



Stefan Seifermann

**Methode zur angepassten Erhöhung
des Automatisierungsgrades hybrider,
schlanker Fertigungszellen**

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

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



**Methode zur
angepassten Erhöhung des Automatisierungsgrades
hybrider, schlanker Fertigungszellen**

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

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Seifermann

aus Bühl (Baden)

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

Tag der Einreichung: 04. Juli 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 13. November 2017

Darmstadt 2017

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Stefan Seifermann

**Methode zur angepassten Erhöhung
des Automatisierungsgrades hybrider,
schlanker Fertigungszellen**

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., 2017

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 978-3-8440-5684-6

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

Die klassischen Zieldimensionen der Produktion – Zeit, Kosten und Qualität – sind seit jeher unverändert. Auch wenn Konflikte zwischen den Teilzielen letztlich unvermeidbar sind, so hat sich in den vergangenen Jahrzehnten der Ansatz der „Schlanken Produktion“ als integratives, ganzheitliches Konzept zur gleichzeitigen Reduzierung derselben erwiesen. Einer der wesentlichen Grundpfeiler der Schlanken Produktion ist dabei die kontinuierliche Fließfertigung, die in der Regel durch schlanke Fertigungszellen realisiert wird. In solchen schlanken Fertigungszellen arbeiten Menschen und Maschinen hybrid zusammen. Art und Umfang der Arbeitsteilung zwischen Mensch und automatisierter Maschine hängen dabei stark vom vorherrschenden Automatisierungsgrad in der Fertigungszelle ab. Gerade in bestehenden Brownfield-Fertigungszellen stellt sich die Frage, ob der Mensch dabei nicht Tätigkeiten wahrnimmt, die automatisiert zu einem besseren Gesamtsystem führen, und – falls dem so ist – wie man zu technischen Automatisierungslösungen gelangt, die nach Kosten, Art und Umfang an die schlanke Brownfield-Umgebung angepasst sind.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung hat der Autor der vorliegenden Dissertation einen siebenstufigen methodischen Ansatz entwickelt und auf seine Tauglichkeit überprüft. Ausgehend von der analytischen Untersuchung der manuellen Tätigkeiten, der Automatisierungsnotwendigkeiten und der Automatisierungsspielräume in der Zelle werden systematische Wege zum Finden, Bewerten und zur Auswahl von angepassten, schlanken Automatisierungslösungen aufgezeigt. Der Fokus liegt dabei auf der operationalen Anwendbarkeit der Methode, auch durch unerfahrene Nutzer. Entsprechende Unterstützung in Form von Software und Formblättern stellt der Autor ebenfalls bereit. In der empirischen Anwendung in einer kontrollierten Lernfabrikumgebung und in einem produzierenden Unternehmen der Luftfahrtindustrie konnte die hohe Güte der Methode hinsichtlich der an sie gestellten Anforderungen nachgewiesen werden.

Im Ergebnis der Arbeit steht somit eine Methode, die wissenschaftlich abgesichert ist, aber dennoch einen sehr pragmatischen Ansatz bietet.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt. Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, gilt mein besonderer Dank, nicht nur für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen, sondern insbesondere auch für die umfassende Unterstützung in den vergangenen Jahren. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder für sein fachliches Interesse sowie die bereitwillige Übernahme des Koreferats. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich möchte ich mich für die konstruktiven, „schlanken“ Diskussionen und für die angenehme Zusammenarbeit am Institut ebenfalls herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt außerdem dem engagierten und stets hilfsbereiten Support-Team am PTW, das mich in allen Belangen immer wieder hervorragend unterstützt hat. Ebenso möchte ich mich bei den vielen Industrieunternehmen und Studenten bedanken, mit denen ich im Rahmen meiner Arbeit zusammenarbeiten durfte. Auch den Wissenschaftlichen Mitarbeitern am PTW, insbesondere in „meinen“ Forschungsgruppen CiP und UP, ein herzliches Dankeschön für die Unterstützung, aber auch für die herausragende Arbeit im Tagesgeschäft, die Freiräume für die Doktorarbeit überhaupt erst ermöglicht hat.

Aus einem Team stechen immer einige Einzelpersonen hervor, die einen herausragenden Beitrag zum Gelingen einer Dissertation leisten. In meinem Fall bin ich Herrn Dr.-Ing. Sven Bechtloff, Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Jörg Böllhoff, Herrn Carsten Schaede, M.Sc., sowie Herrn Christoph Schwarz zu höchstem Dank verpflichtet. Ihnen, und vor allem Frau Dr.-Ing. Eugenia Gossen, danke ich herzlichst für die zahlreichen fachlichen sowie nicht-fachlichen Diskussionen. Ebenso möchte ich meiner Familie ein großes Dankeschön aussprechen für all den Rückhalt und all das Vertrauen, über all die Jahre hinweg.

Mein größter Dank jedoch, aus tiefstem Herzen, gilt Dir, Cathrin! Ohne die ständige Unterstützung und den Verzicht von Dir und Florentine wären das Entstehen und der Abschluss dieser Arbeit niemals möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hinführung zum Thema	1
1.2	Motivation und Problemstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1	Abgrenzungen grundlegender Begrifflichkeiten	7
2.1.1	Zum Begriff „Methode“	7
2.1.2	Zu den Begriffen „Mechanisierung“, „Automatisierung“, „hybride Automatisierung“ und „angepasste Automatisierung“	8
2.1.3	Zum Begriff „Automatisierungsgrad“	10
2.1.4	Zum Begriff „Fertigung“ als Bestandteil der „industriellen Produktion“	11
2.1.5	Zum Begriff „Fertigungszelle“	12
2.1.6	Zum Begriff „Schlanke Produktion/Lean Production“	13
2.2	Automatisierungsplanung	14
2.2.1	Wahl des Automatisierungsgrades	16
2.2.2	Mensch und Automatisierung	19
2.2.3	Zwischenfazit	23
2.3	Ansätze aus der Automatisierungsplanung von spanenden Fertigungssystemen	24
2.3.1	Überblick über Automatisierungslösungen in der spanenden Fertigung	24
2.3.2	Automatisierungsausbaustufen in der spanenden Fertigung	28
2.3.3	Spezifische Vorgehensweisen zur Automatisierungsplanung	29
2.3.4	Zwischenfazit	33
2.4	Ansätze aus der Automatisierungsplanung von Montagesystemen	34
2.4.1	Überblick über Automatisierungslösungen in der Montage	34
2.4.2	Spezifische Vorgehensweisen zur Automatisierungsplanung	37
2.4.3	Zwischenfazit	40
2.5	Ansätze aus der Planung von schlanken Fertigungszellen	41

2.5.1	Automatisierung in schlanken Fertigungszellen.....	43
2.5.2	Allgemeine Feststellungen und spezifische Vorgehensweisen zur Planung von schlanken Fertigungszellen	45
2.5.3	Zwischenfazit.....	52
2.6	Ansätze aus der Low-cost (intelligent) Automation.....	53
2.6.1	Low-cost Automatisierung nach dem Verständnis der Automatisierungstechnik	53
2.6.2	Low-cost (intelligent) Automation nach dem Verständnis der Schlanken Produktion.....	55
2.6.3	Zwischenfazit.....	61
2.7	Fazit zum Stand der Wissenschaft und Technik.....	62
3	Zielsetzung, Forschungskonzeption und Untersuchungsbereiche.....	65
3.1	Abgeleitete Forschungsziele und Anforderungen an die Methode	65
3.1.1	Forschungsziele	65
3.1.2	Inhaltliche Anforderungen an die Methode.....	65
3.1.3	Formale Anforderungen an die Methode.....	66
3.2	Lösungsansatz	68
3.3	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs.....	69
4	Entwicklung der Methode zur angepassten Erhöhung des Automatisierungsgrades hybrider, schlanker Fertigungszellen	71
4.1	Methodenanstoß durch die Notwendigkeit zur Automatisierung im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung	71
4.2	Entwicklung und Konzeption des Methodengerüsts	73
4.3	Organisatorische Randbedingungen	76
4.4	Grenzen der Methode	79
4.4.1	Sicherheitsgrenzen.....	80
4.4.2	Qualitätsgrenzen	85
5	Ausgestaltung der Methode zur angepassten Erhöhung des Automatisierungsgrades hybrider, schlanker Fertigungszellen	89

5.1 Methodenbaustein 1: Identifikation manueller Tätigkeiten in hybriden, schlanken Fertigungszellen	89
5.1.1 High-Level-Strukturierung manueller Tätigkeiten mittels Hierarchical Task Analysis	89
5.1.2 Detaillierte Quantifizierung manueller Tätigkeiten mittels Systeme vorbestimmter Zeiten	94
5.1.3 Unterteilung in beabsichtigte Tätigkeiten und Hilfstätigkeiten.....	105
5.1.4 Unterteilung in hauptzeitaddierende und hauptzeitparallele Tätigkeiten	107
5.2 Methodenbaustein 2: Vertiefte Analyse der Notwendigkeiten für die Automatisierung	108
5.2.1 Identifikation zeitlicher Automatisierungsnotwendigkeiten	109
5.2.2 Kostenmodellierung und Identifikation finanzieller Automatisierungsnotwendigkeiten	115
5.2.3 Identifikation qualitativer Automatisierungsnotwendigkeiten	129
5.2.4 Identifikation ergonomischer Automatisierungsnotwendigkeiten	131
5.3 Methodenbaustein 3: Identifikation von Automatisierungsspielräumen.....	136
5.3.1 Identifikation zeitlicher Automatisierungsspielräume.....	137
5.3.2 Identifikation finanzieller Automatisierungsspielräume	139
5.4 Methodenbaustein 4: Detaillierung der Problemstellung aufgrund der Erkenntnisse zu Automatisierungsnotwendigkeiten und manuellen Tätigkeiten.....	146
5.5 Methodenbaustein 5: Identifikation potentieller Automatisierungsalternativen	149
5.5.1 Vorbereitende Produktstrukturanalyse existierender Anlagen	151
5.5.2 Vorbereitende Schnittstellenanalyse existierender Anlagen	153
5.5.3 Automatisierungstechnik	159
5.5.4 Generierung der Lösungsalternativen.....	159
5.6 Methodenbaustein 6: Bewertung der Automatisierungsalternativen....	160
5.6.1 Bewertung aus zeitlicher Sicht	162
5.6.2 Bewertung aus finanzieller Sicht	167
5.7 Methodenbaustein 7: Auswahl der Lösungsalternativen.....	170
5.8 Zwischenfazit.....	172

6	Konkretisierung der Methode für schlanke Sequenzfertigungszellen in der Bohr- und Fräsbearbeitung	173
6.1	Besonderheiten schlanker Sequenzfertigungszellen in der Bohr- und Fräsbearbeitung.....	173
6.2	Konkretisierte Produktstruktur- und Schnittstellenanalyse für Sequenzfertigungszellen.....	176
6.2.1	Produktstrukturanalyse	176
6.2.2	Schnittstellenanalyse.....	178
6.3	Bewertung.....	179
6.3.1	Bewertung aus zeitlicher Sicht	180
6.3.2	Bewertung aus Kostensicht.....	183
6.4	Zwischenfazit.....	187
7	Rechnerbasiertes Optimierungsmodell zur Methoden- und Auswahlunterstützung	189
7.1	Konzeption des rechnerbasierten Modells und seiner Teile	189
7.1.1	Konzeption des Modells zur Unterstützung des Methodenbausteins 1: Identifikation manueller Tätigkeiten	189
7.1.2	Konzeption des Modells zur Unterstützung des Methodenbausteins 2: Notwendigkeiten für die Automatisierung....	190
7.1.3	Konzeption des Modells zur Unterstützung des Methodenbausteins 3: Automatisierungsspielräume	193
7.1.4	Konzeption des Modells zur Unterstützung des Methodenbausteins 7: Lösungsauswahl	194
7.2	Umsetzung des Modells	206
7.2.1	Umsetzung grundlegender Ein-/Ausgaben und der Steuerung	207
7.2.2	Umsetzung der Angaben zu den Arbeitsstationen i	207
7.2.3	Umsetzung der Angaben zum Schichtmodell	208
7.2.4	Umsetzung der Auswahl und Parametrisierung des Optimierungsalgorithmus	209
7.2.5	Umsetzung der Ausgabe des Optimierungsergebnisses	209
7.3	Zwischenfazit.....	210
8	Empirische Evaluation der entwickelten Methode	211

8.1 Anwendung der Methode	212
8.1.1 Anwendung der Methode auf die Sequenzfertigungszelle in der Prozesslernfabrik CiP	212
8.1.2 Anwendung der Methode in der industriellen Praxis	215
8.2 Auswertung der Erkenntnisse	216
9 Zusammenfassung und Ausblick	219
9.1 Zusammenfassung	219
9.2 Ausblick	223
Literaturverzeichnis	225
A Anhang	253
A.1 Ablaufdiagramm zur Entscheidungsunterstützung von Sicherheitsmaßnahmen bei Neuerstellung oder Modifikation von bestehenden Anlagen	253
A.2 Einzelergebnisse der Anwendung unterschiedlicher SvZ auf die Referenzfertigungszelle	255
A.3 Ermittlung der Bewertung und Gewichtung der SvZ in der Referenzfertigungszelle mittels AHP	293
A.4 Übersicht über die Einzelfälle zur zeitlichen Automatisierungsnotwendigkeit und zu zeitlichen Automatisierungsspielräumen	297
A.5 Darstellung des ergonomischen Grob-Screening-Bogens AWS^{light}	298
A.6 Programmablaufplan der Umsetzung des rechnerbasierten Optimierungsmodells	299
A.7 Übersicht über die bei der Anwendung der Methode in der Sequenzfertigungszelle der Prozesslernfabrik entwickelten Lösungen	313