

Produktion und Logistik

RESEARCH

Christoph Müller

# Zur redundanten Konfiguration automatisierter Fließproduktionssysteme



Springer Gabler

---

# Produktion und Logistik

## **Reihe herausgegeben von**

Bernhard Fleischmann, Augsburg, Deutschland  
Martin Grunow, München, Deutschland  
Stefan Helber, Hannover, Deutschland  
Karl Inderfurth, Magdeburg, Deutschland  
Herbert Kopfer, Bremen, Deutschland  
Herbert Meyr, Stuttgart, Deutschland  
Thomas S. Spengler, Braunschweig, Deutschland  
Hartmut Stadtler, Hamburg, Deutschland  
Horst Tempelmeier, Köln, Deutschland  
Gerhard Wäscher, Magdeburg, Deutschland  
Christian Bierwirth, Halle, Deutschland  
Katja Schimmelpfeng, Stuttgart, Deutschland  
Moritz Fleischmann, Mannheim, Deutschland  
Hans-Otto Günther, Berlin, Deutschland

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

**Kontakt**

Professor Dr. Thomas S. Spengler  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Automobilwirtschaft  
und Industrielle Produktion  
Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/12449>

---

Christoph Müller

# Zur redundanten Konfiguration automatisierter Fließproduktionssysteme

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Thomas S. Spengler



Springer Gabler

Christoph Müller  
Braunschweig, Deutschland

Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2018

Produktion und Logistik  
ISBN 978-3-658-25335-6      ISBN 978-3-658-25336-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25336-3>

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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 geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Gabler 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

Automatisierte Fließproduktionssysteme zur Großserien- und Massenproduktion haben in den zurückliegenden Jahren zu starkem Wachstum beim Absatz von Industrierobotern geführt. Hohen Investitionen stehen gleichermaßen hohe Erwartungen an hieraus resultierende Wettbewerbsvorteile gegenüber, die besonders bei hoher und gleichmäßiger Auslastung und überschaubarer Produktvielfalt erzielbar sind. Auch werden hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit der Roboter gestellt, die jedoch aufgrund zufällig auftretender Störungen eine entscheidungsrelevante Planungsgröße bei der Systemkonfiguration darstellt. Aufgrund der Verkettung einzelner Arbeitsstationen werden im Rahmen der Konfigurationsplanung zu deren Entkopplung in der Regel Puffer zwischengeschaltet, die zu einer höheren Leistungsfähigkeit des Systems führen. Diese ziehen jedoch weitere Investitionen, erhöhte Durchlaufzeiten und Bestände und damit zusätzliche entscheidungsrelevante Kosten nach sich.

Die Nachteile von Puffern können alternativ oder komplementär durch eine redundante Konfiguration automatisierter Fließproduktionssysteme reduziert werden, sofern im Falle einer Störung eine Verlagerung von Arbeitsgängen auf nachgelagerte Arbeitsstationen möglich ist. Dies erfordert allerdings eine informationstechnische Vernetzung des Systems, wie es in derzeit diskutierten Konzepten zur Digitalisierung der Produktion im Sinne einer „intelligenten“ Fabrik möglich erscheint. Zur Bestimmung einer optimalen redundanten Konfiguration ist eine Vielzahl interdependenter Systemparameter festzulegen. Diese betreffen zum Einen die Aufteilung von Arbeitsschritten auf die Arbeitsstationen, zum Zweiten die Zuordnung von Robotern und Betriebsmitteln zu den Stationen und zum Dritten im Falle auftretender Störungen mögliche Reallokationen von Arbeitsschritten auf nachgelagerte Stationen. Eine besondere Erschwernis bei der Formulierung und Lösung des zugehörigen Optimierungsproblems liegt hierbei darin, dass aufgrund der stochastisch auftretenden Störungen die Produktionsrate, die im Rahmen einer vergleichenden Leistungsanalyse herangezogen werden könnte, nicht direkt, sondern nur mittels analytischer oder simulationsbasierter Verfahren ermittelt werden kann. Einschlägige Modellkonzepte zur Bestimmung optimaler redundanter Konfigurationen liegen bisher weder in der Literatur noch in der praktischen Anwendung vor.

Aus diesem Grund setzt sich Herr Müller im Rahmen seiner Dissertation das Ziel, einen quantitativen Planungsansatz zu entwickeln und im Rahmen einer ausführlichen numerischen Studie zu validieren. Aus den erzielten Ergebnissen möchte er Handlungsempfehlungen an industrielle Entscheidungsträger zur Gestaltung automatisierter Fließproduktionssysteme ableiten und gleichermaßen einen neuen Akzent in der umfangreichen Literatur zu diesem Thema setzen. Um diese Zielsetzungen zu erreichen, erläutert Herr Müller zunächst die Rahmenbedingungen der Konfiguration automatisierter Fließproduktionssysteme, stellt das Konzept der redundanten Konfiguration vor und leitet Anforderungen an einen quantitativen Planungsansatz ab. Hierauf aufbauend werden im Rahmen einer ausführlichen Literaturanalyse bestehende Modelle zur Konfigurationsplanung automatisierter Fließproduktionssysteme hinsichtlich der zuvor herausgearbeiteten Anforderungen gewürdigt. Da keines der diskutierten Modelle die Anforderungen zur Gänze erfüllt, entwickelt Herr Müller ein neuartiges Modell und in der Folge ein effizientes Lösungsverfahren zur optimalen Planung redundanter Konfigurationen. Das implementierte Lösungsverfahren wird zur numerischen Evaluation von Lösungszeiten und -güte zunächst auf zufällig erzeugte Testinstanzen angewendet. Darauf aufbauend erfolgt eine techno-ökonomische Bewertung redundanter Konfigurationen und es werden Handlungsempfehlungen zur Gestaltung automatisierter Fließproduktionssysteme abgeleitet. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Würdigung und einer Zusammenfassung.

Herr Müller deckt mit seiner Dissertation eine sowohl unter methodischen als auch praktischen Gesichtspunkten äußerst aktuelle und anspruchsvolle Thematik ab, und dies auf höchstem Niveau. Dies gilt gleichermaßen für die gewählte Zielsetzung, die gründliche und detaillierte Literaturanalyse, die umfangreichen mathematischen Modellierungen, die Entwicklung des Genetischen Lösungsalgorithmus, die ausführliche numerische Evaluation sowie die durchgeführte techno-ökonomische Bewertung redundanter Konfigurationen im Kontext der Konfigurationsplanung automatisierter Fließproduktionssysteme. Mit der vorgelegten Dissertation ist es Herrn Müller eindrucksvoll gelungen, den Stand der Wissenschaft und Praxis auf dem Gebiet der Konfigurationsplanung automatisierter Fließproduktionssysteme und vor dem Hintergrund der durch die Digitalisierung zukünftig entstehenden Potenziale einen wesentlichen Schritt voranzubringen.

Univ.-Prof. Dr. Thomas Stefan Spengler

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion an der Technischen Universität Braunschweig. Diese Zeit wurde unter anderem durch spannende Forschungsprojekte, inspirierende Diskussionen und neue Freundschaften, aber auch berufliche und persönliche Herausforderungen und das Kennenlernen der eigenen Grenzen geprägt. Ich möchte an dieser Stelle allen Personen herzlich danken, die mich in dieser Zeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Thomas Spengler, der mich bei der Erarbeitung dieser Dissertation gefordert und gefördert und so entscheidend zu ihrem Gelingen beigetragen hat. Neben den fachlichen Hinweisen und Anregungen danke ich ihm insbesondere für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir übertragene Verantwortung, seine persönliche Unterstützung sowie sein Verständnis für meine Entscheidungen. Herrn Professor Dr. Dirk Mattfeld danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und sein Interesse an der Arbeit, das er in den vergangenen Jahren auf Tagungen und Workshops stets zum Ausdruck gebracht hat. Herrn PD Dr. Karsten Kieckhäfer danke ich von ganzem Herzen, nicht nur für seine Bereitschaft zur Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission, sondern vor allem für die lehrreiche Zeit, in der wir gemeinsam diskutiert und geschrieben haben und darüber Freunde geworden sind.

Ein herzlicher Dank gilt zudem meinen Kollegen am Institut für die angenehme Zusammenarbeit, konstruktive Diskussionen und die gemeinsam verbrachte Freizeit. Insbesondere meinen ehemaligen Bürokollegen Maren Gäde, Christoph Johannes, Christian Thies und Christian Weckenborg sowie meinen ehemaligen Teamleitern Martin Grunewald und Matthias Wichmann danke ich für die gemeinsame Zeit und Unterstützung. Dank gebührt auch den weiteren ehemaligen Kollegen Anna Breitenstein, Amjed Essakly, Isa von Hoesslin, Claas Hoyer, Christoph Hüls, Andreas Matzke, Christoph Meyer, Patrick Oetjegerdes, Karen Puttkammer, Felix Saucke, Ina Schlei-Peters, Kerstin Schmidt, Natalia Stepien, Thomas Volling, Katharina Wachter und Sönke Wiczorrek. Birgit Haupt danke ich für die Unterstützung bei allen administrativen Aufgaben.



Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für ihre Unterstützung und den Rückhalt in den vergangenen Jahren. Dankbar bin ich meinen Eltern Christiane und Matthias, dass sie mir alle Freiheiten gewährt und mich stets unterstützt haben. Meiner Schwester Katharina, ihrem Partner Holger und meinen beiden Neffen danke ich für die willkommene Zerstreung und einige Erkenntnisse über die richtigen Lebensprioritäten. Gleiches gilt für Heike und Theo sowie Markus und Christoph mit ihren Partnerinnen. Für die notwendige Ablenkung vom Promotionsalltag und unzählige unvergessliche Momente haben insbesondere meine Freunde aus dem Studium gesorgt. Hierfür bedanke ich mich bei Rafael Brünecke, Paul Diekhoff, Axel Fischer, Hendrik-Jörn Günther, Felix Hellwig, Yuki Kurz, Christoph Schütze, Lukas Strob und Jonas Weiss.

Zuletzt und zuerst danke ich meiner geliebten Silvia, die mich auf dem Weg zur Promotion durch alle Höhen und Tiefen begleitet hat, für ihre Zuneigung, für ihre Geduld und für ihre großartige Unterstützung.

Christoph Müller

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XV
Algorithmenverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXV
Einheitenverzeichnis	XXVII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	5
<b>2 Rahmenbedingungen der Konfiguration automatisierter Fließproduktionssysteme</b>	<b>9</b>
2.1 Definition und Abgrenzung automatisierter Fließproduktionssysteme . . . . .	9
2.2 Eigenschaften automatisierter Fließproduktionssysteme	13
2.2.1 Eigenschaften der Arbeitsstationen . . . . .	14
2.2.2 Eigenschaften des Materialflusssystems . . . . .	18
2.2.3 Eigenschaften des Informationssystems . . . . .	20
2.3 Konfigurationsplanung automatisierter Fließproduktionssysteme . . . . .	21
2.3.1 Einordnung in das Produktionsmanagement . . . . .	21
2.3.2 Konfigurationsentscheidungen . . . . .	27
2.3.3 Ziele der Konfigurationsplanung . . . . .	30
2.4 Redundante Konfiguration als Konzept zum Umgang mit Störungen . . . . .	33
2.5 Ableitung von Anforderungen an die Planung redundanter Konfigurationen . . . . .	37

<b>3</b>	<b>Ansätze zur Konfigurationsplanung automatisierter Fließproduktionssysteme</b>	<b>39</b>
3.1	Ansätze zur Fließbandabstimmung . . . . .	39
3.1.1	Ansätze zur Minimierung der Gesamtinvestition . . . . .	40
3.1.2	Ansätze zur Minimierung der Taktzeit . . . . .	43
3.1.3	Multikriterielle Ansätze . . . . .	47
3.2	Ansätze zur Pufferplanung . . . . .	51
3.2.1	Ansätze zur Leistungsbewertung von Konfigurationsalternativen . . . . .	52
3.2.2	Ansätze zur Generierung von Konfigurationsalternativen . . . . .	60
3.3	Integrierte Planungsansätze . . . . .	64
3.4	Ergebnis der Literaturanalyse . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Entwicklung eines Modells zur redundanten Konfiguration</b>	<b>69</b>
4.1	Modellkonzeption . . . . .	69
4.2	Annahmen . . . . .	74
4.3	Notation . . . . .	77
4.4	Modellierung . . . . .	78
4.5	Klassifikation . . . . .	83
4.6	Ableitung von Anforderungen an ein Lösungsverfahren . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Lösungsverfahren zum Problem der redundanten Konfiguration</b>	<b>89</b>
5.1	Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens . . . . .	89
5.2	Entwicklung eines Genetischen Algorithmus . . . . .	93
5.2.1	Übersicht des Lösungsverfahrens . . . . .	93
5.2.2	Repräsentation der Lösungskandidaten . . . . .	96
5.2.3	Erzeugung einer Population . . . . .	98
5.2.4	Erzeugung neuer Individuen . . . . .	101
5.2.5	Zuordnung von Betriebsmitteln . . . . .	102
5.2.6	Bestimmung der Ausweichstationen . . . . .	103
5.2.7	Bestimmung der Fitness eines Individuums . . . . .	106
5.3	Referenzwerte zur Bewertung des Lösungsverfahrens . . . . .	111
5.4	Validierung des Lösungsverfahrens . . . . .	113
5.5	Fazit . . . . .	116

<b>6</b>	<b>Numerische Analyse und techno-ökonomische Bewertung redundanter Konfigurationen</b>	<b>119</b>
6.1	Erzeugung von Testinstanzen . . . . .	119
6.2	Evaluation des Genetischen Algorithmus . . . . .	122
6.2.1	Festlegung der Parameter des Genetischen Algorithmus . . . . .	123
6.2.2	Testdesign . . . . .	126
6.2.3	Vergleich zu Konfigurationen ohne Redundanz	128
6.2.4	Vergleich zu Konfigurationen mit Redundanz .	130
6.2.5	Evaluation der Lösungszeiten . . . . .	133
6.3	Techno-ökonomische Bewertung redundanter Konfigurationen . . . . .	135
6.3.1	Untersuchte Handlungsalternativen und Anwendungsszenarien . . . . .	135
6.3.2	Vorgehen zur ökonomischen Bewertung . . . . .	137
6.3.3	Bestimmung des Mengengerüsts . . . . .	142
6.3.4	Bestimmung des Wertgerüsts . . . . .	143
6.3.5	Ergebnisse der Bewertung . . . . .	145
6.4	Fazit und Ableitung von Handlungsempfehlungen . . .	147
<b>7</b>	<b>Kritische Würdigung und Ausblick</b>	<b>149</b>
7.1	Würdigung des Konzeptes der redundanten Konfiguration und Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf . . . . .	149
7.2	Würdigung des entwickelten Ansatzes sowie der erzielten Erkenntnisse und Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf	151
7.3	Handlungsempfehlungen zur Implementierung des Planungsansatzes in der Praxis . . . . .	157
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>159</b>
<b>A</b>	<b>Optimierungsmodelle zur Bestimmung redundanter Konfigurationen</b>	<b>163</b>
<b>B</b>	<b>Optimierungsmodell zur Bestimmung einer Konfiguration mit minimaler Taktzeit</b>	<b>167</b>
<b>C</b>	<b>Boxplots der Ergebnisse der numerischen Analyse</b>	<b>169</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Weltweiter Absatz und Bestand von Industrierobotern . . .	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	8
2.1	Organisationstypen der Produktion . . . . .	11
2.2	Subsysteme automatisierter Fließproduktionssysteme . . .	14
2.3	Automatisierungspyramide der industriellen Produktion .	20
2.4	Einordnung der Konfigurationsplanung . . . . .	22
3.1	Grundsätzliche Vorgehensweise iterativer Verfahren zur Pufferdi- mensionierung und -allokation . . . . .	62
4.1	Prozess der Modellbildung . . . . .	70
4.2	Übersicht des konzeptionellen Modells . . . . .	74
5.1	Lösungskandidat für das Problem der redundanten Konfigurati- on . . . . .	97
5.2	Veranschaulichung unzulässiger Verschiebungen eines Arbeitsele- ments . . . . .	100
5.3	Übergangsgraph des Markow-Prozesses . . . . .	111
5.4	Abweichungen der analytisch ermittelten Produktionsraten von den Simulationsergebnissen . . . . .	116
6.1	Ergebnisse der Parameterstudie . . . . .	124
6.2	Vorgehen zur Berechnung der Referenzwerte . . . . .	127
6.3	Produktivitätssteigerung im Vergleich zu Konfigurationen ohne Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	128
6.4	Produktivitätssteigerung im Vergleich zu Konfigurationen ohne Redundanz für große Instanzen . . . . .	129

6.5	Produktivitätssteigerung im Vergleich zu Konfigurationen mit einfacher Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	130
6.6	Produktivitätssteigerung im Vergleich zu Konfigurationen mit einfacher Redundanz für große Instanzen . . . . .	132
6.7	Produktivitätssteigerung im Vergleich zu Konfigurationen mit maximaler Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	132
6.8	Produktivitätssteigerung im Vergleich zu Konfigurationen mit balancierter Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	133
6.9	Lösungszeiten zur Bestimmung von Konfigurationen mit und ohne Redundanz für kleine und große Instanzen . . . . .	134
6.10	Vorgehen zur ökonomischen Bewertung der Handlungsoptionen . . . . .	138
6.11	Jährliche Betriebskosten der Handlungsalternativen . . . . .	146
C.1	Boxplot der Produktivitätssteigerungen im Vergleich zu Konfigurationen ohne Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	169
C.2	Boxplot der Produktivitätssteigerungen im Vergleich zu Konfigurationen ohne Redundanz für große Instanzen . . . . .	169
C.3	Boxplot der Produktivitätssteigerungen im Vergleich zu Konfigurationen mit einfacher Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	170
C.4	Boxplot der Produktivitätssteigerungen im Vergleich zu Konfigurationen mit einfacher Redundanz für große Instanzen . . . . .	170
C.5	Boxplot der Produktivitätssteigerungen im Vergleich zu Konfigurationen mit maximaler Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	171
C.6	Boxplot der Produktivitätssteigerungen im Vergleich zu Konfigurationen mit balancierter Redundanz für kleine Instanzen . . . . .	171

# Tabellenverzeichnis

3.1	Erfüllung der Anforderungen durch Ansätze zur Minimierung der Gesamtinvestition . . . . .	43
3.2	Erfüllung der Anforderungen durch Ansätze zur Minimierung der Taktzeit . . . . .	46
3.3	Erfüllung der Anforderungen durch multikriterielle Ansätze	51
3.4	Erfüllung der Anforderungen durch Ansätze zur Pufferplanung	64
3.5	Erfüllung der Anforderungen durch integrierte Ansätze . .	68
4.1	Charakteristika des Formalmodells . . . . .	86
5.1	Bearbeitungsraten der Stationen eines Zehn-Stationen-Systems bei unterschiedlich starken Schwankungen der Stationszeiten	114
5.2	Ausprägung der Redundanz für untersuchte Testinstanzen	115
6.1	Variierte Parameter der numerischen Analyse . . . . .	122
6.2	Variierte Parameter des Genetischen Algorithmus . . . . .	123
6.3	Verwendete Parameter des Genetischen Algorithmus . . .	126
6.4	Zuschlagsfaktoren zur Investitionsschätzung . . . . .	144
6.5	Zuschlagsfaktoren zur Schätzung investitionsproportionaler Kostenarten . . . . .	145
6.6	Mengengerüste der Handlungsalternativen . . . . .	147

# Algorithmenverzeichnis

5.1	Ablauf des Genetischen Algorithmus . . . . .	95
5.2	Prozedur zur Reparatur von Individuen . . . . .	100
5.3	Prozedur zur Kreuzung von Individuen . . . . .	101
5.4	Prozedur zur Zuordnung von Betriebsmitteln . . . . .	103



# Symbolverzeichnis

$a_f$	Zuschlagsfaktor für Kapitalbedarfsposition $f$
$a_{ik}$	Binäre Hilfsvariable, die angibt, ob Arbeitselement $i$ an Station $k$ durchgeführt werden kann
$A^{Arbeitsstage}$	Anzahl der Arbeitstage pro Jahr
$A^{Schichten}$	Anzahl der Schichten pro Tag
$b$	Bestes gefundenes Individuum
$b_s$	Binäre Hilfsvariable, die angibt, ob in Zustand $s$ alle Arbeitselemente der gestörten Station realloziert werden können
$c_{ir}$	Spezialisierung von Betriebsmitteltyp $r$ zur Durchführung von Arbeitselement $i$
$C$	Taktzeit
$C^*$	Beste gefundene Taktzeit
$C^{LB}$	Untere Schranke der Taktzeit
$C^{max}$	Taktzeitvorgabe
$CM_{ir}$	Matrix der Betriebsmittelfähigkeiten, die angibt, ob Arbeitselement $i$ von Betriebsmitteltyp $r$ durchgeführt werden kann
$C_\iota$	Taktzeit von Individuum $\iota$
$d$	Annuitätenfaktor
$d_g$	Zuschlagsfaktor zur Berücksichtigung investitionsproportionaler Kostenarten
$e_r$	Arbeitsgeschwindigkeit von Betriebsmitteltyp $r$
$I$	Menge aller Arbeitselemente (Index $h, i$ )

---

$I_s^D$	Menge aller Arbeitselemente, die in Zustand $s$ einer gestörten Station zugeordnet sind
$I_s^U$	Menge aller Arbeitselemente, die in Zustand $s$ einer betriebsbereiten Station zugeordnet sind
$Invest^{Basis}$	Basisinvestition zur Realisierung eines Fließproduktionssystems
$Invest^{Gesamt}$	Gesamtinvestition zur Realisierung eines Fließproduktionssystems
$IP_i$	Menge aller direkten Vorgänger von Arbeitselement $i$
$IP_i^D$	Menge aller direkten Vorgänger von Arbeitselement $i$ , die gestörten Stationen zugeordnet sind
$IS_i$	Menge aller direkten Nachfolger von Arbeitselement $i$
$IS_i^U$	Menge aller direkten Nachfolger von Arbeitselement $i$ , die betriebsbereiten Stationen zugeordnet sind
$K$	Menge aller Stationen (Index $j, k, l$ )
$K^\emptyset$	Menge aller Stationen, deren Arbeitselemente im Fall einer Störung nicht realloziert werden können
$K^D$	Menge aller Stationen, die gestört sind
$K_s^D$	Menge aller Stationen, die in Zustand $s$ gestört sind
$K^U$	Menge aller Stationen, die betriebsbereit sind
$K_s^U$	Menge aller Stationen, die in Zustand $s$ betriebsbereit sind
$Kosten^{Gesamt}$	Jährliche Betriebskosten des Fließproduktionssystems
$Kosten^{Inv.}$	Investitionsabhängige Kosten
$Kosten^{Puffer}$	Kosten für den Betrieb von Puffern
$L$	Betriebskostensatz für Puffer
$M$	Hinreichend große Zahl
$MTTF_r$	Mittlere störfreie Laufzeit von Betriebsmitteltyp $r$

---

$MTTR_r$	Mittlere Reparaturzeit von Betriebsmitteltyp $r$
$N$	Anzahl an installierten Puffern
$n$	Zählvariable
$\mathbf{p}$	Vektor der Ausfallraten
$p_k$	Ausfallrate von Station $k$
$P$	Population
$PG$	Populationsgröße
$PR$	Produktionsrate
$PR^w$	Schlechteste bislang gefundene Produktionsrate
$PR_\iota$	Produktionsrate von Individuum $\iota$
$q_{su}$	Übergangsrate von Zustand $s$ in Zustand $u$
$Q$	Matrix der Übergangsraten
$\mathbf{r}$	Vektor der Reparaturraten
$r_k$	Reparaturrate von Station $k$
$r^*$	Bester Betriebsmitteltyp
$rand^{unif}$	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen null und eins
$R$	Menge aller Betriebsmittel (Index $r$ )
$S$	Menge aller Systemzustände (Index $s, u$ )
$S^D$	Menge aller Systemzustände, in denen jeweils eine Station gestört ist
$S^U$	Menge aller Systemzustände, in denen alle Stationen betriebsbereit sind
$t_i$	Prozesszeit zur Durchführung von Arbeitselement $i$
$t_{ir}$	Prozesszeit zur Durchführung von Arbeitselement $i$ mit Betriebsmitteltyp $r$
$T$	Nutzungsdauer des Fließproduktionssystems

---

$v$	Maximale Abweichung der Stationszeiten von der mittleren Stationszeit über alle Stationen
$w$	Schlechtestes gefundenes Individuum
$x_{ikr}$	Binäre Zuordnungsvariable, die angibt, ob Arbeitselement $i$ an Station $k$ mit Betriebsmitteltyp $r$ durchgeführt wird
$y_{kr}$	Binäre Zuordnungsvariable, die angibt, ob Betriebsmitteltyp $r$ Station $k$ zugeordnet wird
$z_{ik}$	Binäre Zuordnungsvariable, die angibt, ob Arbeitselement $i$ im Fall einer Störung an Station $k$ durchgeführt wird
$z_{ikr}$	Binäre Zuordnungsvariable, die angibt, ob Arbeitselement $i$ im Fall einer Störung an Station $k$ mit Betriebsmitteltyp $r$ durchgeführt wird
$Z$	Kalkulatorischer Zinssatz
$ZA_{ik}$	Zuordnung von Arbeitselementen $i$ zu Stationen $k$
$ZR_{kr}$	Zuordnung von Betriebsmitteln $r$ zu Stationen $k$
$\alpha$	Liste aller Arbeitselemente
$\beta$	Liste der Stationsgrenzen
$\gamma$	Liste der Ausweichstationen
$\Gamma$	Angestrebte Anzahl an Stationen, die ein Arbeitselement durchführen können
$\delta$	Liste der Betriebsmitteltypen
$\epsilon$	Max. zulässiger Abweichung von bester bislang gefundener Taktzeit
$\iota$	Individuum
$\mu_s$	Bearbeitungsrate des Systems in Zustand $s$
$\mu_{ks}$	Bearbeitungsrate von Station $k$ in Zustand $s$
$\pi_s$	Stationäre Zustandswahrscheinlichkeit von Zustand $s$
$\pi$	Vektor der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten

---

$\rho^M$	Mutationswahrscheinlichkeit
$\sigma(t)$	Vektor zur Beschreibung des Zustands des Systems zum Zeitpunkt $t$
$\tau$	Vektor der Stationszeiten
$\tau_k$	Stationszeit von Station $k$
$\tau_{ks}$	Stationszeit von Station $k$ in Zustand $s$
$\tau_s^{max}$	Maximale Stationszeit in Zustand $s$