





# **Methode zur digitalen Vernetzung von Produktionsmaschinen zur Lastgangglättung im Betrieb**

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

**Benjamin Menz, M.Sc.**

aus Gelnhausen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl

Tag der Einreichung: 28. November 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Januar 2017

Darmstadt 2016

D17



Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Benjamin Menz**

**Methode zur digitalen Vernetzung von Produktions-  
maschinen zur Lastgangglättung im Betrieb**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5277-0

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

## Vorwort des Herausgebers

Die Steigerung der Energieeffizienz sowie die Nutzung von regenerativen Energiequellen erfährt eine steigende Bedeutung auf Grund der negativen Auswirkungen durch den Ausstoß von Treibhausgasen auf die Umwelt. Damit einhergehend sind eine starke Volatilität im Energieangebot sowie steigende Energiekosten. Ein wesentlicher Verbraucher von elektrisch bereitgestellter Energie ist die Industrie, die im Folgenden fokussiert wird.

Eine stärkere informationstechnische Vernetzung von energieverbrauchenden Geräten untereinander mit dem elektrischen Energieangebot eröffnet als nächsten Schritt neue Möglichkeiten zur Anpassung von Lastgängen und Energieverbräuchen.

Diese Arbeit liefert einen Beitrag zur digitalen Vernetzung von Werkzeugmaschinen zur hochfrequenten Erfassung des Lastgangs. Anschließend wird eine maschinenübergreifende Online Lastgangglättung vorgestellt, die einen Beitrag zur Verringerung von Schwankungen auf Verbraucherseite, zur Lastgangglättung sowie zur Reduktion von Anschlussinfrastrukturkosten liefert.

Darmstadt, im Januar 2017

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele



## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt und als Doktorand bei der Bosch Rexroth AG. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele danke ich herzlich für die Betreuung auf dem Weg zur Dissertation. Durch die Diskussionen, Anregungen und Vorschläge wurde die Entstehung der Arbeit ermöglicht.

Für die Übernahme der Mitberichterstattung bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl vom Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt.

Meinen Betreuern Dr. Jens Brühl und Günther Landgraf danke ich vielmals für die inspirierenden Diskussionen auf dem Weg zur Dissertation. Allen anderen Kollegen im Entwicklungsbereich der Antriebe und Steuerungen von Bosch Rexroth danke ich für die Unterstützung. Für ein stets offenes Ohr danke ich Michael Albrecht, Tobias Macheleidt, Dr. Stephan Schultze, Dr. Christian Fahrbach und Dr. Andreas Emrich.

Den Kollegen vom PTW, insbesondere der Gruppe umweltgerechte Produktion, danke ich für die zahlreichen Diskussionen.

Für die gute Zusammenarbeit möchte ich mich bei den Studenten bedanken, die mich während meiner Doktorandenzeit unterstützt haben. Sie alle haben zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt meiner ganzen Familie. Meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben, meinen Großeltern, meinem Bruder, meiner Tochter und Julia, die mich rücksichtsvoll während der Erstellung dieser Arbeit behandelt haben. Julia, ich danke dir für dein tiefes Verständnis und deine Umsicht, die du mir während meiner Promotionszeit entgegengebracht hast. Ohne dies wäre meine Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen Freunden danke ich für die Unterstützung abseits der Wissenschaft.

Lohrhaupten, im Januar 2017

Benjamin Menz

*Man kann nicht in die Zukunft schauen, aber man kann den Grund für etwas Zukünftiges legen - denn Zukunft kann man bauen.*

(Antoine de Saint-Exupéry (1900-44), frz. Flieger u. Schriftsteller )

Schlagwörter: NC-Maschine, Energiecontrolling, Wissensverarbeitung



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Trend zur digitalen Vernetzung der Produktion .....	2
1.2	Bereitstellung und Verbrauch von elektrischer Energie .....	3
1.3	Energetische Optimierung in der Produktion als Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele .....	5
1.4	Lastgangglättung als Beitrag zur Anpassung des Energieverbrauchs .....	5
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>7</b>
2.1	Allgemeine Datenanalyse in der Produktion nach dem CRISP DM .....	7
2.2	IT-Infrastruktur in der Produktion .....	9
2.2.1	Bestehende IT-Systeme in der Produktion .....	9
2.2.2	Von der Automatisierungspyramide zur Referenzarchitektur .....	10
2.2.3	Kommunikationsprotokoll OPC UA .....	13
2.2.4	Cloud Computing in der Produktionsautomatisierung .....	14
2.3	Werkzeugmaschinen .....	16
2.3.1	Unterteilung von Werkzeugmaschinen und Fertigungsverfahren .....	16
2.3.2	Numerische Steuerungen .....	16
2.3.3	Komponenten von Werkzeugmaschinen .....	17
2.4	Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen .....	20
2.5	Lastgangglättung in der Produktion .....	22
2.5.1	Grundsätzlicher elektrischer Anschluss von Werkzeugmaschinen im Fabriknetz .....	22
2.5.2	Gleichstromnetze als Beitrag zur Lastgangglättung von Werkzeugmaschinen im Verbund .....	25
2.5.3	Vermeidung von Leistungsspitzen maschinenintern .....	28
2.5.4	Vermeidung von Leistungsspitzen maschinenübergreifend .....	29
2.5.5	Vermeidung von Leistungsspitzen durch Energiespeicher .....	30
2.5.6	Forschungsprojekt Ecomation .....	30
2.5.7	Forschungsprojekt FOREnergy .....	32
2.5.8	FoFdation .....	33
2.5.9	Forschungsprojekt ETA-Fabrik .....	34
2.5.10	Weitere Veröffentlichungen zum Thema Lastgangglättung .....	35
2.6	Zusammenfassung des Stands der Forschung .....	37

<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>39</b>
3.1	Aufgabenstellung und Anwendungsbereich .....	39
3.2	Struktur der Arbeit .....	42
<b>4</b>	<b>Konzeption der datentechnischen Erfassung zur Glättung des Lastgangs ....</b>	<b>45</b>
4.1	Datenauswertung zur übergreifenden Lastgangglättung .....	45
4.1.1	Trigger und Aktivitäten zur Datenanalyse.....	46
4.1.2	Implementierung von Methoden im Framework.....	48
4.1.3	Integration von Workflows zur Erhöhung der Transparenz.....	49
4.2	Die digitale Vernetzung als Beitrag zur Referenzarchitektur.....	52
4.3	Umsetzung der Systematik in einem Netzwerk als Edge Device.....	53
4.4	Zusammensetzung des Lastgangs von Werkzeugmaschinen .....	55
4.5	Freiheitsgrade zur Lastgangglättung.....	60
4.6	Zwischenfazit: Leistungsspitzen bei Werkzeugmaschinen .....	61
4.7	Datenakquise im Bereich der Werkzeugmaschinen .....	62
4.7.1	Übersicht zur übergreifende Datenakquise.....	62
4.7.2	Entwicklung des NC-korrelierten Mechanismus zum kontinuierlichen Streamen .....	65
4.7.3	Konfiguration der NC-korrelierten Aufzeichnung .....	70
4.8	Übergreifendes Prozesscontrolling zur Lastgangglättung .....	72
4.9	Eingriff in das NC-Programm zum Verschieben der Bearbeitungssequenz .....	72
4.10	Workflows zur Datensammlung und Lastgangglättung .....	74
4.11	Zusammenfassung zur Erfassung des Lastgangs.....	78
<b>5</b>	<b>Erarbeitung einer Methode zur Lastgangglättung .....</b>	<b>81</b>
5.1	Anpassung des Lastgangs durch Abstimmung paralleler Bearbeitungsvorgänge .....	81
5.2	Annahmen und Auswahl einer Methode zur Lastgangglättung .....	83
5.3	Zusammenfassung zur Glättung des Lastgangs.....	87
<b>6</b>	<b>Umsetzung der Methode in einer Modellfabrik .....</b>	<b>89</b>
6.1	Bearbeitungsschritte in der ETA-Fabrik.....	91
6.2	Umsetzung zur Lastgangglättung .....	94
6.2.1	Ausgangszustand .....	94
6.2.2	Erreichte Glättung und Diskussion der Ergebnisse .....	100
6.2.3	Analyse der Produktivitätsbeeinflussung .....	105
6.3	Zusammenfassung und Ausblick zur Anwendung der Lastgangglättung ....	106
6.4	Zwischenfazit zur vorgestellten Methodik .....	112

---

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>115</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>119</b>
<b>A Anhang .....</b>	<b>133</b>
A.1 Beschreibung von Aktivitäten.....	133
A.2 Beispielhaftes NC-Programm .....	134
A.3 Kosten für Komponenten der elektrischen Netzinfrastruktur.....	134
A.4 Schaltplan SW-EMAG Bearbeitungszentrum .....	135
A.5 Weitere Messergebnisse.....	135
A.6 Lebenslauf des Autors.....	138