



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Philipp Schraml

Methode zur Reduktion maximaler elektrischer Lasten spanender Werkzeugmaschinen

**Schriftenreihe des PTW:
„Innovation Fertigungstechnik“**

**Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele,
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich**



Methode zur Reduktion maximaler elektrischer Lasten spanender Werkzeugmaschinen

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Schraml

aus Heppenheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. E. Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. A. Sauer
Tag der Einreichung:	09.11.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	16.01.2018

Darmstadt 2018

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Philipp Schraml

**Methode zur Reduktion maximaler elektrischer Lasten
spanender Werkzeugmaschinen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5833-8

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Das Energiesystem in Deutschland befindet sich mitten im Wandel von konventionellen hin zu regenerativen Energieträgern. Diese Herausforderung kann nur gelingen, wenn auch auf der Verbraucherseite ein Umdenken stattfindet. So wird es in Zukunft für Unternehmen immer wichtiger werden nicht nur die eingesetzte Energiemenge zu minimieren bzw. zu optimieren, sondern auch die Höhe der bezogenen Leistung, sowie den Zeitpunkt des Leistungsbezugs möglichst flexibel zu gestalten.

Bedingt durch die große Verbreitung spanender Werkzeugmaschinen in Deutschland, bergen diese ein entsprechend großes Potenzial Lastspitzen unternehmensseitig zu reduzieren und somit einen positiven Beitrag für die Stabilität des Gesamtenergiesystems in Deutschland zu leisten.

Auftretende elektrische Lastspitzen bereits innerhalb einer spanenden Werkzeugmaschine zu minimieren ist die Zielstellung des Autors der vorliegenden Dissertation. Der Fokus liegt dabei auf der zeitlichen Abstimmung des Betriebs energetisch relevanter Nebenaggregate, um elektrische Lastüberlagerungen und resultierende Lastplateaus zu reduzieren.

Hierzu wird zunächst ein Vorgehen aufgezeigt, welches es ermöglicht, das Lastreduktionspotenzial einer spanenden Werkzeugmaschine im Rahmen einer Potenzialanalyse zu quantifizieren. Darauf aufbauend wird ein maschinenbezogenes elektrisches Lastmanagement mit dem Ziel, das identifizierte Lastreduktionspotenzial zu heben, vorgestellt. Das maschinenbezogene Lastmanagement ist dabei zweigeteilt aufgebaut:

- Im Rahmen eines Fahrplanoptimierers wird zunächst ein lastminimaler Nebenaggregatefahrplan bestimmt. In diesem Zeitplan wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt im Bearbeitungsprozess welches Nebenaggregat aktiv bzw. nicht aktiv sein sollte, um die Gesamtleistungsaufnahme der Maschine minimal zu halten.
- Der resultierende lastminimale Nebenaggregatefahrplan wird wiederum durch einen Betriebsoptimierer auf der zu optimierenden Werkzeugmaschine umgesetzt.

Abschließend zeigt der Autor mit einer beispielhaften Umsetzung das Leistungsvermögen eines maschinenbezogenen Lastmanagements auf.

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. Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, gilt mein besonderer Dank, sowohl für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, als auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung während meiner Zeit am Institut. Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer möchte ich für die Übernahme des Koreferats und die vertrauensvolle Zusammenarbeit danken. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich für die konstruktive Zusammenarbeit in den letzten Jahren.

Besonders möchte ich mich bei dem stets engagierten, hilfsbereiten und äußerst freundlichen Support am PTW bedanken. Ohne euch wäre keine geregelte Projektarbeit möglich gewesen. Auch möchte ich mich bei den zahlreichen Partnern aus den Forschungsprojekten ECOMATION, EMC2, ETA-Fabrik und SynErgie bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank dem Team der Forschungsgruppe Umweltgerechte Produktion, für die tolle und vor allem freundschaftliche und effiziente Zusammenarbeit, sowie für die geschaffenen Freiräume, ohne die an eine Fertigstellung meiner Dissertation nicht zu denken gewesen wäre.

Für die fachliche Unterstützung im mathematischen Bereich möchte ich Adrian Sichau und für die zahlreichen inhaltlichen Inputs, sowie die vielen motivierenden Worte, Christian Eisele, Sebastian Schrems, Martin Beck und Daniel Moog danken.

Meinen Schwiegereltern gebührt mein Dank insbesondere für die liebevolle Kinderbetreuung, welche mir die entsprechenden zeitlichen Freiräume zur Erstellung dieser Arbeit geschaffen hat.

Meinen Eltern möchte ich von Herzen für die große Unterstützung nicht nur während der Entstehung dieser Arbeit, sondern auch weit darüber hinaus danken.

Ebenso möchte ich meiner Schwester Stephanie danken, welche mir immer mit Rat und Tat beiseite stand.

Mein größter Dank aber gilt meiner Frau Katharina und meinen Kindern Emma, Paul und Emil, die es mir durch ihr Verständnis und ihre Unterstützung erst erlaubt haben, mein Ziel zu erreichen – euch widme ich diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Formelzeichen	XIII
1 Einführung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Allgemeine Zielstellung und Struktur	4
2 Begriffliche Klärung und Grundlagen	5
3 Stand des Wissens in Theorie und Praxis	13
3.1 Spanende Werkzeugmaschinen	13
3.1.1 Aufbau, Funktionen und Betrieb von Werkzeugmaschinen	16
3.1.2 Elektrischer Anschluss von Werkzeugmaschinen in Fabriknetzen	21
3.1.3 Elektrischer Energiebedarf und Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen	23
3.1.4 Bestimmung des elektrischen Lastgangs von Werkzeugmaschinen .	28
3.2 Ansätze zur Abschätzung und Beeinflussung des elektrischen Lastgangs.....	29
3.2.1 Softwarebasierte und regelungstechnische Lösungen	30
3.2.2 Hardwarebasierte Lösungen.....	37
3.2.3 Abschätzung des elektrischen Lastreduktionspotenzials von Produktionsmaschinen	38
3.3 Fazit zum Stand des Wissens in Theorie und Praxis	45

4	Forschungskonzeption.....	49
4.1	Forschungsziele	49
4.2	Anforderungen und Rahmenbedingungen.....	50
4.3	Lösungsweg.....	52
5	Entwicklung einer Potenzialanalyse zur Abschätzung des möglichen Lastreduktionspotenzials spanender Werkzeugmaschinen	55
5.1	Ziele, Anforderungen und Konzept.....	55
5.2	Berücksichtigte Baugruppen einer Werkzeugmaschine	56
5.3	Potenzialanalyse für die Optimierung des elektrischen Lastgangs...59	
5.3.1	Priorisierung der Nebenaggregate einer Werkzeugmaschine für ein maschinenbezogenes Lastmanagement	60
5.3.2	Bestimmung der Eignung eines Nebenaggregats für ein maschinenbezogenes Lastmanagement	63
5.3.3	Quantifizierung des maschinenbezogenen Lastreduktionspotenzials	70
5.4	Umsetzung in einer Softwareumgebung	72
6	Entwicklung eines Optimierers zur Reduktion maximaler elektrischer Lasten spanender Werkzeugmaschinen	75
6.1	Ziele, Anforderungen und Konzept.....	75
6.2	Technische Nebenbedingungen und Annahmen.....	78
6.3	Mathematische Formulierung des Optimierungsproblems	85
6.3.1	Zielfunktion	85
6.3.2	Nebenbedingungen	87
6.4	Umsetzung in einer Softwareumgebung	94
6.4.1	Softwareseitige Implementierung des Fahrplanoptimierers	99
6.4.2	Softwareseitige Implementierung des Betriebsoptimierers	102
7	Exemplarische Anwendung	105
7.1	Ausgangssituation	105
7.1.1	Demonstratorbauteil	105
7.1.2	Demonstratormaschine	107
7.2	Anwendung	111
7.2.1	Abschätzung des Lastreduktionspotenzials.....	111
7.2.2	Implementierung des maschinenbezogenen Lastmanagements	116
7.3	Ergebnisdiskussion.....	126
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	127

Quellenverzeichnis	131
---------------------------------	------------

Anhang A: Typenschildangaben Demonstratormaschine	145
---	------------