



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Christian Urnauer

**Data Analytics in der
Analyse und Gestaltung
von Wertströmen**

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

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



Institut für
Produktionsmanagement,
Technologie und
Werkzeugmaschinen

Data Analytics in der Analyse und Gestaltung von Wertströmen

Am 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

Christian Urnauer, M. Sc.

aus Bühl

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Mitberichterstatterin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Tag der Einreichung: 06.04.2023

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2023

Darmstadt 2023
D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Christian Urnauer

**Data Analytics in der Analyse und Gestaltung
von Wertströmen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

**Shaker Verlag
Düren 2023**

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9222-6

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 Wertstrommethode ist eine etablierte Methode der Schlanke Produktion, durch deren Anwendung Transparenz und Verbesserungen im gesamten Produktionsablauf realisiert werden. Allerdings hat die Methode Defizite in der Erzeugung einer verlässlichen Datenbasis, in der angemessenen Berücksichtigung von Produktvarianz sowie im Umgang mit Dynamik und Variabilität. Gleichzeitig steigt in produzierenden Unternehmen die Verfügbarkeit von Daten, aus denen Wissen über den Wertstrom und dessen Komplexität extrahiert werden kann.

Die vorliegende Dissertation schließt diese Lücke durch ein Vorgehen zum zielgerichteten Einsatz von Data Analytics. Die verfügbaren Daten werden systematisch ausgewertet, um Informationen aufzubereiten, neue Erkenntnisse zu erlangen und Entscheidungen zu unterstützen. So wird eine höhere Genauigkeit in der Wertstromanalyse und eine höhere Entscheidungssicherheit in der Wertstromgestaltung erreicht.

Die einzelnen Data Analytics Funktionen wurden zunächst durch den Einsatz auf Datensätzen aus Forschungs- und Industrieprojekten verifiziert. Darüber hinaus wird das entwickelte Vorgehen durch eine umfassende Befragung geschulter Expertinnen und Experten validiert und der Erfolg des Einsatzes in diversen Industrieprojekten evaluiert. So wird gezeigt, dass die Anwendung von Data Analytics in der Wertstrommethode mit höherer Effektivität zu einer ganzheitlichen Verbesserung der Produktion führt.

Die Forschungsarbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag zur zukunftsorientierten Weiterentwicklung der schlanke, digitalen Produktion unter Verwendung ihrer Daten.

Darmstadt, im Juli 2023

Prof. Dr.-Ing Joachim Metternich

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der TU Darmstadt. Sie ist das Ergebnis meiner fünfjährigen Forschungsarbeit am Einsatz digitaler Werkzeuge im Kontext der schlanken Produktion. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing Joachim Metternich für die Betreuung dieser Arbeit, die konstruktiv kritischen Diskussionen sowie das entgegengebrachte Vertrauen und die vielfältigen Freiheiten in meiner Tätigkeit. Frau Prof. Dr.-Ing Gisela Lanza danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats sowie das fachliche Interesse an meiner Arbeit.

Großen Einfluss auf das Gelingen meiner Arbeit hatten die Unternehmen, die es mir ermöglichten, anwendungsnahe Produktionsforschung zu betreiben. Insbesondere danke ich Dr.-Ing. Jochen Schlick und seinem Team für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bei NEONEX in der Entwicklung und dem Einsatz neuer datenbasierter Ansätze in diversen Beratungsprojekten. Auch den weiteren Industriepartnern des PTW und der Prozesslernfabrik CiP bin ich dankbar für das entgegengebrachte Vertrauen in der Zusammenarbeit und die vielseitigen Möglichkeiten, von Ihnen zu lernen und meine Ideen bei Ihnen einzubringen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am PTW danke ich für die tolle Zusammenarbeit, die konstruktiven Diskussionen, das ehrliche Feedback und auch für die vielen unvergesslichen Erinnerungen abseits des Institutsalltags. Vor allem die Arbeit im motivierten und leistungsstarken Team der Forschungsgruppe CiP hat mich immer angetrieben. Insbesondere möchte ich mich bedanken bei Dr.-Ing. Joscha Kaiser, Dr.-Ing. Lukas Hartmann, Dr.-Ing. Antonio Kress, Nicholas Frick und Markus Schreiber für den inhaltlichen Austausch, die vielen hilfreichen Impulse und Ratschläge, die Durchhalteparolen sowie für die sorgfältige Durchsicht meiner Dissertation. Zu viele weitere Kolleginnen und Kollegen haben für mich zu einer einzigartigen Zeit am Institut beigetragen, um sie hier einzeln aufzuzählen. Ich hatte eine wunderbare Zeit mit und durch Euch. Danke dafür!

Auch unserem Support-Team am PTW, bestehend aus Assistenz, IT, Media, Buchhaltung und Werkstatt, sowie unseren studentischen Hilfskräften der CiP möchte ich für die tatkräftige Unterstützung danken. Darüber hinaus durfte ich einige sehr gute Abschlussarbeiten betreuen, die mich inhaltlich weitergebracht haben. Hervorheben möchte ich dabei Victoria Gräff, Anna-Maria Larem und Leon Rudolph für ihre starke Arbeit.

Mein herzlichster Dank gilt Dir, liebe Anne, für deine große Unterstützung, für dein Verständnis und für die vielen Zeiten, in denen du mir den Rücken freigehalten hast. Leonie und Lukas, ihr zeigt mir jeden Tag, dass es auch noch wichtigeres im Leben gibt. Danke, dass ihr mich auch nach anstrengenden Tagen immer zum Lachen bringt.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Motivation	2
1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit.....	5
2 Stand der Forschung.....	9
2.1 Wertstrommethode	9
2.1.1 Produktfamilienbildung	10
2.1.2 Wertstromanalyse	11
2.1.3 Wertstromdesign	13
2.1.4 Stärken und Defizite	17
2.1.5 Handlungsbedarf	20
2.1.6 Weiterentwicklungsansätze	21
2.1.7 Zwischenfazit	25
2.2 Digitalisierung in der Produktion	26
2.2.1 Verfügbare Datenbestände zur Verwendung in der Wertstrommethode ..	27
2.2.2 Schlanke Produktion und Digitalisierung.....	31
2.2.3 Zwischenfazit	33
2.3 Data Analytics	34
2.3.1 Descriptive Analytics	35
2.3.2 Predictive Analytics.....	36
2.3.3 Prescriptive Analytics	36
2.3.4 Zwischenfazit	37
2.4 Fazit zum Stand der Forschung.....	38
3 Forschungskonzeption	39
3.1 Forschungsziel	39
3.2 Betrachtungsgegenstand	40

3.3	Forschungsprozess	40
4	Konzeption der Weiterentwicklung	43
4.1	Anforderungen	43
4.1.1	Empirische Anwendungsfallanalyse	43
4.1.2	Inhaltliche Anforderungen	45
4.1.3	Formale Anforderungen	46
4.2	Lösungsansatz	47
4.2.1	Identifikation von Data Analytics-Funktionen	47
4.2.2	Entwicklungsbedarfe der identifizierten Data Analytics-Funktionen	51
4.2.3	Abfolge der Datenverwendung	54
4.2.4	Wirkbeziehungen zu den inhaltlichen Anforderungen	55
5	Detaillierung und Operationalisierung	57
5.1	Data Analytics in der Produktfamilienbildung	57
5.1.1	Erzeugung einer Produktfamilienmatrix mittels Assoziationsanalyse	57
5.1.2	Identifikation von Produktfamilien mittels Clusteranalyse	61
5.2	Data Analytics in der Wertstromanalyse	68
5.2.1	Erfassung des Prozessmodells mittels Process Discovery	69
5.2.2	Ermittlung von Prozessdaten und Beständen mittels modellbasierter Analyse	74
5.3	Data Analytics im Wertstromdesign	82
5.3.1	Wertstromsegmentierung mittels mathematischer Optimierung	82
5.3.2	Wertstromdimensionierung mittels modellbasierter Auslegungsrechnung	88
5.4	Operationalisierung	99
5.4.1	Teamstruktur	99
5.4.2	Vorgehensmodell	100
6	Anwendung und Evaluation	105
6.1	Verwendete Datensätze	106
6.2	Anwendungsevaluierung	108
6.2.1	Befragungsstudie	109
6.2.2	Anforderungserfüllung	110
6.3	Erfolgsevaluierung	112
6.3.1	Erfolgsdefinition	112

6.3.2 Produktfamilienbildung -----	114
6.3.3 Wertstromanalyse -----	117
6.3.4 Wertstromdesign -----	121
6.3.5 Zwischenfazit -----	128
6.4 Fazit zur Anwendung und Evaluation -----	128
7 Zusammenfassung und Ausblick -----	131
7.1 Zusammenfassung -----	131
7.2 Ausblick -----	133
Literaturverzeichnis -----	135
Anhang -----	151
A.1 Symbole der Wertstrommodellierung -----	151
A.2 Fragebogen für die Analyse von Defiziten in der Anwendung der Wertstrommethode -----	152
A.3 Fragebogen für die Evaluation der Anforderungserfüllung -----	153
A.4 Numerische Studie zur Verifikation unterschiedlicher Konfigurationen der Clusteranalyse -----	154
A.5 Numerische Studie zur Verifikation der entwickelten Heuristik zur produktfamilienorientierten Segmentierung -----	160

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit entlang der Forschungsphasen nach DRM-----	6
Abbildung 2: Schritte der Wertstrommethode -----	10
Abbildung 3: Beispielhafte Produktfamilienmatrix -----	11
Abbildung 4: Referenzvorgehen zum Ablauf der Wertstromanalyse-----	11
Abbildung 5: Referenzvorgehen zum Ablauf des Wertstromdesigns-----	13
Abbildung 6: Ergebnis einer Umfrage zu den Vorteilen der Wertstrommethode-----	17
Abbildung 7: Relevanz der Weiterentwicklung der Wertstrommethode-----	21
Abbildung 8: Strukturierung der Entwicklungsrichtungen in der Forschung-----	22
Abbildung 9: Auflösung der Automatisierungspyramide -----	28
Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Reifegrad des Lean Managements und Digitalisierungsreifeegrad -----	33
Abbildung 11: Einordnung von Business Analytics und dessen Teilgebiete -----	35
Abbildung 12: Einordnung von Data Analytics Fähigkeiten-----	38
Abbildung 13: Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit -----	41
Abbildung 14: Verteilung der analysierten Wertstromprojekte nach Branche -----	44
Abbildung 15: Ergebnis der empirischen Untersuchung aufgetretener Defizite bei der Anwendung der Wertstrommethode-----	44
Abbildung 16: Identifikation von Handlungsfeldern zum Einsatz von Data Analytics entlang des Referenzvorgehens der Wertstrommethode-----	48
Abbildung 17: Lösungsansatz: identifizierte Data Analytics-Funktionen zur Unterstützung der Wertstrommethode-----	50
Abbildung 18: Ablauf der Datenverwendung für den Einsatz der Data Analytics- Funktionen in der Wertstrommethode-----	54
Abbildung 19: Eingabe und Ergebnis der Assoziationsanalyse -----	57
Abbildung 20: Eingabe und Ergebnis der Clusteranalyse -----	61
Abbildung 21: Stabilität der untersuchten Ähnlichkeitsmaße für Produkt-Prozess- Matrizen-----	63
Abbildung 22: Stabilität der untersuchten Ähnlichkeitsmaße für metrische Produktfamilienmatrizen -----	64
Abbildung 23: Stabilität der untersuchten Fusionierungsalgorithmen für binäre (links) und metrische (rechts) Produktfamilienmatrizen -----	66
Abbildung 24: Visuelle Bestimmung der Clusteranzahl in einem Dendrogramm (links) oder mittels Ellbogen-Kriterium (rechts), resultierend aus einem Wertstromdesign- Projekt bei einem Batteriezellenhersteller -----	67
Abbildung 25: Process Mining zur Analyse der Produktion -----	69
Abbildung 26: Eingabe und Ergebnis des Process Discovery -----	70
Abbildung 27: Mittels Process Discovery erstelltes Prozessmodell für die Produktion im Forschungsprojekt ArePron-----	73
Abbildung 28: Eingabe und Ergebnis der modellbasierten Analyse-----	74
Abbildung 29: Berechnung der Zyklus- und Bearbeitungszeit für ein Produkt-----	76

Abbildung 30: Bearbeitungs- Liege- und Durchlaufzeitberechnung für ein Produkt mit zwei Prozessen -----	76
Abbildung 31: Berechnung der Synchronisationszeit für ein Produkt mit zwei Vorgängerprozessen A, B und einem Nachfolgerprozess C -----	77
Abbildung 32: Über Tagesbilanzen berechneter Bestandsverlauf bei einem Anlagenbauunternehmen -----	78
Abbildung 33: Verifizierung der Tage und Uhrzeiten von Auftragsrückmeldungen durch Säulendiagramme -----	80
Abbildung 34: Bereinigung der Liegezeit um betriebsfreie Zeit -----	81
Abbildung 35: Segmentierung der Materialflüsse von drei Produktfamilien -----	83
Abbildung 36: Eingabe und Ergebnis der mathematischen Optimierung -----	84
Abbildung 37: Mittlere relative Zielfunktionswerte im Vergleich zu isoliert optimierenden Heuristiken für das gesamte Testset (links) und für alle Testinstanzen mit Clustering-basierter Produktfamilienbildung (rechts) -----	88
Abbildung 38: Grundgerüst des Datenmodells -----	89
Abbildung 39: Datenmodell des Wertstroms zur Kapazitätsdimensionierung -----	90
Abbildung 40: Eingabe und Ergebnis der modellbasierten Kapazitätsdimensionierung	91
Abbildung 41: Datenmodell zur Kapazitätsdimensionierung und EPEI-Auslegung ---	92
Abbildung 42: Eingabe und Ergebnis der modellbasierten EPEI-Auslegung -----	93
Abbildung 43: Datenmodell für die Wertstromdimensionierung -----	93
Abbildung 44: Eingabe und Ergebnis der modellbasierten Bestandsauslegung -----	95
Abbildung 45: Objektdiagramm mit beispielhaften Ausprägungen des Datenmodells -	97
Abbildung 46: Softwareprototyp zur modellbasierten Auslegungsrechnung -----	98
Abbildung 47: Vorgehensmodell zur Integration der Data Analytics-Funktionen in die Wertstrommethode -----	100
Abbildung 48: Einordnung der Unternehmen hinsichtlich ihrer Größe -----	106
Abbildung 49: Verteilung der Befragten nach Branche -----	109
Abbildung 50: Ergebnis (Mittelwerte) der Befragung zur Erfüllung der gestellten Anforderungen -----	110
Abbildung 51: Dendrogramm des Produktfamilien-Clusterings -----	116
Abbildung 52: Gegenüberstellung der manuellen Wertstromaufnahme (links) mit dem durch Process Discovery erzeugten Prozessmodell (rechts) bei Unternehmen 4 (Ausschnitt) -----	118
Abbildung 53: Materialflüsse nach der Anwendung der Pareto-Heuristik auf das End-Segment der Batteriezellenproduktion -----	122
Abbildung 54: Auslastung der Montage-Arbeitsplätze nach Anwendung der Pareto-Heuristik für die Batteriezellenproduktion -----	123
Abbildung 55: Vergleich der initialen Expertenplanung (links) mit der Expertenplanung nach ersten Korrekturen (Mitte) und der Lösung der Pareto-Heuristik (rechts) im Anwendungsfall bei Unternehmen 7 -----	124
Abbildung 56: Gegenüberstellung von Arbeitslast und Kapazität eines Prozesses bei Unternehmen 6 mit dem umgesetzten Softwareprototypen -----	126

Abbildung 57: Standardsymbole für die Wertstrommodellierung -----	151
Abbildung 58: Stabilität der untersuchten Ähnlichkeitsmaße (links) und Clusterverfahren (rechts) für binäre Produkt-Prozess-Matrizen -----	159
Abbildung 59: Stabilität der untersuchten Ähnlichkeitsmaße und Clusterverfahren für metrische Produkt-Arbeitsplatz-Priorisierungsmatrizen -----	159
Abbildung 60: Aggregierte Ergebnisse aller Heuristiken über alle lösbaren Testinstanzen (Mittelwerte für beide Zielfunktionen) -----	163
Abbildung 61: Ergebnisse für alle Testinstanzen mit Cluster-basierter Produktfamilienbildung -----	164

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Verbesserungen durch den Einsatz der Wertstrommethode in der produzierenden Industrie -----	18
Tabelle 2: Aus der Literatur abgeleitete Defizite der Wertstrommethode -----	19
Tabelle 3: Auftreten der identifizierten Data Analytics-Funktionen in der Literatur----	51
Tabelle 4: Erwartete Wirkbeziehung der identifizierten Funktionen auf die Anforderungen -----	55
Tabelle 5: Beispielhafte Auftragsbewegungsdaten -----	58
Tabelle 6: Produkt-Prozess-Matrix -----	59
Tabelle 7: Produkt-Arbeitsplatz-Priorisierungsmatrix -----	60
Tabelle 8: Anwendungsfälle zur Verifikation der Assoziationsanalyse -----	61
Tabelle 9: Geeignete Proximitätsmaße zur Clusteranalyse in Produkt-Prozess-Matrizen -----	62
Tabelle 10: Geeignete Proximitätsmaße zur Clusteranalyse in Produkt-Arbeitsplatz-Priorisierungsmatrizen -----	63
Tabelle 11: Zusammenfassung der Empfehlungen (Quelle: [URNA23]) -----	66
Tabelle 12: Anwendungsfälle zur Verifikation der Clusteranalyse -----	68
Tabelle 13: Event Log für Process Mining -----	70
Tabelle 14: Anwendungsfälle zur Verifikation von Process Discovery -----	74
Tabelle 15: Sortiertes Event Log für modellbasierte Prozessanalyse mittels Process Mining-----	75
Tabelle 16: Anwendungsfälle zur Verifikation der modellbasierten Analyse -----	82
Tabelle 17: Anwendungsfälle zur Verifikation der Pareto-Heuristik zur produktfamilienorientierten Segmentierung -----	88
Tabelle 18: Anwendungsfälle zur Verifikation der modellbasierten Auslegungsrechnung -----	98
Tabelle 19: Charakterisierung der Unternehmen der verwendeten Datensätze -----	106
Tabelle 20: Datensätze und ihre Verwendung in der Entwicklung und Verifikation der identifizierten Data Analytics-Funktionen -----	108
Tabelle 21: Kategorisierung der Data Analytics-Funktionen nach Zielsetzung -----	113
Tabelle 22: Cluster-Zuordnung von Produkten unterschiedlichen Typs nach Ähnlichkeit ihrer Prozessabläufe mittels Average Linkage Clustering und Dice-Koeffizient -----	116
Tabelle 23: Beitrag von Process Discovery zur Vollständigkeit des Prozessmodells -	117
Tabelle 24: Beitrag der modellbasierten Analyse zur umfassenderen Beschreibung des Wertstroms -----	119
Tabelle 25: Reihenfolgebewertung im Forschungsprojekt ArePron -----	119
Tabelle 26: Anwendungskontext und Notwendigkeit für die modellbasierte Auslegungsrechnung -----	128
Tabelle 27: Parameter für die Generierung von Testinstanzen für die Produktfamilienbildung mittels Clusteranalyse -----	154
Tabelle 28: Beschreibung der Clusterverfahren anhand ihrer Distanzdefinition-----	156

Tabelle 29: Untersuchte Ähnlichkeitsmaße in der numerischen Evaluation für binäre Matrizen-----	156
Tabelle 30: Untersuchte Proximitätsmaße in der numerischen Evaluation für metrische Matrizen-----	157
Tabelle 31: Parameter für die Generierung von Testinstanzen für die Segmentierung mittels mathematischer Optimierung -----	160
Tabelle 32: Mittlere <i>PFAP</i> [%] der Pareto-Heuristik auf allen Instanzen in Abhängigkeit des Auslastungsfaktors η -----	163

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Abkürzung	Begriff
acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
ArePron	Agiles ressourceneffizientes Produktionsnetzwerk
Auto-ID	Automatische Identifikation
BDE	Betriebsdatenerfassung
BI	Business Intelligence
CAx	Computer Aided x
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CiP	Center für industrielle Produktivität
ConWIP	Constant work in process
CPS	Cyber-physische Systeme
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRM	Design Research Methodology
EPEI	Every Part Every Interval
ERP	Enterprise Resource Planning
ETA	Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion
FIFO	First-In-First-Out
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
MES	Manufacturing Execution System
MTO	Make to Order
MTS	Make to Stock
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OR	Operations Research
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
QR	Quick Response
RFID	Radio-Frequency Identification
UPGMA	Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean
WIP	Work in progress
WPGMA	Weighted Pair Group Method with Arithmetic Mean
WSD	Wertstromdesign

Symbol	Bezeichnung
a	Anzahl der Prozesse, die von Produkt i und j durchlaufen werden
$A_{p,proc}$	Aggregationsfunktion für Produkt p und Prozess $proc$
$A_{p,ap}^*$	Aggregationsfunktion für Produkt p und Arbeitsplatz ap
$act(e)$	Activity für Ereignis e
AG	Auslastungsgrad
ap	Laufvariable für Arbeitsplätze
AP	Menge aller Arbeitsplätze
$ AP $	Anzahl der Prozesse/Arbeitsplätze
AZ	Verfügbare Arbeitszeit
$AZ_{Schicht,ap}$	Arbeitszeit pro Schicht an Arbeitsplatz ap
b	Anzahl der Prozesse, die von Produkt i , aber nicht von Produkt j durchlaufen werden
B	Bestand
Bed_p	Bedarf von Produkt p
$Bed_{Schicht}$	Bedarf aller Produkte an einer FIFO-Verbindung pro Schicht
$Bed_{Schicht,p}$	Bedarf pro Schicht für Produkt p
$Bed_{Woche,p}$	Bedarf pro Woche für Produkt p
BZ	Bearbeitungszeit
$\emptyset BZ_p$	Mittlere Bearbeitungszeit von Produkt p
$BZ_{p,ap}$	Bearbeitungszeit für Produkt p an Arbeitsplatz ap
c	Anzahl der Prozesse, die von Produkt j , aber nicht von Produkt i durchlaufen werden
$c(e)$	Case ID für Ereignis e
$conf(X \rightarrow Y)$	Konfidenz der Assoziationsregel $(X \rightarrow Y)$
D	Datensatz
DLZ	Durchlaufzeit
δ_{AP}	Spannweite der Anzahl an Produktzuordnungen
δ_{BZ}	Streuung der Bearbeitungszeiten
e	Ereignis in einem Event Log
$EPEI_{ap}$	EPEI an Arbeitsplatz ap
$EPEI_{ap,min}$	Minimaler EPEI an Arbeitsplatz ap
η	Mittlere Auslastung der Gesamtkapazität
$FiFoB$	Bestand einer FIFO-Verbindung
FT	Anzahl der Fabrikstage
i	Laufvariable für Produkte
I	Menge von Elementen in einem Cluster
IM	Itemmenge (Gesamtheit)

Symbol	Bezeichnung
j	Laufvariable für Produkte
J	Menge von Elementen in einem Cluster
k	Clusteranzahl
K	Menge von Elementen in einem Cluster
$\emptyset K$	Mittlere Kapazität der Arbeitsplätze
K_{ap}	Kapazität an Arbeitsplatz ap
KT	Kundentakt
$Last_{ap}$	Gesamte Arbeitslast an Arbeitsplatz ap
LB	Untere Schranke für die Zielgröße $PFAP_{total}$
$LG_{p,ap}$	Losgröße des Produkts p an Arbeitsplatz ap
$LG_{p,ap,min}$	Mindestlosgröße des Produkts p an Arbeitsplatz ap
LZ	Liegezeit
LZ_{max}	Maximale Liegezeit
LZ_{min}	Minimale Liegezeit
m	Letzter Index einer Reihe von Laufvariablen
n	Letzter Index einer Reihe von Laufvariablen
n_I	Anzahl der Elemente in Cluster I
n_J	Anzahl der Elemente in Cluster J
n_K	Anzahl der Elemente in Cluster K
$\#Nacharbeit$	Anzahl der Nacharbeitsschleifen
NQ	Nacharbeitsquote
p	Laufvariable für Produkte
P	Menge aller Produkte
$ P $	Anzahl der Produkte
$ \hat{P} $	Anteil der Produkt-Duplikate
PB_p	Pufferbestand für Produkt p
PD_{ij}	Proximitätsmaß nach Dice
pf	Laufvariable für Produktfamilien
PF	Menge aller Produktfamilien
$ PF $	Anzahl der Produktfamilien
$PFAP$ [%]	Erreichter Zielfunktionswert für $PFAP_{total}$ in Relation zur unteren Schranke LB
$PFAP_{pf,ap}$	Binärvariable zur Angabe der Produktfamilien-Arbeitsplatz-Zuordnung für Produktfamilie pf und Arbeitsplatz ap
$PFAP_{total}$	Zu minimierende Zielfunktion: Gesamtanzahl von Produktfamilien-Arbeitsplatz-Zuordnungen
PJ_{ij}	Proximitätsmaß nach Jaccard zum Vergleich der Elemente i und j

Symbol	Bezeichnung
PK_{ij}	Kosinus-Proximitätsmaß zum Vergleich der Elemente i und j
PM	Prozessmenge
PP_{ij}	Pearson-Korrelation zum Vergleich der Elemente i und j
PPM	Produkt-Prozess-Matrix
PR	Produktivitätsrate
$Prio$ [%]	Erreichter Zielfunktionswert für $Prio_{total}$ in Relation zur oberen Schranke UB
$Prio_{p,ap}$	Zuordnungs-Priorisierung für Produkt p an Arbeitsplatz ap
$Prio_{p,max}$	Höchster Priorisierungswert für Produkt p
$\emptyset Prio_{pf,ap}$	Mittlere Priorisierung der Produkte in Produktfamilie pf für Arbeitsplatz ap
$Prio_{total}$	Zu maximierende Zielfunktion: Summe der Produkt-Arbeitsplatz-Priorisierungswerte aller zugeordneten Produkte
$proc$	Laufvariable für Prozesse
PS_{ij}	Proximitätsmaß nach Sokal & Sneath
PZ	Prozesszeit
ρ	Dichte der Matrix
R	Rauschen
$\#Res$	Anzahl paralleler Ressourcen
RFE	Reihenfolgeeinhaltung
RV_i	Reihenfolgeverletzung
$RW_{p,max}$	Maximale Bestandsreichweite für Produkt p
$RZ_{p,ap}$	Rüstzeit für Produkt p an Arbeitsplatz ap
$\Delta Schicht$	Überbrückungszeit zur Entkopplung unterschiedlicher Schichtmodelle
$\#Schicht_{Woche,ap}$	Anzahl der Schichten pro Woche an Arbeitsplatz ap
SB	Sicherheitsbestand
SB_p	Sicherheitsbestand für Produkt p
SF	Sicherheitsfaktor
$SMB_{p,max}$	Supermarkt-Maximalbestand für Produkt p
$Stck$	Stückzahl
$sup(X)$	Support von Item X
$sup(X \rightarrow Y)$	Support der Assoziationsregel ($X \rightarrow Y$)
SZ	Synchronisationszeit
T	Transaktion
$t_{end}(e)$	End-Zeitstempel für Ereignis e
$t_{start}(e)$	Start-Zeitstempel für Ereignis e
$u_{i,ap}$	Priorisierungsausprägung von Produkt i für Arbeitsplatz ap

Symbol	Bezeichnung
UB	Obere Schranke für die Zielgröße $Prio_{total}$
UB_p	Umlaufbestand für Produkt p
$\ddot{U}BZ$	Überbrückungszeiten
V_{ap}	Verfügbarkeit des Arbeitsplatzes ap
WBZ_p	Wiederbeschaffungszeit für Produkt p
X, Y	Itemmengen (in IM)
\bar{x}_i	Durchschnitt der Priorisierungsausprägungen des Produkts i für alle Arbeitsplätze
$x_{p,ap}$	Entscheidungsvariable zur Zuordnung von Produkt p zu Arbeitsplatz ap
y_p	Binärer Parameter zur Angabe, ob ein Prozess von Produkt p durchlaufen wird
$z_{p,pf}$	Binärer Parameter zur Angabe der Zugehörigkeit von Produkt p zu Produktfamilie pf
ZZ_{Brutto}	Brutto-Zykluszeit
ZZ_{Netto}	Netto-Zykluszeit