte Interesse an der Arbeit, die fachlichen Anregungen und die bereitwillige Übernahme des Korreferats bedanken.

Den Projektpartnern des BMBF Verbundprojektes „SmartTool“ möchte ich für die fachlichen Diskussionen und technischen Anregungen danken, diese trugen stets dazu bei die Praxistauglichkeit dieser Arbeit zu gewährleisten. Insbesondere danke ich der Haimer GmbH, vertreten durch Herrn Franz Ziegltrum, für die freundliche und unkomplizierte Zusammenarbeit sowie die Bereitstellung der modifizierten Spannfutter.

Ein Dank gilt auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am PTW für die stets freundliche und professionelle Zusammenarbeit. Neben dem Support, der IT und der Buchhaltung möchte ich mich besonders beim mechanischen Support und der Elektronikwerkstatt bedanken. Hervorzuheben sind hierbei Hans-Jürgen Hermann und Bruno Adams sowie stellvertretend für das ganze Werkstatt Team Mirko Feick.

Zudem möchte ich den Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet für diverse (nicht immer fachliche) Diskussionen und die gute Zusammenarbeit danken. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Christian Baier, Frederik Birk, Andreas Bretz, Michael Haydn, Alexander Hoßfeld, Tilo Sielaff und Florian Unterderweide. Ihr seid – wie man im Fußball so schön sagt – auch neben dem Platz immer eine Unterstützung für das Vorhaben Dissertation gewesen. Ebenso danke ich meinen beiden studentischen Hilfskräften Maximilian Metz und Anton Weiss für die tatkräftige Unterstützung.

Der größte Dank gilt meiner Freundin Sophia und meiner Familie! Ihr habt mir immer den Rücken gestärkt und damit wesentlich dazu beigetragen, damit diese Arbeit schlussendlich gelingen konnte.

Darmstadt im Oktober 2020 Thomas Grosch

# Inhaltsverzeichnis


**1 Einleitung** **1**
1.1 Ausgangssituation . . . . . 1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . . 2

**2 Werkzeugzustandsüberwachung beim Fräsen** **5**
2.1 Begriffsklärung Prozessüberwachung in der spanenden Fertigung 8
2.2 Nutzung vorhandener Signale in WZM . . . . . 10
2.2.1 Motorspindel . . . . . 10
2.2.2 Vorschubachse . . . . . 12
2.2.3 Fazit zur Nutzung vorhandener WZM-Signale . . . . . 13
2.3 Prozessinformationen mittels zusätzlicher Sensorik in WZM . 14
2.3.1 Motorspindel und Vorschubachse . . . . . 14
2.3.2 Werkstück und Arbeitsraum . . . . . 17
2.3.3 Multisensorsysteme . . . . . 21
2.3.4 Fazit zu zusätzlicher Sensorik in WZM . . . . . 23
2.4 Prozessinformationen mittels sensorischer Werkzeugspannfutter 24
2.4.1 Kraft und Drehmoment . . . . . 24
2.4.2 Temperatur . . . . . 28
2.4.3 Schwingung . . . . . 30
2.4.4 Fazit zu sensorischen Werkzeugspannfuttern . . . . . 32

**3 Motivation, Randbedingungen und Zielsetzung** **35**
3.1 Randbedingungen im Kontext der digitalen Transformation . 36
3.2 Zielsetzung . . . . . 40

**4 Sensorvorauswahl und Signalkonditionierung** **43**
4.1 Sensorprinzipien . . . . . 43
4.1.1 Schwingungsüberwachung . . . . . 45
4.1.2 Temperatur . . . . . 48
4.1.3 Überwachung der inneren Kühlmittelzufuhr . . . . . 51
4.2 Signalkonditionierung . . . . . 53
4.3 Fazit zur Sensorvorauswahl und Signalkonditionierung . . . . 55

**5 Entwicklung des sensorischen Werkzeugspannfutters 57**
5.1 Anforderungen an das System . . . 58
5.2 Systementwurf . . . 62
5.2.1 Gliederung in Teilfunktionen . . . 63
5.2.2 Erarbeitung von Teillösungen . . . 64
5.2.3 Auswahl Gesamtsystem . . . 74
5.3 Domänenspezifischer Entwurf . . . 78
5.3.1 Elektrotechnik . . . 79
5.3.2 Informationstechnik . . . 86
5.4 Systemintegration . . . 87
5.4.1 Beschleunigungsaufnehmer . . . 88
5.4.2 Hauptplatine mit Mikrocontroller . . . 90
5.4.3 Antenne . . . 92
5.4.4 Batterie . . . 92
5.4.5 Kostenübersicht – Elektronikkomponenten . . . 93
5.5 Iterationen des Makrozyklus – Gesamtsystem . . . 94
5.5.1 Ringplatine – Voruntersuchung . . . 94
5.5.2 Integration und Schocksensor . . . 95
5.5.3 Beschleunigungsaufnehmer und Folienantenne . . . 96
5.5.4 Finales Gesamtsystem – SMD-Antenne . . . 97

**6 Signalinterpretation 99**
6.1 Einflüsse auf das Beschleunigungssignal . . . 99
6.1.1 Außermittige Sensorpositionierung . . . 99
6.1.2 Rotierendes Sensorsystem . . . 100
6.2 Amplitudenmodulation . . . 104
6.3 Erwartete Messsignale . . . 106
6.3.1 Einachsige Betrachtung . . . 106
6.3.2 Zweiachsige Betrachtung . . . 108

**7 Validierung des sensorischen Werkzeugspannfutters 111**
7.1 Funktionsnachweis . . . 112
7.2 Fräsversuche I – Signalinterpretation . . . 114
7.2.1 Versuchsaufbau und Zielstellungen . . . 114
7.2.2 Versuchsergebnisse . . . 115
7.3 Fräsversuche II – Prozessstabilität . . . 118
7.3.1 Versuchsaufbau und Zielstellungen . . . 119
7.3.2 Versuchsergebnisse . . . 121
7.4 Fräsversuche III – Verschleiß . . . 125
7.4.1 Versuchsaufbau und Zielstellungen . . . 125

7.4.2 Versuchsergebnisse . . . . . 126
7.5 Fazit der Versuchsauswertung . . . . . 128

**8 Zusammenfassung und Ausblick** **129**

**Literatur** **133**

**A Anhang** **151**
A.1 Anforderungslisten . . . . . 151
A.1.1 Temperaturüberwachung . . . . . 151
A.1.2 IKZ-Überwachung . . . . . 153
A.2 Ergänzung zur Signalinterpretation . . . . . 156