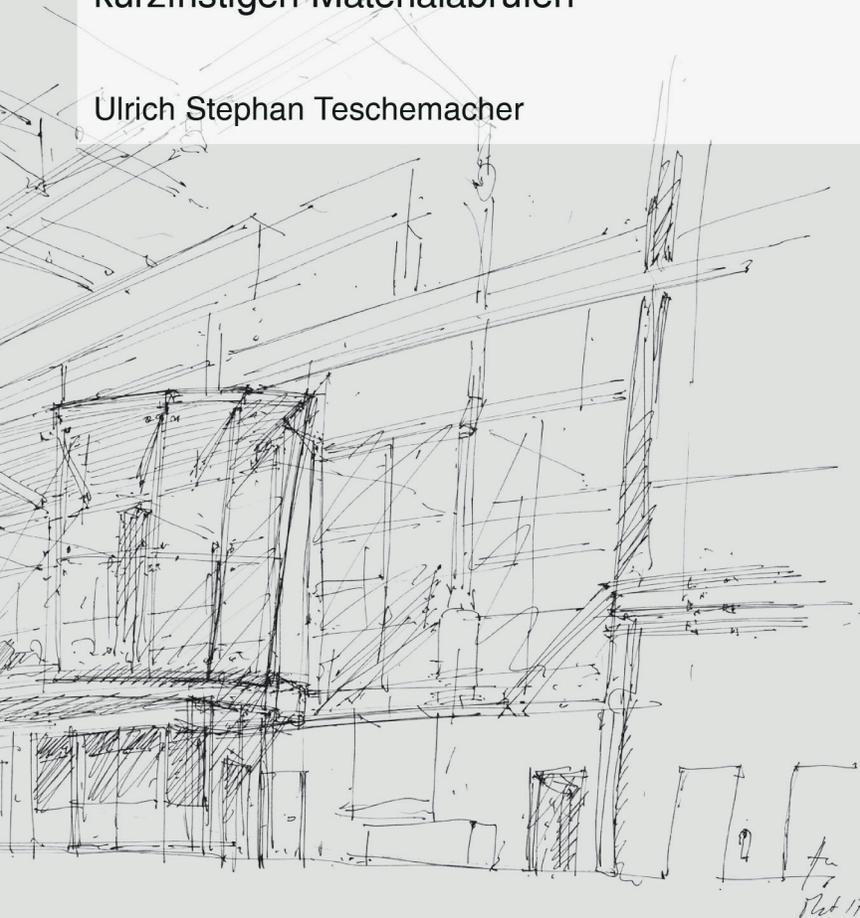


Dynamische Routenzugoptimierung bei kurzfristigen Materialabrufen

Ulrich Stephan Teschemacher



Ulrich Teschemacher

**Dynamische Routenzugoptimierung bei
kurzfristigen Materialabrufen**

utzverlag · München 2023

Forschungsberichte iw
Band 382

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7739-9 Version: 1 vom 10.02.2023
Copyright© utzverlag 2023

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4992-1
Copyright© utzverlag 2022

Ulrich Teschemacher

**Dynamische Routenzugoptimierung bei
kurzfristigen Materialabrufen**



Forschungsberichte iwb

Band 382

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2019

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.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2022

ISBN 978-3-8316-4992-1

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwB ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen, Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwB. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den iwB Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des iwB veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh für ihre stets großzügige Unterstützung und wohlwollende Förderung im Rahmen meiner Forschungstätigkeit. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, für die Übernahme des Kofeferats sowie die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit.

Der für mich entscheidende Erfolgsfaktor bei der Erstellung meiner Dissertation waren die zahlreichen Diskussionen in fachlichen und persönlichen Belangen mit wohlwollenden und erfahrenen Kollegen. Besonders bedanken möchte ich mich in diesem Rahmen bei Tobias Steinhäuser, Michael Niehues, Benedikt Sager, Cosima Stocker, Sebastian Schindler und Jan-Fabian Meis, die mir bei zahlreichen Fragestellungen mit Rat und Tat zur Seite standen und von denen ich viel für mich lernen konnte. Den vier Erstgenannten danke ich außerdem für die gründliche Durchsicht meiner Dissertation und die zahlreichen konstruktiven Anmerkungen, die meine Arbeit erheblich vorangebracht haben. Auch allen von mir im Rahmen meiner Promotionszeit betreuten Studierenden bin für die wertvollen fachlichen Beiträge zu meiner Dissertation zu großem Dank verpflichtet.

Des weiteren danke ich den hier nicht namentlich genannten Experten aus der Industrie, die es mir ermöglicht haben, meine Forschungsergebnisse in der Praxis zu evaluieren. Zusätzlich standen sie mir mit fundiertem und umfangreichem praktischen Expertenwissen für die Absicherung der Ergebnisse zur Seite.

Mein Weg und damit letztendlich die vorliegende Arbeit wäre ohne meine Familie und meine Freunde nicht möglich gewesen. Insbesondere meinen Eltern Lilli und Peter danke ich für die immerwährende Unterstützung bei all meinen Vorhaben, womit sie mir letztendlich die Grundlage für das Promotionsvorhaben geschafft

haben. Auch meinen beiden Geschwistern Sonja und Tobias möchte ich in diesem Rahmen für die viele schöne gemeinsame Zeit danken und wünsche ihnen viel Erfolg für die eigenen Promotionsvorhaben.

Liebe Cosima, Du hast mich durch zahlreiche fachliche Diskussionen an vielen Stellen vorangebracht und auch durch die besonders genaue Durchsicht der Dissertation nachhaltig zur Qualität meiner Arbeit beigetragen. Besonders wichtig war für mich jedoch deine unerschütterliche positive Grundhaltung und die emotionale Unterstützung. Eine Doktorarbeit lässt sich ohne die Unterstützung und Rücksichtnahme durch die Partnerin nicht schreiben – für deinen Beitrag und deine Hilfe möchte ich mich daher ganz besonders bedanken. Ich wünsche dir viel Erfolg bei deiner Doktorarbeit und freue mich auf eine gemeinsame Zukunft.

München, im Juli 2019

Ulrich Teschemacher

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	IX
Verzeichnis der Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs	8
1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung	9
1.6 Methodischer Rahmen	12
1.7 Aufbau der Arbeit	14
2 Grundlagen	17
2.1 Innerbetriebliche Logistik	17
2.1.1 Aufgabenbereiche und Zielsetzung	17
2.1.2 Konzepte zur innerbetrieblichen Logistiksteuerung	20
2.2 Optimierungsmodelle im Unternehmensumfeld	22
2.2.1 Zielstellung und Einsatzbereiche	22
2.2.2 Mathematische Modellierung	24
2.2.3 Lösungsmethoden	25
2.3 Tourenplanungsprobleme	26
2.3.1 Charakteristik von Tourenplanungsproblemen	26
2.3.2 Modellierung	27
2.3.3 Tourenplanungsprobleme mit Zeitfenstern	29
2.3.4 Tourenplanungsprobleme mit variablen Zeitanteilen	31
2.3.5 Sonstige Erweiterungen von Tourenplanungsproblemen	32
2.3.6 Zielgrößen	33
2.3.7 Komplexitätstheoretische Betrachtung	35

3	Anforderungen	37
3.1	Übergeordnete Anforderungen	37
3.2	Spezifische Anforderungen	38
4	Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme	43
4.1	Allgemeines	44
4.2	Übersicht über Lösungsverfahren	46
4.2.1	Heuristiken	46
4.2.2	Meta-Heuristiken	50
4.2.3	Hybride Ansätze	61
4.3	Analyse der Eignung für die innerbetriebliche Logistik	62
4.3.1	Vergleich der Lösungsqualität	63
4.3.2	Rechenzeit und Skalierbarkeit	64
4.3.3	Analyse der Umsetzungsfähigkeit notwendiger Restriktionen	66
4.3.4	Zusammenfassung der Lösungsverfahren	67
4.4	Forschungsdefizit	67
5	Dynamische Routenplanung	69
5.1	Erweiterung des VRP um zeitpunktabhängige Servicezeiten	69
5.1.1	Modellierung der Servicezeiten	69
5.1.2	Ermittlung der Parameter	72
5.1.3	Modellierung des Depots	74
5.2	Entwicklung des Ameisenalgorithmus für Logistikprobleme	75
5.2.1	Biologische Herkunft	75
5.2.2	Funktionsweise des Ameisenalgorithmus	76
5.2.3	Unterschiede zwischen künstlichen und realen Ameisen	79
5.2.4	Abwandlungen des Ameisenalgorithmus	81
5.2.5	Berücksichtigung von Nebenbedingungen	83
5.3	Verwendung des Algorithmus für die Tourenplanung	85
5.4	Zyklische Wiederverwendung logistischer Ressourcen	87
5.5	Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Einflussgrößen	89
5.5.1	Adaption der Zielfunktion	90
5.5.2	Berücksichtigung in der heuristischen Information	90
5.5.3	Veränderung des Verhältnisses zwischen Pheromonkonzentration und heuristischem Wert	92

5.6	Priorisierung kurzfristiger Abrufe	93
5.6.1	Szenarien für kurzfristige Priorisierung	93
5.6.2	Berücksichtigung der Priorisierung	94
5.7	Lokale Suchverfahren zur Verbesserung der Lösung	96
5.7.1	Einfügeverfahren	96
5.7.2	Lokale Optimierungsmaßnahmen	98
5.8	Aufbau des Algorithmus zur Logistikoptimierung	100
5.9	Einbettung des Modells in das Produktionsumfeld	105
5.9.1	Schritt 1: Statische Parameter ermitteln	106
5.9.2	Schritt 2: Dynamische Informationen berücksichtigen	106
5.9.3	Schritt 3: Lösungen ermitteln	106
5.9.4	Schritt 4: Fahraufträge disponieren	107
5.9.5	Schritt 5: Informationen für die Fahrer bereitstellen	107
5.10	Zusammenfassung	108
6	Prädiktion der notwendigen Kapazitäten	109
6.1	Methoden zur Vorhersage künftiger Kapazitätsbedarfe	109
6.2	Auswahl der Methode zur Bedarfsprognose	111
6.3	Vorhersage künftiger Abrufe	112
6.4	Wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung	113
6.5	Ableitung von Maßnahmen aus der Kapazitätsprognose	116
6.5.1	Ableiten der zu erwartenden Kapazitätsbedarfe	117
6.5.2	Abmindern von Kapazitätsspitzen	118
6.6	Zusammenfassung	119
7	Verifikation und praktische Validierung	121
7.1	Entwicklung des Softwaretools	122
7.1.1	Funktionalität des Programms	123
7.1.2	Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung	125
7.2	Simulation dynamischer Testfälle	126
7.2.1	Entwicklung dynamischer Benchmarks	126
7.2.2	Beurteilung der Leistungsfähigkeit	127
7.3	Evaluierung der Prognosefähigkeit	129
7.4	Praktische Anwendung	132
7.4.1	Ausgangssituation des Anwenders	132
7.4.2	Ablauf der Logistikprozesse	133

Inhalt

7.4.3	Integration der Steuerung	134
7.4.4	Parametrierung auf die physischen Gegebenheiten des Anwenders	134
7.4.5	Anwendung der Steuerung	135
7.4.6	Analyse der Simulationsergebnisse	135
7.5	Identifikation wirtschaftlich relevanter Einsatzgebiete	136
7.6	Kritische Bewertung der Forschungsergebnisse	138
8	Zusammenfassung und Ausblick	143
8.1	Zusammenfassung	143
8.2	Ausblick	144
	Literatur	147
	Anhang	181
A.1	Einflüsse auf den wirtschaftlichen Betrieb von dynamischen Logistiksystemen	181
A.2	Klassifizierung von Tourenplanungsproblemen	182
A.3	Getroffene Annahmen für die Kapazitätsprognose	183
A.4	Betreute Studienarbeiten	184

Abkürzungsverzeichnis

ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony System
AS	Ant System
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
EAS	Elitist Ant System
ERP	Enterprise Ressource Planning
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
INCOSE	International Council on Systems Engineering
JIT	Just In Time
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LMS	Least Mean Squares
MMAS	Max-Min Ant System
NB	Nebenbedingung
OR	Operations Research
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PSO	Partikelschwarmoptimierung
RZ	Routenzug
SA	Simulated Annealing
SOFM	Self-Organizing Feature Maps
TDVRP	Time Dependend Vehicle Routing Problem
VND	Variable Neighborhood Descend
VNS	Variable Neighborhood Search
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
VRP	Vehicle Routing Problem
TSP	Traveling Salesman Problem

Verzeichnis der Formelzeichen

Schreibweisen

Vektoren und Matrizen sind in der vorliegenden Arbeit durch fettgedruckte Klein- bzw. Großbuchstaben dargestellt.

Griechische Buchstaben

α	Koeffizient für Einfluss der Pheromone (ACO)
β	Koeffizient für Einfluss der heuristischen Information (ACO)
η	Heuristischer Wert (ACO)
λ	Länge der Kette beim Austausch bei lokalen Suchverfahren
μ	Erwartungswert
$\Phi(x)$	Standardnormalverteilung
ρ	Verdunstungsfaktor der Pheromone (ACO)
σ	Standardabweichung
τ	Pheromonintensität
τ_0	Initiale Pheromonkonzentration
$\Delta\tau_{ij}^k$	Menge an Pheromonen für die Pheromonablage (ACO)
Ψ	Lösung
Ψ^0	Initiale Lösung
Ψ^i	Iterationsbeste Lösung
Ψ^{gb}	Global beste Lösung
Ψ^k	Lösung der Ameise k
ξ	Verdunstungsrate (ACS)
ζ	Faltungsparameter

Lateinische Buchstaben

d	Weglänge
\bar{d}_a	Durchschnittliche Kapazitätsbelegung durch eine Bestellung
$d_{i-1 \rightarrow i}$	Distanz zwischen Station $i - 1$ und i
$F(\mathbf{x})$	Zielfunktion
f	Fehler der LMS-Methode
$f(x)$	Dichtefunktion der Normalverteilung
$f_{v,i}$	Faktor für die variable Umladezeit an Station i
$g(\mathbf{x})$	Nebenbedingungen
$h(x)$	Rechteckfunktion
i	Laufvariable, Index
J	Zufällig nach Übergangsregel ausgewählte Kante
j	Mögliche nächste Station (ACS)
K	Menge der noch zu besuchenden Stationen (ACO)
k	Laufvariable, Index, Nummerierung der Ameisen (ACO)
L_{ψ^k}	Bewertung der Lösung Ψ^k nach der Zielfunktion (i. d. R. Dauer)
$L_{\psi^{g^b}}$	Bewertung der Lösung Ψ^{g^b} nach der Zielfunktion (i. d. R. Dauer)
m	Laufvariable, Index
n	Laufvariable, Index
N	Liste aller Stationen
N_{min}	Mindestanzahl Stichproben
n_n	Zähler für das Nicht-enthalten-Sein einzelner Stationen
n_p	Anzahl Parameter
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	Normalverteilung mit Erwartungswert μ und der Varianz σ^2
p	Wahrscheinlichkeit für die Annahme einer Lösung (VNS, ACO)
q	Gleichmäßig verteilte Zufallszahl (ACO)
q_0	Parameter für Entscheidungsgrenzwert (ACO)
R^2	Bestimmtheitsmaß
$S_{i,j}$	Savingsfaktor für das direkte Verbinden von Station i und j
T	Temperatur (SA)
$t_{aktuell}$	Aktueller Zeitpunkt in der Tour
$t_{B,i}$	Zeitlicher Eingang der Bestellung i

$t_{B,n+1}$	Bestellzeitpunkt der Bestellung $n + 1$
$t_{B,p}$	Prognostizierter Bestellzeitpunkt der Bestellung p
$t_{c,i}$	Konstante Umladezeit an Station i
$t_{e,i}$	Spätester Ablieferzeitpunkt (Ende des Zeitfensters) an Station i
$t_{Komm.}$	Zeit zum Kommissionieren vor Abfahrt
t_F	Fahrtzeit
$t_{F,i-1 \rightarrow i}$	Fahrtzeit von Station $i - 1$ zu i
t_{ges}	Gesamtzeit der Tour
t_i	Ankunftszeit an Station i
$t_{letztm\ddot{u}glich,i}$	Letztmöglicher Ablieferzeitpunkt an Station i
$t_{s,i}$	Servicezeit an Station i
t_W	Wartezeit
t_0	Startzeitpunkt der Tour
$t_{0,m}$	Startzeitpunkt der Tour m
Δt	Erwartungswert für den zeitlichen Abstand zweier Bestellungen
v	Geschwindigkeit des Routenzugs
\mathbf{x}	Variablenvektor
Δz	Wert der Verschlechterung (SA)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Bedingt durch die Globalisierung konkurriert ein Großteil der heutzutage in Deutschland produzierten Güter international in gesättigten Märkten. Eine am Markt verfügbare Angebotsvielfalt mit ähnlichen Innovationen drängt Unternehmen dazu, sich durch immer kundenindividuellere Produkte Alleinstellungsmerkmale zu verschaffen, somit jedoch auch eine größere Anzahl an Produkten in verhältnismäßig kleinen Stückzahlen anzubieten (WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016, S. 52 ff.; SCHUH 2012, S. 2). Ebenso wird häufig der Produktlebenszyklus verkürzt (WIENDAHL 2014, S. 99; SCHUH 2012, S. 2), um sich immer mit den aktuellsten Produkten am Markt behaupten zu können.

All diese Veränderungen führen aus Sicht eines produzierenden Unternehmens dazu, dass sich immer regelmäßiger der Bedarf für Anpassungen am Produktionssystem ergibt. Zudem ist eine hohe Stückzahlflexibilität für eine wirtschaftliche Produktion wichtig, da sich bei neuen Produkten trotz intensiver Marktforschung häufig nur mit geringer Zuverlässigkeit voraussagen lässt, wie sich der Absatz entwickeln wird (GÜNTHNER 2007, S. 31). Zur Bewältigung dieser Herausforderungen eingesetzte flexible Konzepte in der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) basieren häufig auf der Forderung, noch möglichst kurzfristig Auftragsreihenfolgen oder Maschinenbelegungen anpassen zu können (vgl. z. B. NIEHUES 2017, S. 69). Auch neuartige Fabrikkonzepte, wie beispielsweise die Inselfertigung bzw. Modularisierung und Flexibilisierung von Montagebereichen, welche bisher in Linie angeordnet sind, basieren grundlegend auf Flexibilisierung und somit dem Ermöglichen kurzfristiger Umplanungen (AUDI 2016).

Diese gestiegenen Anforderungen an die Flexibilität bei Produktionssystemen sind in Konsequenz auch für die Materialbereitstellung relevant, da eine Umplanung der

1 Einleitung

Fertigungsabläufe nur dann möglich ist, wenn die Verfügbarkeit der dafür erforderlichen Materialien sichergestellt werden kann. Sofern die Produktionsanlagen und -prozesse auf die nicht genau prognostizierbaren Stückzahlen sowie die ebensowenig vorhersehbare Verteilung der Variantenkonfigurationen reagieren können, ist die Logistik somit ebenfalls unmittelbar von diesen Schwankungen betroffen (BUSSE 2013, S. 6). Eine gute Skalierbarkeit der Logistik ist daher essenziell für den langfristig wirtschaftlichen Betrieb der Produktion. Erst durch das reibungslose Zusammenspiel aller Teilaspekte können die Potenziale der neuen Konzepte voll ausgeschöpft werden.

Daher ist auch die Logistik gefordert, sich flexibel aufzustellen und auf Änderungen kurzfristig reagieren zu können (GÜNTNER & BOPPERT 2013, S. 293). In Konsequenz ist es von Vorteil, wenn sich die Logistik möglichst flexibel an die Produktion anpassen kann und somit wenige zusätzliche Restriktionen an den Aufbau des Produktionssystems gestellt werden müssen.

Neben den Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Flexibilität führen immer schon existierende Erschwernisse wie bspw. Überkapazitäten durch Volumenschwankungen in diesem wirtschaftlichen Umfeld zu einer schwierigen Konkurrenzsituation und setzen somit die agierenden Unternehmen unter erheblichen Kostendruck (SCHUH 2012, S. 2). Um den Herausforderungen in Hinblick auf die Kosten gerecht zu werden, sind im gesamten Unternehmen große Anstrengungen notwendig, um sämtliche Prozesse auf maximale Effizienz zu trimmen. Vor allem die produzierenden Bereiche in Unternehmen sind stark kostengetrieben und unterliegen deshalb im Regelfall permanenten Verbesserungsprogrammen (J. SINGH & H. SINGH 2015, S. 76 ff.). Die genaue Betrachtung der Kosten zeigt, dass ein erheblicher Teil der Produktionskosten auf die Logistik entfällt. SEECK (2010, S. 10) beziffert diesen Anteil an den Gesamtkosten eines produzierenden Unternehmens typischerweise auf zwischen 10% und 20%, davon wiederum entsteht ungefähr die Hälfte durch die fabrikinterne Logistik (GÜNTHER 2006). Die Logistik ist damit einer der größten Kostentreiber in der Produktion, was sich auch daran erkennen lässt, dass bei Fabrikplanungsprojekten für die Layoutplanung die Minimierung des Transportaufkommens häufig als oberste Zielgröße herangezogen wird (SCHOLZ 2010, S. 3-4; S. SINGH & SHARMA 2006, S. 425 f.).

Die fabrikinterne Logistik zeichnet sich somit zum einen als elementarer Befähiger für flexible Produktionssysteme aus, zum anderen ist sie ein wichtiger Stellhebel auf