

Michael Feldmeth

Methode zur modellbasierten Bewertung und systematischen Verbesserung von Fertigungssystemen

MOREMEDIA



Springer Vieweg

Methode zur modellbasierten Bewertung und systematischen Verbesserung von Fertigungssystemen

Michael Feldmeth

Methode zur
modellbasierten
Bewertung und
systematischen
Verbesserung von
Fertigungssystemen

 Springer Vieweg

Michael Feldmeth
Chemnitz, Deutschland

Diese Arbeit wurde von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.) genehmigt.

Tag der Einreichung: 16.01.2020

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Egon Müller

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Egon Müller

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Walter

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus

Tag der Verteidigung: 26.08.2020

ISBN 978-3-658-32287-8

ISBN 978-3-658-32288-5 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-32288-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geographische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Carina Reibold

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Produktionsunternehmen sind vielfältigen Herausforderungen ausgesetzt, die sich aus ständig wandelnden Anforderungen des wirtschaftlichen, technologischen, politischen und sozialen Umfeldes ergeben. Um auf diese Herausforderungen mit effizienten Maßnahmen reagieren zu können, werden hohe Anforderungen an die Fähigkeit der Unternehmen gestellt, flexibel und mit hoher Effizienz ihre Prozesse ganzheitlich und wertschöpfungsorientiert zu planen und zu gestalten.

Bereits Anfang der 90er Jahre wurden die Potenziale der schlanken Produktion erkannt, publiziert und besonders in der Automobilindustrie erschlossen. Die dabei gefundenen Erkenntnisse zeigten klar die höhere Leistungsfähigkeit einer schlanken Produktion gegenüber der traditionellen Massenproduktion.

Prinzipien dieser Produktionsphilosophie wurden bei der Planung, Realisierung und dem Betreiben von Fertigungssystemen aus ganzheitlicher Sicht sehr wenig angewendet, wobei es aber schon immer einen nachgewiesenen Bedarf in der Fertigung gab und gibt. Im Vergleich zur Montage dominieren in der Fertigung die maschinellen Prozesse, was sich wiederum in einem hohen Anteil an Maschinen und Ausrüstungen dokumentiert. Es ist dabei ein zwingendes Erfordernis, dass Maschinen so gestaltet sind, dass die Tätigkeiten der Mitarbeiter mit dem Produktionsfluss in Einklang gebracht werden können.

Studien belegen die Erfolgswirksamkeit der Lean-Prinzipien im Umfeld der mechanischen Fertigung und ebenso wird in ihnen nachgewiesen, dass die Durchdringung in den Fertigungsbereichen weit weniger ausgeprägt ist als in der Montage. Diese geringe Verbreitung und die oftmals nicht erfolgreiche Umsetzung der Prinzipien der schlanken Produktion in der Fertigung sind darauf zurückzuführen, dass es dazu keine geeignete ganzheitliche methodische Unterstützung zur Planung und zum Betreiben von Fertigungssystemen gibt. Dieses Fehlen geeigneter Methoden und häufig auch die spezifischen Sachverhalte der

maschinenbezogenen Einflussgrößen bei Fertigungssystemen sind mit wesentliche Gründe dafür, dass aktuell keine umfassende Methode existent ist, mit der es möglich ist, Fertigungssysteme im Einklang mit den Prinzipien der schlanken Produktion modellbasiert zu bewerten und systematisch zu verbessern. Um Zielzustände zu erreichen, ist eine umfassende Methode erforderlich, mit der man in der Lage ist, den Fertigungsplanungsprozess systematisch zu unterstützen und bewerten zu können.

Vor diesem Hintergrund erfolgt eine systematische Auseinandersetzung mit den theoretischen Grundlagen und dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Die industrielle Produktion und die Fabrik als Gesamtsystem werden beschrieben und die darin ablaufenden Fertigungsprozesse allgemeingültig und im Kontext der Teilefertigung spezifiziert. Über die Beschreibung und Klassifizierung von Fertigungssystemen wird eine klare begriffliche Abgrenzung wichtiger Sachverhalte bezüglich der Methodenentwicklung vorgenommen. Ebenso erfolgt eine systematische Auseinandersetzung mit dem Toyota Produktionssystem und damit letztendlich die Begründung der Entwicklung der „Methode zur modellbasierten Bewertung und systematischen Verbesserung von Fertigungssystemen“.

Die vorgenommene Eingrenzung des Betrachtungsbereichs, die Beschreibung des Methodengerüsts und eine Erklärung des Planungsobjektes Fertigungssystem unterstreichen die systematische Auseinandersetzung mit der gesamten Thematik.

Mit dem Erklärungsmodell für die Methode und der Beschreibung der geforderten Funktionslogik wird darauf aufbauend das grundlegende Methodengerüst entwickelt und bereitgestellt. Die Ausarbeitung und Konkretisierung der multikriteriellen Bewertungsmethode sowie die Festlegung des allgemeinen Bewertungsablaufs einschließlich der Identifikation der erforderlichen Bewertungskriterien sind dabei eine wichtige Grundlage für den generellen Aufbau der Methode als bausteinbasierter Ansatz. Die Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit der Methode unterstreichen durchgängig den eigenen wissenschaftlichen Beitrag des Autors und den durch ihn geschaffenen wissenschaftlichen Erkenntniszuwachs mit Respekt.

Mit der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit leistet der Autor einen wichtigen methodischen Beitrag für das Themengebiet der Fabrikplanung und -organisation unter Berücksichtigung von spezifischen Aspekten der Fertigungsplanung. Es ist ausdrücklich zu bestätigen, dass es dem Autor sehr gut gelungen ist, vor einem praktischen Anwendungshintergrund auf wissenschaftlicher Grundlage einen methodischen Beitrag zur systematischen Planung und Verbesserung von Fertigungssystemen zu leisten und die praxiswirksame Umsetzung nachzuweisen.

Die von ihm entwickelte Methode mit ihren Bestandteilen unterstreicht den Neuheitsgrad der vorgelegten wissenschaftlichen Arbeit. Diese Bestandteile wurden in sehr gut nachvollziehbarer Art und Weise abgeleitet und in der entwickelten Methodik für eine praktische Anwendung bereitgestellt.

Prof. Dr.-Ing. Egon Müller

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Unternehmensberater bei der Staufen AG. Bei den Menschen, die mich während dieser Zeit unterstützt haben, möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Egon Müller, vom Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme (IBF) der Technischen Universität Chemnitz, möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen. Die wohlwollende Förderung sowie die regelmäßigen Diskussionen und Denkanstöße waren die Grundvoraussetzung für das Gelingen dieser Arbeit. Das kritische Hinterfragen der Sachverhalte und die lösungsorientierten Gespräche trugen stets zur Weiterentwicklung des bearbeiteten Themas bei.

Ebenso möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ulrich Walter, von der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Esslingen, für die fachlichen Diskussionen zum Thema, die daraus entstandenen Anregungen und die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Bei Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus möchte ich mich herzlich für die Übernahme des Drittgutachtens bedanken.

Bei der Staufen AG möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen für die Ausarbeitung des Themas und die gewährten zeitlichen Freiräume, die für das Gelingen der Arbeit notwendig waren, herzlich bedanken. An dieser Stelle möchte ich Herrn Frank Krause, Leiter der Kompetenzentwicklung bei der Staufen AG, meinen besonderen Dank aussprechen, nicht nur für die Hinführung und die Begeisterung für das Thema „Lean in der mechanischen Bearbeitung“, sondern auch für die wertvollen methodischen und fachlichen Impulse sowie die kritische Begutachtung des Manuskripts.

In der herausforderungsvollen Zeit während der nebenberuflichen Erstellung dieser Arbeit hat mich meine Familie wie gewohnt liebe- und verständnisvoll

begleitet und unterstützt. So gebührt meinen Eltern, Frau Helga Feldmeth und Herrn Karl Feldmeth, ein ganz herzlicher Dank. Meiner Freundin Corinna Walk danke ich nicht nur für das Verständnis für den hohen Zeitbedarf zur Erstellung dieser Arbeit und das Korrekturlesen des Manuskripts, sondern vor allem dafür, was sie jeden Tag für mich ist.

Michael Feldmeth

Kurzfassung

Die durch das Toyota-Produktionssystem bekannten Prinzipien der schlanken Produktion stellen die Grundlage erfolgreicher Unternehmen dar. Heute sind die Prinzipien der schlanken Produktion im Bereich der Montage weit verbreitet. In der mechanischen Fertigung ist die Umsetzung der Prinzipien jedoch weitaus weniger verbreitet. Die besonderen Herausforderungen bei der Umsetzung sind die maschinenintensiven Prozesse und die damit erforderliche Kombination zwischen menschlicher und maschineller Arbeit.

Zur Unterstützung der zukünftigen Umsetzung von schlanken Fertigungssystemen wurde in der vorliegenden Arbeit eine ergänzende Methode für die Fertigungsplanung entwickelt. Diese dient zur modellbasierten Bewertung und systematischen Verbesserung von Fertigungssystemen nach den Prinzipien der schlanken Produktion. Die Methode setzt sich aus den drei Methodenbausteinen Fertigungssystemmodell, Bewertungsmethode und Verbesserungsleitfaden zusammen. Bei der Ausgestaltung der einzelnen Methodenbausteine kommt der Betrachtung der Abhängigkeitsverhältnisse zwischen den ausgewählten Bewertungskriterien eine besondere Bedeutung zu.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit und deren Relevanz	4
1.3	Forschungsprozess und Aufbau der vorliegenden Arbeit	6
2	Theoretische Grundlagen und aktueller Stand der Wissenschaft ...	11
2.1	Industrielle Produktion	11
2.1.1	Fabrik als industrieller Betrieb	11
2.1.2	Fertigungsprozesse und Teilefertigung	13
2.1.3	Fertigungssysteme und Werkzeugmaschinen	14
2.2	Planung von Fertigungssystemen	19
2.2.1	Fertigungsplanung im betrieblichen Umfeld	19
2.2.2	Relevante Planungsansätze für Fertigungssysteme	20
2.3	Das Toyota-Produktionssystem (TPS)	25
2.3.1	Entstehung, Zielsetzung und Aufbau	25
2.3.2	Relevante Elemente des TPS	27
2.4	Aktueller Stand der Wissenschaft und Forschungsbedarf	32
2.4.1	Anforderungen an das Literatur-Review und Vorgehensweise	32
2.4.2	Identifikation relevanter Literatur im Themenfeld	34
2.4.3	Einordnung der relevanten Literatur	38
2.4.4	Schlussfolgerung und Fazit zum aktuellen Stand der Wissenschaft	44
3	Methode zur modellbasierten Bewertung und systematischen Verbesserung von Fertigungssystemen	47
3.1	Vorüberlegungen zur Methodenentwicklung	47

3.1.1	Abgrenzung des Objekt- und Methodenbereichs	48
3.1.2	Anforderungen an die Methode	49
3.1.3	Erklärungsmodell für die Methode	50
3.2	Methodengerüst und Methodenbausteine	53
3.3	Planungsobjekt Fertigungssystem	62
3.3.1	Anforderungen zur Abgrenzung und Definition	62
3.3.2	Anwendungs- und Betrachtungsbereich	63
3.3.3	Allgemeines Fertigungssystem als objekttheoretische Basis	67
3.3.4	Schlankes Fertigungssystem	71
3.3.5	Schlussbemerkung zum Planungsobjekt	75
3.4	Methodenbaustein Bewertungsmethode	75
3.4.1	Anforderungen an den Methodenbaustein	76
3.4.2	Funktionsweise zur Ermittlung der Bewertungsergebnisse	79
3.4.2.1	Deterministische Bewertungskriterien	81
3.4.2.2	Qualitative Bewertungskriterien	82
3.4.3	Submodul 1: Fertigungssystemwert	85
3.4.3.1	Anforderungen an schlanke Fertigungssysteme	86
3.4.3.2	Bewertungskriterien	98
3.4.3.3	Kennzahlensystem für den Fertigungssystemwert	98
3.4.4	Submodul 2: Wirtschaftlichkeit	106
3.4.4.1	Anforderungen an die Bewertung	106
3.4.4.2	Bewertungskriterium	108
3.4.5	Schlussbemerkung zum Methodenbaustein	111
3.5	Methodenbaustein Fertigungssystemmodell	112
3.5.1	Anforderungen an den Methodenbaustein	112
3.5.2	Modelltyp	114
3.5.3	Operationalisierung der Bewertungskriterien	116
3.5.4	Modelllogik und Modellaufbau	132
3.5.5	Schlussbemerkung zum Methodenbaustein	134
3.6	Methodenbaustein Verbesserungsleitfaden	134
3.6.1	Anforderungen an den Methodenbaustein	135
3.6.2	Theoretische Basis für den Aufbau des Verbesserungsleitfadens	137
3.6.2.1	Abhängigkeitsverhältnisse zwischen den Bewertungskriterien	137

3.6.2.2	Clustering und Reihenfolgebildung der Bewertungskriterien	142
3.6.3	Aufbau des Verbesserungsleitfadens	147
3.6.4	Fertigungssystemwert und Wirtschaftlichkeit	152
3.6.5	Schlussbemerkung zum Methodenbaustein	156
3.7	Zusammenfassung und Zwischenfazit	157
4	Methodenintegration und -anwendung	159
4.1	Integration der Methode in einen Fertigungsplanungsprozess ...	159
4.2	Anwendung der Methode im Fertigungsplanungsprozess	164
4.2.1	Phase 1: Situationsanalyse	165
4.2.2	Phase 2: Zielformulierung	166
4.2.3	Phase 3: Lösungsfindung	169
4.2.4	Phase 4: Bewertung der Lösungen	175
4.2.5	Phase 5: Entscheidung	177
4.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit	177
5	Evaluierung der Methode anhand eines industriellen Anwendungsfalls	179
5.1	Vorstellung des industriellen Anwendungsfalls	179
5.2	Anwendung der Methoden und deren Ergebnisse	181
5.3	Evaluierung der Methode	186
6	Zusammenfassung und Ausblick	191
	Glossar	197
	Literaturverzeichnis	201

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Forschungsprozess nach Ulrich und Aufbau der vorliegenden Arbeit	7
Abbildung 2.1	Hierarchische Ordnung der Fertigungssysteme	12
Abbildung 2.2	Gliederung der Fertigungsprozesse	14
Abbildung 2.3	Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580	15
Abbildung 2.4	Ablaufarten in der Teilefertigung	16
Abbildung 2.5	Klassifizierung der Werkzeugmaschinen	18
Abbildung 2.6	Planung von Produktionssystemen	21
Abbildung 2.7	Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme	24
Abbildung 2.8	Das Toyota-Produktionssystem	27
Abbildung 2.9	Reihenfolge bei der Automatisierung manueller Tätigkeiten	30
Abbildung 2.10	Standardarbeitskombinationsblatt	31
Abbildung 2.11	Vorgehensweise zur Durchführung des Literatur-Reviews	34
Abbildung 2.12	Suchterme für das Literatur-Review	35
Abbildung 2.13	Ableitung des MSDD-Bewertungswerkzeugs aus der MSDD-Aufgliederung	40
Abbildung 2.14	Methode mit einem Rückkopplungsmechanismus zur kontinuierlichen Verbesserung	41
Abbildung 2.15	Lean-Kennzahlenpyramide zur Ermittlung des Lean-Grads	42
Abbildung 2.16	Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Fertigungssystemen	43

Abbildung 3.1	Abgrenzung und Zusammenspiel zwischen Objekt- und Methodenbereich	48
Abbildung 3.2	Heuristischer Bezugsrahmen als Erklärungsmodell für die Methode	52
Abbildung 3.3	Funktionslogik der systematischen Verbesserung des Planungsergebnisses	54
Abbildung 3.4	Allgemeiner Regelkreis	56
Abbildung 3.5	Methodengerüst als Regelkreis im Anwendungsumfeld Fertigungsplanung	58
Abbildung 3.6	Methodenbausteine im abgegrenzten Methodenbereich	61
Abbildung 3.7	Ablauf der modellbasierten Bewertung und systematischen Verbesserung	62
Abbildung 3.8	Freischnitt des Planungsobjekts aus dem Methodengerüst	63
Abbildung 3.9	Abgrenzung des Anwendungsbereichs	64
Abbildung 3.10	Abgrenzung des Betrachtungsbereichs im Kontext des MTO-Ansatzes	66
Abbildung 3.11	Definition eines allgemeinen Fertigungssystems	71
Abbildung 3.12	Schematische Darstellung eines schlanken Fertigungssystems	73
Abbildung 3.13	Freischnitt der Bewertungsmethode aus dem Methodengerüst	76
Abbildung 3.14	Bewertungskriterien und ideales Fertigungssystem	79
Abbildung 3.15	Vereinfachte exemplarische Darstellung des Bewertungsvorgangs	81
Abbildung 3.16	Wertfunktionen für die deterministischen Bewertungskriterien	82
Abbildung 3.17	Bewertungsvorgang bei qualitativen Bewertungskriterien	84
Abbildung 3.18	Schema der Merkmalstabellen für qualitative Bewertungskriterien	85
Abbildung 3.19	Grafische Darstellung der Bewertungskriterien zur Bestimmung des Fertigungssystemwerts	101
Abbildung 3.20	Darstellung der Bewertungsergebnisse im Bewertungsraum	102
Abbildung 3.21	Aggregationsstufen der Bewertungskriterien	103
Abbildung 3.22	Abgrenzung zwischen Herstellkosten K_H und Herstellteilkosten K_{HT}	109

Abbildung 3.23	Bestandteile der Herstellteilkosten K_{HT}	110
Abbildung 3.24	Freischnitt des Fertigungssystemmodells aus dem Methodengerüst	113
Abbildung 3.25	Abbildungscharakter des Fertigungssystemmodells	115
Abbildung 3.26	Bestimmung der Werte M und V über die Verbindungsmatrix	118
Abbildung 3.27	Zeitliche Bezugsgrößen für die Bewertung der Austaktungseffizienz	120
Abbildung 3.28	Abhängigkeitsverhältnisse maschineller und menschlicher Arbeit	122
Abbildung 3.29	Zeitliche Bezugsgrößen in einem Arbeitssystem AS_p	125
Abbildung 3.30	Aufbau des Fertigungssystemmodells	133
Abbildung 3.31	Freischnitt des Verbesserungsleitfadens aus dem Methodengerüst	135
Abbildung 3.32	Kriterien zur Quantifizierung der Einflüsse zwischen den Bewertungskriterien	139
Abbildung 3.33	Ergebnis der k -Means-Clusteranalyse	144
Abbildung 3.34	Bewertungskriterien der drei Cluster	145
Abbildung 3.35	Reihenfolge der Bewertungskriterien ohne Rückflüsse	147
Abbildung 3.36	Verbesserungsleitfaden	148
Abbildung 3.37	Kostennomogramm für Arbeitssysteme	155
Abbildung 4.1	Vorgehensweise zur Vervollständigung des heuristischen Bezugsrahmens	162
Abbildung 4.2	Integration der Methodenbausteine in den Fertigungsplanungsprozess	163
Abbildung 4.3	Parameter zur Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe	166
Abbildung 4.4	Analogie zwischen Planungsraum und Bewertungsraum	172
Abbildung 4.5	Wirkung und Nutzen der Methode im Fertigungsplanungsprozess	174
Abbildung 4.6	Beispielhafte Ergebnisse aus der Phase 4: Bewertung der Lösungen	176
Abbildung 5.1	Betrachtetes Fertigungssystem zur Produktion der Kipphebel	181
Abbildung 5.2	Modellierung gemäß der Definition eines allgemeinen Fertigungssystems	182

Abbildung 5.3	Visualisierung des Bewertungsergebnisses	183
Abbildung 5.4	Anwendung des Methodenbausteins Verbesserungsleitfaden	185
Abbildung 5.5	Auswirkungen durch die Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen	186

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Handlungsbedarf für die Fertigungsplanung	3
Tabelle 2.1	Hauptkomponenten von Werkzeugmaschinen	18
Tabelle 2.2	Anforderungen an das Literatur-Review	32
Tabelle 2.3	Identifikation relevanter Literatur im Themenfeld	37
Tabelle 2.4	Einordnung der relevanten Literatur und aktueller Stand der Wissenschaft	39
Tabelle 3.1	Relevante Begriffe im Umfeld der Fertigungsplanung	51
Tabelle 3.2	Komponenten und Signale der Regelungstechnik im Anwendungsumfeld	57
Tabelle 3.3	Komponenten im Objekt- und Methodenbereich	61
Tabelle 3.4	Definitionsgerüst für das schlanke Fertigungssystem	73
Tabelle 3.5	Anforderungsgruppen und -untergruppen	87
Tabelle 3.6	Relevante Anforderungen an Fertigungssysteme	91
Tabelle 3.7	Einordnung der verwendeten Relationenbezeichnungen	93
Tabelle 3.8	Relationenprüfmatrix der Anforderungen an Fertigungssysteme	95
Tabelle 3.9	Bewertungskriterien gemäß der konsolidierten Anforderungsliste	99
Tabelle 3.10	Abgrenzung des Modelltyps anhand der Klassifikation von Modellen nach Klein & Scholl	115
Tabelle 3.11	Einflussmatrix der Bewertungskriterien	138
Tabelle 3.12	Quantifizierung der Einflüsse zwischen den Bewertungskriterien	141
Tabelle 3.13	Ausgewählte Verbesserungsmaßnahmen	150
Tabelle 4.1	Gegenüberstellung relevanter Planungsansätze	161

Tabelle 4.2	Beschreibung der Phase Situationsanalyse	165
Tabelle 4.3	Beschreibung der Phase Zielformulierung	167
Tabelle 4.4	Beschreibung der Phase Lösungsfindung	170
Tabelle 4.5	Planungsaufgaben im Planungsraum	173
Tabelle 4.6	Beschreibung der Phase Bewertung der Lösungen	175
Tabelle 4.7	Beschreibung der Phase Entscheidung	177
Tabelle 5.1	Ergebnis der Evaluierung anhand der gestellten Anforderungen	187
Tabelle 5.2	Erfüllung der Planungsgrundsätze nach Grundig	189

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

\underline{A}	–	Anforderungsmatrix
A_i	%	Verfügbarkeit der Maschine E_i
AGK_i^{plan}	€	Geplante Arbeitsgangkosten an der Maschine E_i
APM_i	–	Anzahl der zur Maschine E_i parallel arbeitenden Maschinen
AS_p	–	Arbeitssystem p im Fertigungssystem
b	–	Index der Bewertungskriterien
b_i^{Masch}	m	Breite der Maschine E_i
BMe_i	–	Bearbeitungsmenge an der Maschine E_i
BZ_p	h	Betriebszeit des Arbeitssystems AS_p
\vec{c}	–	Vektor Verschwendungserzeugung
C_j	–	Cluster j
d_i	m	Distanz der (räumlichen) Struktur S_i
E_i	–	Maschine i im Fertigungssystem
EG	–	Elementgüte
\vec{EG}	–	Vektor Elementgüte
f_i^L	%	Koeffizient der Leistungsausnutzung an der Maschine E_i
$f_{Schicht}$	%	Korrekturfaktor für Schichtzuschläge
FBE	–	Anzahl der fremdbelegten Maschinen E_i im Fertigungssystem

FSW	–	Fertigungssystemwert
FSW_{Alt}	–	Fertigungssystemwert des alten Planungsstands
FSW_{Neu}	–	Fertigungssystemwert nach der Verbesserung
FT	–	Anzahl Fabrikstage pro Jahr
\vec{g}	–	Vektor Gewichtungsfaktoren
\vec{GG}	–	Vektor Gestaltungsgüte
i	–	Indexvariable
$i_{\%}$	%	Jährlicher kalkulatorischer Zinssatz
I_i	%	Materialflussintensität über die (räumliche) Struktur S_i
I_i^{Ges}	€	Gesamte Investitionssumme für die Maschine E_i
j	–	Index für Cluster
JGK	€	Jährliche Gesamtkosten
k	–	Anzahl der Cluster
k_{IHRate}	%	Instandhaltungsrate
k_i^E	€/h	Kosten für elektrische Energie an der Maschine E_i
k_p^{GLMfix}	€/h	Stundensatz für fixe Maschinenkosten im Arbeitssystem AS_p
k_p^{GLMvar}	€/h	Stundensatz für variable Maschinenkosten im Arbeitssystem AS_p
k_p^{var}	€/h	Variabler Arbeitssystemstundensatz für das Arbeitssystem AS_p
$k_p^{Wzg/V}$	€/h	Stündliche Werkzeugkosten im Arbeitssystem AS_p
K_A	€	Abschreibungskosten für ein Stück
K_E	€	Kosten für elektrische Energie für ein Stück
K_{Fl}	€	Flächenkosten für ein Stück
K_{FL}	€	Fertigungslohnkosten für ein Stück
K_{GF}	€	Fertigungsgemeinkosten für ein Stück
K_{GL}	€	Lokalisierbare (Gemein-)Kosten für ein Stück
K_{GFR}	€	Restfertigungsgemeinkosten für ein Stück
K_{GLMfix}	€	Fixe Maschinenkosten für ein Stück
K_{GLMvar}	€	Variable Maschinenkosten für ein Stück
K_{GLW}	€	Weitere lokalisierbare Gemeinkosten für ein Stück
K_H	€	Herstellkosten für ein Stück
K_{HT}	€	Herstellteilkosten für ein Stück

K_{HT}^{Max}	€	Maximale Herstellteilkosten für ein Stück
K_{HT}^{Ziel}	€	Ziel-Herstellteilkosten für ein Stück
$K_i^{A/FT}$	€	Abschreibungskosten der Maschine E_i für einen Fabriktag
$K_i^{I/FT}$	€	Instandhaltungskosten der Maschine E_i für einen Fabriktag
$K_i^{Logfix/FT}$	€	Fixe Logistikkosten des Übergangsprozesses P_i für einen Fabriktag
K_i^{Logvar}	€	Variable Logistikkosten des Übergangsprozesses P_i für ein Stück
$K_i^{Z/FT}$	€	Zinskosten der Maschine E_i für einen Fabriktag
K_I	€	Instandhaltungskosten für ein Stück
K_{Log}	€	Logistikkosten für ein Stück
K_M	€	Materialkosten für ein Stück
K_p	€	Arbeitssystemkosten im Arbeitssystem AS_p für ein Stück
$K_p^{Fl/FT}$	€	Flächenkosten des Arbeitssystems AS_p für einen Fabriktag
$K_p^{GLMfix/FT}$	€	Fixkosten des Arbeitssystems AS_p für einen Fabriktag
K_{SEKF}	€	Sondereinzelkosten der Fertigung für ein Stück
K_{Sonst}	€	Sonstige lokalisierbare Gemeinkosten für ein Stück
$K_{Wzg/V}$	€	Kosten für Werkzeuge und Verbrauchsstoffe für ein Stück
K_Z	€	Kalkulatorische Zinskosten für ein Stück
KT	min	Kundentakt im Fertigungssystem
l	–	Index der Störgrößen
m	–	Tägliche Produktionsmenge eines definierten Produkts
$m_{jährl}$	–	Jahresstückzahl eines definierten Produkts
M	–	Anzahl der Maschinen E_i im Fertigungssystem
M_E	–	Menge an Elementen im Fertigungssystem
$M_{E,p}$	–	Menge an Elementen im Arbeitssystem AS_p
M_p	–	Anzahl der Mitarbeiter im Arbeitssystem AS_p
M_P	–	Menge an Prozessen im Fertigungssystem

$M_{P,p}$	–	Menge an Prozessen im Arbeitssystem AS_p
M_S	–	Menge an Strukturen im Fertigungssystem
$M_{S,p}$	–	Menge an Strukturen im Arbeitssystem AS_p
MP	–	Anzahl der maschinellen Prozesse im Fertigungssystem
MP_{Mensch}	–	Anzahl maschineller Prozesse, die das Eingreifen des Menschen erfordern
$MTBF_i$	min	Mean Time Between Failures (dt.: mittlere Zeit zwischen Ausfällen) der Maschine E_i
$MTTR_i$	min	Mean Time To Repair (dt.: mittlere Reparaturzeit) der Maschine E_i
n	–	Index der Verbesserungsmaßnahmen
n_1	–	Anzahl der Elemente in M_E
n_2	–	Anzahl der Strukturen in M_S
n_3	–	Anzahl der Prozesse in M_P
n_4	–	Anzahl der Arbeitssysteme im Fertigungssystem
N_i^I	kW	Installierte Leistung der Maschine E_i
p	–	Index der Arbeitssysteme
P_i	–	Prozess i im Fertigungssystem
PG	–	Prozessgüte
\vec{PG}	–	Vektor Prozessgüte
PM_i	–	Prozessmenge als Stückzahl je Zyklus an der Maschine E_i
PZ_i	min	Prozesszeit der Maschine E_i
Q_p	m ²	Flächenbedarf des Arbeitssystems AS_p
r	–	Korrelationskoeffizient
r_b	–	Merkmalswert des Bewertungskriteriums b
$r_{b,i}$	–	Merkmalsbeschreibung i des Bewertungskriteriums b
$r_{b,v,s}$	–	Merkmalswert des Bewertungskriteriums b für die Planungsvariante v im Iterationsschritt s
\underline{R}	–	Konsolidierungsmatrix
s	–	Iterationsschritt
S	€/h	Lohnkosten
S_i	–	Struktur i im Fertigungssystem
SG	–	Strukturgüte

\vec{SG}	–	Vektor Strukturgüte
t_i^{bearb}	min	Bearbeitungszeit an der Maschine E_i
t_i^{Bed}	s	Bedienzeit der Maschine E_i
t_i^{Einleg}	s	Einlegezeit an der Maschine E_i
t_i^{Ent}	s	Entnahmezeit an der Maschine E_i
t_i^{RZ}	min	Rüstzeit der Maschine E_i
$t_p^{Rüst,Ant}$	min	Anteilige Rüstzeit je Stück im Arbeitssystem AS_p
t_p^t	min	Theoretische Taktzeit eines Arbeitssystems AS_p
$t_p^{Verl,Ant}$	min	Anteilige Verlustzeit je Stück im Arbeitssystem AS_p
T_{Absch}	–	Anzahl Abschreibungsjahre
T_p	h	Produktionszeit für die Menge m
T_p^N	h	Nutzungsdauer eines Arbeitssystems AS_p zur Produktion der Menge m
$T_p^{N,fremd}$	h	Fremdnutzungsdauer eines Arbeitssystems AS_p
$T_p^{Rüst}$	h	Rüstzeit innerhalb der Betriebszeit im Arbeitssystem AS_p
T_p^{Verl}	h	Verlustzeit innerhalb der Betriebszeit im Arbeitssystem AS_p
TWM_{E_i}	–	Transport- und Weitergabemenge der (zeitlichen) Struktur S_i
v	–	Planungsvariante
V	–	Anzahl Verbindungen im Fertigungssystem
V_{Elektr}	€/kWh	Verrechnungspreis für elektrischen Strom
V_{Fl}	€/m ²	Jährlicher Verrechnungssatz der Produktionsfläche
$V_p^{Wzg/V}$	€	Jährliche Werkzeugkosten im Arbeitssystem AS_p
V_{PE}	%	Verbesserung des Planungsergebnisses
w_b	–	Zielwert des Bewertungskriteriums b
$w_{b,i}$	–	Ideale Ausprägung des Merkmals i des Bewertungskriteriums b
$w_{b,grenz}$	–	Grenzwert des Bewertungskriteriums b
$w_{b,grenz,i}$	–	Mangelhafte Ausprägung des Merkmals i des Bewertungskriteriums b