

Christian Lieb

Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme

Christian Lieb

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

2. Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt
Technische Universität Dresden

3. Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, i. R.

Die Dissertation wurde am 20.10.2020 bei der Technischen Universität München ein-
gereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 01.03.2021 angenommen.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2021

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Christian Lieb

Copyright © Christian, Lieb, 2021

ISBN: 978-3-948514-10-5

Printed in Germany, 2021

Vorwort

„*Stabilität durch Dynamik*“ – Dies ist nicht nur das Ziel der Steuerungsstrategien, sondern auch die Herangehensweise an die Erstellung dieser Arbeit. Besonders der dynamische Austausch mit Kollegen trägt wesentlich zu einem stabilen Fundament der langfristigen Forschungsarbeit bei. Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl fml entstanden. Der konkrete Untersuchungsgegenstand kristallisierte sich bei der Bearbeitung des DFG Forschungsprojekts GU 427/30-1 heraus. Mein Dank gilt all denjenigen, die mich bei meinem Promotionsvorhaben unterstützt haben.

Für die Betreuung meiner Forschungsarbeit, die fachlichen Gespräche sowie die gemeinsame Projektarbeit während meiner Lehrstuhlzeit möchte ich mich zu allererst bei Prof. Günthner sowie seinem Nachfolger Prof. Fottner bedanken. Ihnen danke ich besonders für den nahtlosen Betreuungsübergang. Prof. Schmidt danke ich für das Koferat und Prof. Stahl für die Übernahme des Vorsitzes.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl fml gilt mein Dank für die während der gesamten Zeit stets vertrauensvolle und inspirierende Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich Marcus, Sandra und Fabian. Daran anschließend möchte ich Sandra, Wuddi, Fabian, Andi und meinem Vater Erich für die Anmerkungen zu dieser Arbeit danken. Daneben danke ich ebenfalls meinem Mentor beim Promotionsvorhaben Jürgen für die vielen Möglichkeiten, Praxiseinblicke parallel zu meiner Lehrstuhl­tätigkeit zu erlangen. Der Blick auf die industrielle Praxis eröffnete häufig neue Sichtweisen auf meine Forschungsarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt den zahlreichen Studierenden, die im Rahmen von Studienarbeiten oder als HiWi das DFG-Forschungsprojekt unterstützt haben. Die gemeinsamen Diskussionen ergaben nützliche Anregungen für meine eigene Forschungsarbeit. Vielen Dank Ali, Annika, Artur, Astrid, Christian, Jakob, Johannes, Laura, Martin, Matthias, Michella, Nadine, Rodrigo, Rui, Sebastian, Theresa und Yuanzheng.

Zuletzt gebührt ein besonderer Dank meinen Eltern Marlies und Erich sowie meiner Freundin Annika, die mich während dieser intensiven Zeit stets unterstützt haben.

München, im Oktober 2020

Christian Lieb

Kurzdarstellung

Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme

Routenzugsysteme zur innerbetrieblichen Produktionsversorgung sind derzeit meist mit statischen Routen und festen Abfahrtstakten geplant. Geänderte Anforderungen an die Reaktionsfähigkeit der Systeme erfordern eine dynamische, flexible und dennoch robuste Produktionsversorgung. Eine statische Steuerung der Materialbereitstellung führt dann häufig zu einem ineffizienten oder instabilen Systembetrieb.

In dieser Arbeit wurde daher untersucht, wie dynamische Steuerungsstrategien konzipiert sein müssen, um kurzfristig bekannte Transportbedarfe unter der Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands robust und effizient zu bearbeiten. Dazu wurden auf Basis einer modularen Struktur 18 Steuerungsstrategien mit unterschiedlichem Dynamisierungsgrad entwickelt und algorithmisch ausgestaltet. Wichtigste Bausteine für die dynamischen Module sind die Berücksichtigung von Zeitfenstern und effizienten Tourenbildungsalgorithmen. Als zugrundeliegendes mathematisches Optimierungsproblem wurde das *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) identifiziert und durch den Einsatz einer *Multiple Ant Colony System* (MACS)-Metaheuristik gelöst.

Zur Bewertung der Steuerungsstrategien wurden ereignisdiskrete Simulationsexperimente durchgeführt. Für repräsentative Systemausprägungen und Einsatzszenarien wurden je Strategie die Kombinationen aus Umlaufbestand und Routenzügen, die zum Sicherstellen einer robusten Produktionsversorgung erforderlich sind, ermittelt. Je weniger Ressourcen benötigt werden, desto effizienter agiert eine Steuerungsstrategie. Je mehr Einsatzszenarien robust versorgt werden können, desto höher ist die Effektivität. Im Mittel führen dynamischere Modulausprägungen immer zu einer zumeist statistisch signifikanten Steigerung der Effektivität und Effizienz der Produktionsversorgung. Gerade die Effizienz einer Steuerungsstrategie variiert jedoch in Abhängigkeit des Routenzugsystems und Einsatzszenarios, so dass auch statische Steuerungsstrategien in manchen Fällen zu einem effizienzoptimalen Systembetrieb führen können. Insbesondere bei flexiblen Transportnetzwerken können die dynamischeren Strategien jedoch eine deutliche Einsparung an Transportressourcen ermöglichen.

Grundsätzlich muss die Auswahl einer Steuerungsstrategie immer in Abhängigkeit des konkreten Routenzugsystems und Einsatzszenarios erfolgen. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern dazu Anhaltspunkte und Handlungsempfehlungen.

Abstract

Dynamic control strategies for in-plant milk runs

In-plant milk runs for production supply are currently mostly planned with static routes and fixed departure times. Changing requirements on the reactivity of the production systems require a dynamic, flexible and yet robust production supply. Static control of material supply then often leads to inefficient or unstable system operation.

In this thesis it was therefore examined how dynamic control strategies have to be designed in order to process short-term known transport requirements robustly and efficiently under consideration of the current system status. For this purpose, 18 control strategies with different degrees of dynamization were developed and algorithmically designed on the basis of a modular structure. The most important components for the dynamic modules are the consideration of time windows and efficient route planning algorithms. The *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) was identified as the underlying mathematical optimization problem and solved by using a *Multiple Ant Colony System* (MACS) metaheuristic.

Discrete event simulation experiments were performed to evaluate the control strategies. For representative system characteristics and application scenarios, the combinations of work-in-process and trains required to ensure a robust production supply were determined for each strategy. The fewer resources are required, the more efficiently a control strategy operates. The more application scenarios can be supplied robustly, the higher the effectiveness. On average, more dynamic module characteristics almost always lead to a statistically significant increase in the effectiveness and efficiency of production supply. However, the efficiency of a control strategy in particular varies depending on the in-plant milk run system and application scenario, so that even static control strategies can in some cases lead to an efficiency-optimized production supply. Particularly in the case of flexible transport networks, however, the more dynamic strategies can enable significant savings in transport resources.

Basically, the selection of a control strategy must always be made in relation to the concrete in-plant milk run system and application scenario. The results of this thesis provide indications and recommendations for action.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzdarstellung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Formelzeichenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung	1
1.2 Problemstellung beim Einsatz von Routenzugsystemen	3
1.3 Forschungsfragen	6
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen von Routenzugsystemen	11
2.1 Systemdefinition und -abgrenzung	11
2.2 Gestaltung von Routenzugsystemen	15
2.2.1 Beschreibungsmodelle	15
2.2.2 Randbedingungen	19
2.2.3 Organisatorische Gestaltung	21
2.2.4 Gestaltung der Handhabungsprozesse	22
2.2.5 Technische Gestaltung	27
2.2.6 Gestaltung der Tourenbildung	28
2.3 Anwendungsbereich von Routenzugsystemen	30
3 Steuerung von Routenzugsystemen	35
3.1 Grundlagen der Routenzugsystemsteuerung	35
3.1.1 Abgrenzung von Steuerung und Planung	35
3.1.2 Entscheidungsprobleme der Steuerung	38
3.1.3 Dynamik der Entscheidungsprobleme	40
3.2 Basisprobleme der Steuerungsentscheidungen	42
3.2.1 Problem des kürzesten Pfades	42
	VII

3.2.2	Problem der Tourenplanung	44
3.2.3	Problem des Handlungsreisenden	49
3.3	Routenzugspezifische Steuerungsentscheidungen	52
3.3.1	Algorithmische Umsetzung	52
3.3.2	Vergleich verschiedener Ausprägungen	60
3.4	Detaillierung der Forschungslücke	66
4	Identifikation repräsentativer Routenzugreferenzsysteme	69
4.1	Anforderungen an Routenzugreferenzsysteme	69
4.2	Auswahl der Systemmerkmale und -ausprägungen	71
4.2.1	Randbedingungen	71
4.2.2	Organisatorische Gestaltung	73
4.2.3	Gestaltung der Handhabungsprozesse	75
4.2.4	Technische Gestaltung	80
4.3	Auswahl der Routenzugreferenzsysteme	82
5	Formalisierung von Routenzugsystemen	87
5.1	Anforderungen an die Formalisierung	87
5.2	Modellierung der Systemelemente	88
5.2.1	Transportnetzwerk	88
5.2.2	Transportbedarf	93
5.2.3	Transportressourcen	101
5.2.4	Zykluszeit	104
6	Entwicklung der Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme	109
6.1	Modulare Struktur der Steuerungsstrategien	109
6.2	Steuerungsmodule	113
6.2.1	Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg	113
6.2.2	Zeitfenster	118
6.2.3	Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg	121
6.2.4	Abfahrtszeit	141
6.2.5	Ressourcen	149
6.2.6	Intratour: Reihenfolge, Weg	150
6.3	Ableitung von dynamischen Steuerungsstrategien	155
7	Evaluation der Steuerungsstrategien im Hinblick auf die Routenzugreferenzsysteme	159

7.1 Zielgrößen und Methodik	159
7.2 Versuchsplan und -durchführung	161
7.3 Verifikation der Systemmodellierung	165
7.3.1 Transportnetzwerk	165
7.3.2 Transportbedarf	167
7.3.3 Transportressourcen	170
7.3.4 Zykluszeit	172
7.4 Vergleichende Bewertung der Steuerungsstrategien	176
7.4.1 Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien	176
7.4.2 Einfluss der Systemausprägungen auf die Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien	180
7.4.3 Effektivität und Effizienzpotentiale der Steuerungsstrategien	190
7.4.4 Effizienzpotentiale der Steuerungsmodule	201
7.5 Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Systemausprägungen	203
8 Kritische Betrachtung der dynamischen Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme	211
8.1 Erwartungen und Ergebnisse	211
8.2 Erweiterung des Anwendungsbereichs von Routenzugsystemen	215
8.3 Handlungsempfehlungen zur Steuerung von Routenzugsystemen	218
9 Zusammenfassung und Ausblick	221
9.1 Zusammenfassung	221
9.2 Ausblick zur dynamischen Routenzugsystemsteuerung	226
9.3 Ausblick zur Automatisierung in der Produktionsversorgung	228
Literaturverzeichnis	233
Verzeichnis der durch den Autor betreuten Studienarbeiten	255
Abbildungsverzeichnis	257
Tabellenverzeichnis	267
Anhang A Exkurs zum Problem des kürzesten Pfades	A-1
A.1 Datenstrukturen und Lösungskomplexität	A-1
A.2 Experimente zur Rechenzeit	A-2
Anhang B Bewertung der Lösungsverfahren für das VRPTW	B-1

Anhang C	Layouts der Transportnetzwerke	C-1
Anhang D	Parametrisierung der Cluster-Grenzwerte	D-1
Anhang E	Selbstkalibrierung des MACS	E-1
Anhang F	Exkurs zu Intratour: Reihenfolge, Weg	F-1
Anhang G	Generische Simulationsumgebung für Routenzugsysteme	G-1
Anhang H	Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Systemausprägungen	H-1
Anhang I	Effizienzpotentiale der Steuerungsstrategien	I-1
I.1	Haupteffekte der Steuerungsstrategien	I-1
I.2	Haupteffekte und ANOVA der Modulausprägungen	I-7
Anhang J	Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Systemausprägungen	J-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ANOVA	Analysis of variance
D	Dynamisch (IE) bzw. Deterministisch (IQ)
DP	Dynamic Programming
EDLF	Earliest Deadline First
FIFO	First In First Out
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GLT	Großladungsträger
IE	Informationsevolution
IP	Integer Programming
IQ	Informationsqualität
JIS	Just-In-Sequence
JIT	Just-In-Time
JITCVRP	Just-In-Time Capacitated Vehicle Routing Problem
KLT	Kleinladungsträger
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen

Abkürzung	Bedeutung
LG	Leergut
LM	Logistikmitarbeiter
LT	Ladungsträger
MACS	Multiple Ant Colony System
ME	Materialeinheiten
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
MTM	Methods-Time Measurement
NNH	Nearest Neighbor Heuristik
P	Prognostiziert (IQ)
PT	Produktionstakte
RZF	Routenzugfahrer
S	Statisch (IE) bzw. Stochastisch (IQ)
SK	Ein-/ Aufschubkonzept
TA	Transportauftrag
TSP	Traveling Salesman Problem
TSPTW	Traveling Salesman Problem with Time Windows
TW	Transportwagen/ -konzept
UAS	Universelles Analysiersystem
XII	

Abkürzung	Bedeutung
VG	Vollgut
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
WBZ	Wiederbeschaffungszeit
WIP	Work-In-Process/ Umlaufbestand
WS	Warteschlange
ZAZ	Zwischenabrufzeit

Formelzeichenverzeichnis

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Formelzeichen sind in der folgenden Tabelle in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt.

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$[a_i; b_i]$	-	Zeitfenster des Knotens i mit frühester Bedienzeit a_i und spätester Bedienzeit b_i
a_{ij}	-	Eintrag der $n \times n$ -Matrix $A(G)$
b_{ij} / b	PT	Blockrestriktion/ Blocklänge des Materials i am Klienten j
$c_{(i,j)}$	- / s	Kosten der Kante zwischen den Knoten i und j
$c_{(i,j),T}$	- / s	Kantengewichte der Kante (i, j) der Tiefebene des Transportnetzwerks
$c_{(i,j),T,basis}$	- / s	Basis-Kantengewichte der Kante (i, j) der Tiefebene des Transportnetzwerks
$c(i)$	- / s	Zusätzliche Kosten durch die Wahl des Knotens i
$c_H(route, u)$	- / s	Kosten auf der Hochebene, die durch das Hinzufügen des Klienten u zur Route entstehen
c_{ZAZ} / c	-	Variationskoeffizient der Verteilung der ZAZ
$c(S_{ant,m})$	s	Kosten des Sets von Touren als Lösung der m -ten Ameise
$c(S_{tour,global})$	s	Kosten des Sets von Touren als globale Lösung
$c(S_{tour,local})$	s	Kosten des Sets von Touren als lokale Lösung
CT	s	Rechenzeit
CT_{max}	s	Maximale Rechenzeit zur Optimierung
$d_{(i,j)}$	m	Wegstrecke einer Kante (i, j)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
d_{ij} / d	PT	Distanzrestriktion/ Distanzabstand des Materials i am Klienten j
ETA_j	-	Frühester Bereitstellzeitpunkt des Transportauftrags j
f_{fr}	-	Faktor für die dynamischen Kantengewichte bei der Berücksichtigung der Flussrate
f_H	-	Faktor für die dynamischen Kantengewichte bei der Berücksichtigung von historischen Staus
f_P	-	Faktor für die dynamischen Kantengewichte bei der Berücksichtigung von aktuellen und prognostizierten Staus
$f_{route,min}$	s ⁻¹	Erforderliche minimale Routenfrequenz
$f_{Verdunstung}$	-	Verdunstungsfaktor der Pheromonspur
$f_{r(i,j)}$	-	Flussrate der Kante (i,j)
$f_{r_{max}}$	-	Maximale Flussrate im Transportnetzwerk
$f_{r_{min}}$	-	Minimale Flussrate im Transportnetzwerk
$G(V, E)$	-	Mathematischer Graph mit Menge der Knoten V und Menge der Kanten E
H	-	Hochebene des Transportnetzwerks
(i, j)	-	Kante des mathematischen Graphen zwischen den Knoten i und j
k	ME	Ladungsträgerkapazität
Δk	-	Füllmengenabweichung eines LT
k_{tour}	LT	Transportkapazität einer Tour
k_v	LT	Transportkapazität eines Fahrzeugs v beim VRPTW
K	-	Menge der Klienten einer Route
LTA_j	-	Spätester Bereitstellzeitpunkt des Transportauftrags j

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
M_c	-	Bedarf an ME eines Klienten
$n_{Anhänger}$	-	Anzahl der Anhänger eines Routenzugs
n_{calls}	-	Aufrufanzahl der MACS Kalibrierung
n_{runs}	-	Wiederholungen der MACS Kalibrierung innerhalb eines Aufrufs
$n_{Züge}$	-	Anzahl an Routenzügen
$N_{TSP}(m)$	-	Kombinationsmöglichkeiten von m Transportaufträgen beim TSP für Routenzugsysteme
OP_i	-	Menge der offenen TA des Clusters i
OT_j / OT	-	Zeitpunkt des Auftretens des Transportbedarfs j
p	-	Gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 1
$p_{(i,j)}$	-	Wahrscheinlichkeit, dass die Kante (i,j) gewählt wird
p_{ij}	-	Wahrscheinlichkeit, dass das Material i am Klienten j verbaut wird
$\Delta p_{kl,j}$	-	Zusätzliche bedingte Wahrscheinlichkeit eines Verbrauchs des Materials k aufgrund des Verbrauchs des Materials l am Klienten j
p_{ants}	-	Anzahl der Ameisen je Ameisenkolonie
$p_{iterations}$	-	Iterationen innerhalb einer Ameisenkolonie
q	-	Qualitätsrate
q_0	-	Grenzwert zwischen Exploitation und Exploration beim MACS
$queue[]$	-	Vektor der WS des Dijkstra-Algorithmus
Q	-	Materialflussquelle des Routenzugsystems
$r_{v,ij} / r$	-	Verbaurrate des Materials i am Klienten j
s_K	ME	Materialbestände an den Klienten

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
s_i	s	Servicezeit am Knoten i beim VRPTW
s_M	ME	In der Bestandsreichweite berücksichtigter Materialbestand des Materials M
s_Z	ME	Materialbestände in der Zuführung
$S_{ant,m}$	-	Set von Touren als Lösung der m -ten Ameise
S_{route}	-	Set von statischen Routen
S_{tour}	-	Set von Touren
$S_{tour,global}$	-	Set von Touren als globale Lösung
$S_{tour,local}$	-	Set von Touren als lokale Lösung
$t_{(i,j),T,P,Stillstand}$	s	Prognostizierte Stillstandszeit von Routenzügen auf der Kante (i,j) der Tiefebene des Transportnetzwerks
t_B	s	Beladezeit einer Tour eines Routenzugs
$t_{B1/2}$	s	Beladezeit am Klienten des $TA_{1/2}$
t_E	s	Entladezeit einer Tour eines Routenzugs
$t_{E1/2}$	s	Bereitstellungszeit am Klienten des $TA_{1/2}$
t_F	s	Fahrtzeit (inkl. Stau) einer Tour eines Routenzugs
$t_{F,1/2 \rightarrow 2/1}$	s	Fahrtzeit vom Klienten des $TA_{1/2}$ zum Klienten des $TA_{2/1}$
$t_{F,Q \rightarrow 1/2}$	s	Fahrtzeit von der Quelle zum Klienten des $TA_{1/2}$
$t_{F,max}$	s	Maximale Fahrtzeit je Cluster
$t_F(route)$	s	Fahrtzeit einer Route
t_{Fahrt}	-	Fahrtzeit je Tour
t_H	s	Haltepunktezeit (Nebenzeit) einer Tour eines Routenzugs

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
t_{H_i}	s	Handhabungszeit an der Haltestelle i
$t_{(i,j)}$	s	Fahrtzeit für die Kante (i, j)
$t_{ij,n}$	-	Zeitpunkt des n-ten Abrufs des Materials i am Klienten j
$\emptyset t_{(i,j),T,Stillstand}$	s	Durchschnittliche Stillstandszeit von Routenzügen auf der Kante (i, j) der Tiefebene des Transportnetzwerks
t_{Kol}	s	Kollaborationszeit zwischen Routenzug und FTF
t_Q	s	Handhabungszeit an der Quelle
$t_{Q1/2}$	s	Beladezeit an der Quelle für $TA_{1/2}$
t_{S_j}	s	Fahrtzeit für die Strecke j
t_{Stau}	-	Stauzeit je Tour
$t_{TA,route,max}$	s	Maximaler Tourenstartabstand einer Route
$t_{TA,route}$	s	Taktzeit einer Route
$t_{toDelivery}$	s	Zeitspanne bis zum spätesten Bereitstellzeitpunkt
t_{Zyklus}	s	Zykluszeit einer Tour eines Routenzugs
Δt_{SP}	s	Sicherheitspuffer beim auslastungsorientierten Tourenstart mit Zeitgrenze
T	s	Produktionstaktzeit
T	-	Tiefebene des Transportnetzwerks
$T_{B,j}$	-	Bereitstellzeit des TA_j
T_{iv}	-	Ankunftszeit des Fahrzeugs v am Knoten i in der Lösung des VRPTW
TA	-	Menge von Transportaufträgen
$TA(S_{ant,m})$	-	Menge der Transportaufträge des Sets von Touren als Lösung der m-ten Ameise

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$TA(S_{tour,global})$	-	Menge der Transportaufträge des Sets von Touren als globale Lösung
$TA(S_{tour,local})$	-	Menge der Transportaufträge des Sets von Touren als lokale Lösung
$TA_{possible}$	-	Menge der Transportaufträge, die der aktuellen Tour unter der Berücksichtigung der Restriktionen hinzugefügt werden können
TA_{tour}	-	Menge der TA einer Tour
v	-	Fahrzeug beim VRPTW
$v[]$	-	Vektor der Lösung des Dijkstra-Algorithmus
v_P	-	Wert des Parameters P
v_{Zug}	m/s	Fahrtgeschwindigkeit eines Routenzugs
V	-	Menge der Fahrzeuge beim VRPTW
$w(v_P)$	-	Auswahlwahrscheinlichkeit für den Wert v_P
$WBZ_{j,max}$	s	Maximale Soll-Wiederbeschaffungszeit des Transportauftrags j
x_{ijv}	-	Binäre Variable, ob die Kante (i, j) vom Fahrzeug v in der Lösung des VRPTW verwendet wird
z_M	-	Verbauzahl des Materials M
$z_{V,ij} / z$	ME	Verbauzahl des Materials i am Klienten j
$ZAZ_{ij,n,n-1}$	s	Zwischenabrufzeit des Materials i am Klienten j zwischen dem Abruf n und $n - 1$
α	-	Gewichtungsfaktor der Attraktivität bei der Wahl eines Nachfolgers
β	-	Gewichtungsfaktor der Pheromonspur bei der Wahl eines Nachfolgers
η_K	-	Kapazitätsauslastung der Touren
XX		

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\eta_{(i,j)}$	-	Attraktivität der Kante (i,j)
η_{soll}	-	Kapazitive Planauslastung einer Tour
λ	LT/h	Transportbedarf
$\lambda(route)$	LT/h	Transportbedarf der Route
λ_i	LT	Nachfrage des Knotens i beim VRPTW
λ_{max}	LT/h	Maximaler Plan-Transportbedarf je Cluster
λ_{route}	LT/h	Ladungsträgerdurchsatz einer Route
λ_{system}	LT/h	Gesamttransportbedarf im Routenzugsystem
μ_{ZAZ}	s/ PT	Mittelwert der Verteilung der ZAZ
ξ	-	Verdunstungsfaktor der Pheromone bei einem lokalen Pheromon-Update
ρ	-	Verdunstungsfaktor der Pheromone bei einem globalen Pheromon-Update
σ_{ZAZ}	s/ PT	Standardabweichung der Verteilung der ZAZ
τ	-	Verstärkung der Pheromonspur
τ_0	-	Initiale Pheromonspur
$\tau_{(i,j)}$	-	Pheromonspur der Kante (i,j)

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird zunächst die der Arbeit zugrundeliegende Ausgangssituation skizziert. Ausgehend von allgemeinen Herausforderungen der innerbetrieblichen Produktionsversorgung (Abschnitt 1.1) wird in Abschnitt 1.2 die Problemstellung beim Einsatz von Routenzugsystemen erläutert. Darauf basierend werden Forschungsfragen formuliert (Abschnitt 1.3) sowie das Vorgehen zur Untersuchung dieser Fragestellungen geschildert (Abschnitt 1.4).

1.1 Herausforderungen in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung

Die innerbetriebliche Produktionsversorgung unterliegt dynamischen Einflüssen. Zum einen bestehen langfristige sowie disruptive Herausforderungen, die die bisherigen Anforderungen an die Produktionsversorgung sowie deren Steuerung ändern. Zum anderen können der technologische Fortschritt und die dadurch ermöglichte Informationsvernetzung als Wegbereiter des erforderlichen Wandels dienen (siehe Abbildung 1-1).

Die langfristigen Herausforderungen basieren insbesondere auf zwei anhaltenden Trends im Käuferverhalten, durch die ein Zielkonflikt in einer stabilen Produktionsversorgung entsteht. Zum einen führt die kundenindividuelle, oft kleinteilige Nachfrage zu einer Abwendung von lagerhaltiger Massenproduktion hin zu einer zunehmend individualisierten Variantenproduktion [Mül-2016, S. 22]. Bestände werden dabei im Sinne einer schlanken Logistik über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk niedrig gehalten. Notwendige Nachversorgungen finden nach dem Pull-Prinzip möglichst nah am tatsächlichen Bedarf statt [Klu-2018, S. 290 ff.]. Zum anderen besteht der kundenseitige Anspruch von immer kürzeren Lieferzeiten [Hei-2019]. Diese können durch ausreichende Fertigwarenbestände realisiert werden. Neben dem Risiko von obsoleten Beständen wird dadurch jedoch Verschwendung im Versorgungsprozess verdeckt [Tak-2013, S. 30]. Um den Zielkonflikt, kurze Lieferzeiten bei geringen Beständen im Wertschöpfungsnetzwerk, zu lösen, empfiehlt *Klug*, die Durchlaufzeiten der Materialien in Produktion und Produktionsversorgung zu minimieren. Die erhöhte Varianz im Teileverbrauch führt zum Bedarf einer hochzyklischen Versorgung mit engen Zeitfenstern für die Bearbeitung von Transportaufträgen. Gleichzeitig ist eine hohe Termintreue erforderlich, um stets eine stabile Produktion ohne Versorgungsengpässe zu gewährleisten [Klu-2018, S. 290 ff.].

Disruptive Herausforderungen für die innerbetriebliche Produktionsversorgung entstehen durch Technologie- und Systemveränderungen. Volatile Umgebungsbedingungen sowie die Autonomisierung von Systemobjekten erfordern und ermöglichen flexible Reaktionen ohne Zeitverzug [Gün-2006a, S. 156 f.]. Die verschlankten und optimierten starren Produktionssysteme stoßen dabei an ihre Grenzen. Um die weiter steigenden Flexibilitätsanforderungen zu bedienen, wandeln sich Produktionssysteme hin zu flexiblen und autonomen Strukturen, die selbstständig Entscheidungen treffen [Mül-2016, S. 22 f.]. Die daraus resultierenden Anforderungen bedeuten einen disruptiven Eingriff in bisherige Systeme zur innerbetrieblichen Produktionsversorgung [Fot-2018]. Ein Beispiel dafür ist die Auflösung starrer Linienstrukturen in Produktionssystemen. Stattdessen werden flexible Produktionsstationen mit wandelbaren Layouts propagiert. Dadurch verschieben sich die Positionen von Materialflussquellen und -senken permanent, und statisch geplante Routenverläufe zur Produktionsversorgung verlieren ihre Gültigkeit [Gün-2006b, S. 78; Gün-2006a, S. 157 ff.].

Bei der Anpassung der innerbetrieblichen Produktionsversorgung an die sich ändernden Anforderungen kann der technologische Fortschritt als Wegbereiter dienen. Neue Möglichkeiten der Automatisierung, Digitalisierung und Informationsvernetzung begünstigen den anstehenden Wandel. Insbesondere die Autonomisierung wird durch neue Automatisierungsmöglichkeiten beschleunigt. Beispielsweise können Systemobjekte auf der Basis einer präziseren Sensorik ihre Umgebung besser erkennen und autonom Entscheidungen treffen [Rei-2017, S. 508]. Ebenso ermöglichen Digitalisierung und Informationsvernetzung die Unterstützung bestehender Prozesse [Fot-2018]. Die durch die Variantenproduktion entstandene Komplexität hochflexibler Produktionssysteme kann durch den aktiven Einsatz digitaler Technologien beherrscht werden [Rei-2017, S. 509]. Aufgrund der durchgängigen systemischen Verfolgung von Materialien und deren Verbräuchen sowie intelligenter Prognosen der Teilebedarfe entsteht eine erhöhte Bestandstransparenz. Diese kann zur selbstständigen Bestandsüberwachung sowie zur Auslösung von Nachschub-Transportaufträgen mit optimierten Zeitfenstern genutzt werden. Aufgrund der Vermeidung von Zeitverzug in der Informationsübermittlung ist eine beschleunigte Produktionsversorgung möglich [Lie-2017b, S. 453 f.]. Daneben können die Transportaufträge intelligenter auf die beschränkten Ressourcen verteilt werden, da bessere Informationen über Ressourcenposition und -verfügbarkeit sowie über den Systemzustand generell vorhanden sind. Beispielsweise können Blockaden der Transportmittel aufgrund von Stau oder Störungen anderer Systemelemente vermieden und dadurch der Materialfluss optimiert werden [Lie-2017a, S. 81 ff.].

Durch die Möglichkeit, flexibel auf unbekannte Systemzustände zu reagieren, wird die innerbetriebliche Produktionsversorgung befähigt, in volatilen Umgebungen stabil und

effizient zu agieren [Gün-2006b, S. 63; Kra-2015]. Die erläuterten Herausforderungen und Wegbereiter des anstehenden Wandels in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung sind in Abbildung 1-1 zusammengefasst.

Wandel in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung		
	Herausforderungen	Wegbereiter
Langfristig	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Individuelle Variantenproduktion ▪ Kurze Lieferzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierung ▪ Digitalisierung ▪ Informationsvernetzung
Disruptiv	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexible Produktionssysteme ▪ Autonomisierung 	

Abbildung 1-1: Herausforderungen und Wegbereiter des Wandels in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung

Innerbetriebliche Routenzugsysteme haben sich im Rahmen der Lean-Production-Philosophie als effizientes System zur innerbetrieblichen Produktionsversorgung etabliert [Bae-2011; Gün-2012, S. 26]. Die skizzierten Herausforderungen und Wegbereiter des Wandels in der Produktionsversorgung wirken sich jedoch auf den klassischen Einsatz von Routenzugsystemen aus. Diese Problemstellung wird im folgenden Abschnitt 1.2 detailliert.

1.2 Problemstellung beim Einsatz von Routenzugsystemen

Routenzugsysteme ermöglichen eine schlanke Produktionsversorgung, da aufgrund des gebündelten Transports von Materialien im Vergleich zu Direkttransporten, z. B. mit Staplern, Leerfahrten eingespart werden können [Kle-2014]. Auch im Vergleich zur Werker selbstversorgung werden die Transporte pro Bauteil deutlich reduziert [Abe-2009]. Zudem ist eine standardisierte, produktionssynchrone und hochzyklische Versorgung mit flexiblen Handhabungsprozessen möglich [VDI-5586a; Lie-2017a, S. 37 ff.]. Aus diesen Gründen werden Routenzugsysteme mittlerweile branchenübergreifend zur Produktionsversorgung eingesetzt [Lie-2017a, S. 23].

Günthner et al. stellen fest, dass zur Synchronisierung mit der Produktion häufig definierte Routen mit einem festen Takt sowie Fahrweg verwendet werden. Dimensionierung und Steuerung des Routenzugsystems erfolgen meist auf Basis statischer Informationen. Dazu werden ein fixes Layout sowie deterministische oder konstante Transportbedarfe zwischen Materialflussquellen und -senken verwendet. Im Betrieb werden die Transportbedarfe oft verbrauchsorientiert ausgelöst, indem der Routenzugfahrer Kanbans auf seiner Tour einsammelt und als Transportbestellung an die Prozesse an

der Materialflussquelle übergibt. Die Tourenbildung erfolgt auf Basis der bekannten Transportbedarfe sowie definierter Routen und Kapazitäten der den Routen zugeteilten Transportmittel. Die Tour startet letztlich zum fest definierten, getakteten Zeitpunkt [Gün-2013, S. 96 ff.]. Um kleine Schwankungen der Transportbedarfe im Betrieb abzufangen, wird der Routentakt mit einem Sicherheitspuffer berechnet [VDI-5586b].

Aufgrund der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Herausforderungen steigt die Volatilität in der Systemumgebung der Produktionsversorgung. Zum einen können flexible Layoutanpassungen durch statisch geplante Routenzugsysteme nicht berücksichtigt werden [Lie-2017a, S. 64]. Zum anderen führt die steigende Variantenvielfalt in Produktion und Logistik zu besonders kritischen kurzfristigen Schwankungen in den Transportbedarfen [Lie-2017a, S. 77]. *Lieb et al.* halten fest, dass Planwerte auf Basis deterministischer Daten ihre Gültigkeit verlieren und die Einhaltung von Zeitfenstern für die Transportaufträge schwieriger wird, da Bedarfsspitzen entstehen, die die Transportkapazitäten überschreiten. Zudem werden die negativen Auswirkungen der Schwankungen auf die Systemeffizienz durch Zeitverzug in der Informationsübermittlung verstärkt [Lie-2018a]. Des Weiteren erhöht sich durch die derzeit verbreitete manuelle Informationsübermittlung die Wahrscheinlichkeit von Fehlern in der Informationsverarbeitung, was als besonders kritisch angesehen wird [Lie-2017a, S. 76].

Um Materialengpässe zu vermeiden, wird in der Produktionsversorgung versucht, kurzfristige Schwankungen zu nivellieren oder durch verschiedene Maßnahmen abzufangen. Auf der einen Seite untersuchen *Laschinger et al.* die Glättung der Schwankungen in den Transportbedarfszwischenzeiten durch eine dynamische Anpassung der Ladungsträgerfüllmenge. Dies erfordert jedoch eine zusätzliche Stufe in der Produktionsversorgung sowie das Mehrfachhandling der Materialien [Las-2015]. Auf der anderen Seite werden Bestandspuffer und zusätzliche Kapazitäten bzw. Sondertransporte vorgesehen, um Bedarfsspitzen abzufangen. Dadurch werden die Systeme jedoch im normalen Zustand mit Überkapazitäten betrieben, wodurch die Effizienz sinkt und Kosten steigen [Aln-2014a; VDI-5586b; Lie-2017a, S. 78]. Des Weiteren werden Transportaufträge als Reaktion auf kurzfristige Schwankungen auf frühere Touren vorgezogen oder auf spätere Touren verschoben [Emd-2012a; Boz-2013; Aln-2014a; Lie-2017a, S. 78]. Sofern die Transportaufträge mit Zeitfenstern versehen sind, funktioniert diese Maßnahme jedoch nur eingeschränkt [Lie-2017a, S. 74]. Zusätzlich wird versucht, durch die Verkürzung von Handhabungszeiten Prozesse zu beschleunigen. Dies kann z. B. durch den Einsatz von Automatisierungstechnik realisiert werden [Aln-2014a; Dew-2012]. Der derzeitige Automatisierungsgrad in Routenzugsystemen ist jedoch noch gering [Lie-2017a, S. 13].

Ein weiterer Ansatz zum Umgang mit kurzfristigen Schwankungen in Routenzugsystemen, den immer mehr Unternehmen erwägen [Gal-2016], ist der Einsatz von dynamischen Steuerungsstrategien, bei denen die Tourenbildung und die Tourenstartfestlegung unabhängig von statischen Routen und Tourenstartzeitpunkten erfolgen. Die notwendigen Entscheidungen für eine stabile, gebündelte Materialbereitstellung werden auf Basis der vorhandenen Transportaufträge und des aktuellen Systemzustands getroffen [Hor-2017]. Derartige Steuerungskonzepte sind bisher jedoch selten im Einsatz [Lie-2017a, S. 13].

Nach einer Studie von *Lieb et al.*, die im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit durchgeführt wurde, bestehen hohe Erwartungen an die dynamische Steuerung von Routenzugsystemen (siehe Abbildung 1-2). Durch eine erhöhte Flexibilität beim Umgang mit schwankenden Transportbedarfen können die Effektivität und die Effizienz in Routenzugsystemen im Vergleich zu statischen geplanten Systemen gesteigert werden. Die Effektivität eines Routenzugsystems wird dabei durch den Anteil der Transportaufträge beschrieben, die rechtzeitig und richtig bereitgestellt werden. Die Effizienz bestimmt sich durch den dazu notwendigen Ressourcenbedarf an Transportmitteln und Materialbestand. 56 % der Studienteilnehmer erwarten, dass die Versorgungssicherheit und damit die Effektivität zunehmen, was sich auch durch eine Reduktion der Staus im Routenzugsystem realisieren lässt (45 %). Zudem wird erwartet, dass sich die Effizienz im System erhöht, was sich v. a. durch eine erhöhte Kapazitätsauslastung der Systemressourcen (69 %) und eine Reduktion der Bestände im Produktionsbereich (48 %) ausdrückt. Neben den hohen Erwartungen besteht allerdings auch Skepsis bei einigen Studienteilnehmern. Teils wird sogar vermutet, dass sich die aufgeführten Kriterien bei einer dynamischen Steuerung des Routenzugsystems gegenüber einem statisch geplanten System verschlechtern. [Lie-2017a, S. 13/ 68 f.]

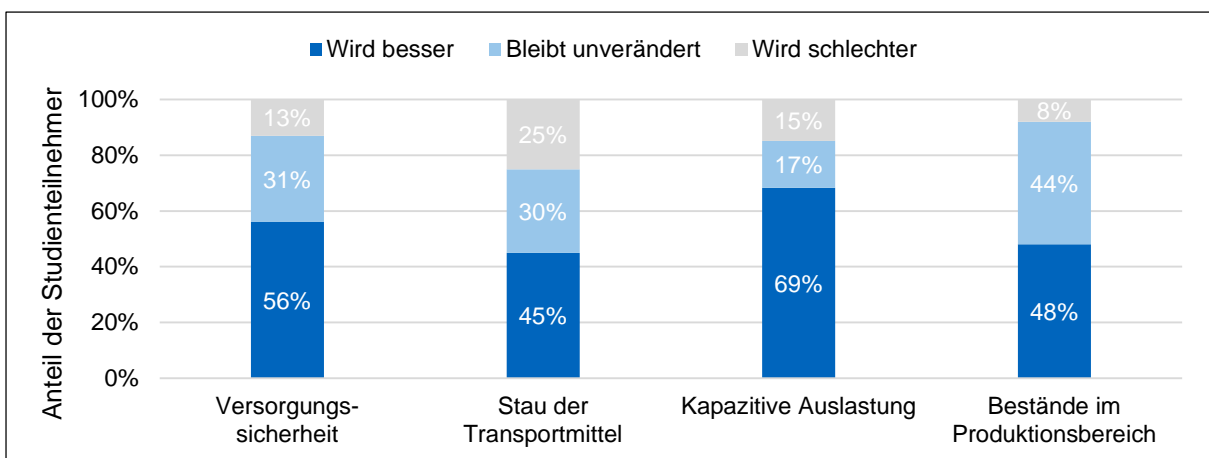


Abbildung 1-2: *Erwartungen hinsichtlich Effektivität und Effizienz an eine dynamische Routenzugsystemsteuerung im Vergleich zu statisch geplanten Systemen (vgl. [Lie-2017a, S. 68 f.]*)

Ganzheitliche Untersuchungen zu Strategien der dynamischen Routenzugsteuerung sowie zur Eignung der Steuerungsstrategien in Verbindung mit den vielfältigen Einsatzszenarien und Systemkonfigurationen von Routenzugsystemen gibt es bisher nicht [Lie-2017a, S. 88].

Auf Basis der hohen und dennoch widersprüchlichen Erwartungen an dynamische Steuerungsstrategien in Routenzugsystemen sowie der fehlenden ganzheitlichen Untersuchungen dazu werden im nächsten Abschnitt 1.3 wissenschaftliche Fragestellungen abgeleitet.

1.3 Forschungsfragen

Aus den aufgezeigten Herausforderungen und der Problemstellung beim Einsatz von Routenzugsystemen, insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit kurzfristig bekannten Transportbedarfen, wird folgende wissenschaftliche Fragestellung für diese Arbeit abgeleitet:

Wie müssen dynamische Steuerungsstrategien der innerbetrieblichen Materialversorgung durch ein Routenzugsystem konzipiert sein, damit kurzfristig bekannte Transportbedarfe unter der Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands robust und effizient bearbeitet werden?

Klibi und Martel definieren das Kriterium Robustheit innerhalb eines Wertschöpfungsnetzwerks danach, inwieweit das System für alle möglichen Zukunftsszenarien in der Lage ist, die Wertschöpfung zu erhalten. Dazu gehört, dass das System im Zeitverlauf auch unter Extrembedingungen stabil bleibt [Kli-2013]. Eine robuste Steuerungsstrategie soll in Bezug darauf die Stabilität der Produktionsversorgung auch bei volatilen Systembedingungen gewährleisten. Im Zusammenhang dieser Arbeit bedeutet dies, dass keine Engpässe in der Produktionsversorgung entstehen. Sofern Material an einem Verbrauchsort benötigt wird, muss dieses auch zur Verfügung stehen (vgl. [Boz-2013]). Die Möglichkeit einer Routenzugsystemsteuerung robust zu agieren, wird maßgeblich durch den Materialumlaufbestand sowie die Anzahl der eingesetzten Transportressourcen beeinflusst. Gleichzeitig lässt sich an diesen beiden Kriterien auch die Effizienz des Systems beurteilen. Je mehr Ressourcen eingesetzt werden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines robusten Systembetriebs und desto niedriger ist die Effizienz. Je weniger Ressourcen eingesetzt werden, desto effizienter wird ein Routenzugsystem betrieben und desto wahrscheinlicher sind Engpässe in der Materialbereitstellung. Eine Versorgungssicherheit von 100 % ist die wichtigste Anforderung in der Produktionsversorgung (vgl. [Ado-2016]). Deshalb wird die Robustheit des

Routenzugsystems als Grundvoraussetzung für alle in dieser Arbeit entwickelten Steuerungsstrategien gesetzt. Um den robusten Systemzustand zu erhalten, werden je nach Strategie unterschiedlich viele Ressourcen benötigt. Eine robuste Steuerungsstrategie, die weniger Ressourcen, d. h. Transportmittel und Umlaufbestand, als eine andere benötigt, wird als effizienter angesehen.

Neben der Entwicklung der dynamischen Steuerungsstrategie sollen drei untergeordnete Fragen für robuste Routenzugsysteme untersucht werden:

1. Welche steuerungsrelevanten Merkmale und Merkmalsausprägungen sind für Routenzugsysteme repräsentativ?

Die Einsatzszenarien und Systemkonfigurationen von Routenzugsystemen sind vielfältig [Lie-2017a, S. 12]. Neben unterschiedlichen systemischen Randbedingungen existieren verschiedene technische und organisatorische Merkmale sowie zahlreiche Ausprägungen [VDI-5586a]. Im Rahmen der Arbeit soll beantwortet werden, welche Merkmalsausprägungen für Routenzugsysteme insbesondere in Kombination der organisatorischen und technischen Gestaltung repräsentativ sind.

2. Inwiefern beeinflusst der Dynamisierungsgrad einer Steuerungsstrategie die Effektivität und Effizienz der Produktionsversorgung?

Eine Strategie zur Steuerung eines Routenzugsystems besteht aus mehreren Entscheidungen. Jede dieser Entscheidungen kann je nach Ausgestaltung dynamischer oder weniger dynamisch sein [Hor-2017]. Im Rahmen der Arbeit soll beantwortet werden, wie sich der Dynamisierungsgrad einer Steuerungsstrategie beschreiben lässt und inwiefern die Effektivität der Strategie und die Effizienz des Routenzugsystems durch einen unterschiedlichen Dynamisierungsgrad der Steuerungsstrategie beeinflusst wird. Die Effektivität einer Strategie beschreibt den Anteil der betrachteten Einsatzszenarien, der durch eine Steuerungsstrategie robust versorgt werden kann.

3. Inwiefern beeinflussen die steuerungsrelevanten Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems die Effektivität und Effizienz der konzipierten dynamischen Steuerungsstrategien?

Grundsätzlich eignen sich Routenzugsysteme für zahlreiche Einsatzszenarien in der Produktionsversorgung [Lie-2017a, S. 12]. Unter bestimmten Einflussfaktoren ist derzeit der Einsatz alternativer Transportkonzepte jedoch sinnvoller [Gün-2012]. Neben der Identifikation der steuerungsrelevanten Merkmalsausprägungen soll im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden, in welchem Maß sich

diese Ausprägungen auf die Effektivität und Effizienz der konzipierten dynamischen Steuerungsstrategien auswirken, und ob der sinnvolle Einsatz von Routenzugsystemen im Vergleich zu derzeitigen Empfehlungen überarbeitet werden sollte.

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der formulierten Forschungsfragen sowie deren Widerspiegelung im Aufbau dieser Arbeit werden im nächsten Abschnitt 1.4 aufgezeigt.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit umfasst neun Kapitel, die aufeinander aufbauend die Forschungsfrage und –unterfragen herleiten und beantworten (siehe Abbildung 1-3).

Ausgehend von den Herausforderungen und den Problemstellungen beim Einsatz von innerbetrieblichen Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung werden Forschungsfragen formuliert sowie die Vorgehensweise zu deren Beantwortung aufgezeigt (Kapitel 1).

Der zur Beantwortung der Forschungsfragen notwendige Stand der Wissenschaft hinsichtlich Routenzugsystemen sowie deren Steuerung wird in Kapitel 2 und 3 erläutert. Durch den Abgleich des Stands der Wissenschaft mit den formulierten Forschungsfragen wird die Forschungslücke herausgearbeitet (Abschnitt 3.4).

Die Untersuchung der identifizierten Forschungslücke wird in den Kapiteln 4 bis 8 vorgestellt. Da die Steuerungsstrategien eine Software repräsentieren, die in ein umgebendes Routenzugsystem eingebettet wird, und die Evaluation der Strategien mittels Simulation erfolgt, orientiert sich das methodische Vorgehen an der Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie der VDI-Richtlinie 3633 (vgl. [VDI-3633b]) in Verbindung mit dem Phasenmodell der Softwareentwicklung (vgl. [Bal-2009, S. 437]). Die Durchführung einer Simulationsstudie gliedert sich in die Phasen Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung, Experimente und Analyse [VDI-3633b]. Beim Phasenmodell der Softwareentwicklung schließen sich an eine Anforderungsanalyse, die Phasen Entwurf der Softwarearchitektur, Implementierung, Test und Betrieb an [Bal-2009, S. 437]. Um die erste Forschungsunterfrage zu beantworten, fokussieren die Untersuchungen in der Systemanforderungsanalyse zunächst die Auswahl repräsentativer Routenzugszenarien als Referenzsysteme (Kapitel 4). Daran schließt sich der Systementwurf der Routenzugsysteme mit der Formalisierung

an. Notwendige Bestandteile der Routenzugsysteme werden durch mathematische Modelle beschrieben (Kapitel 5).

Kapitel 1	Motivation	Produktionsversorgung und Routenzugsystemsteuerung
	Forschungsfragen und Vorgehensweise	
Kapitel 2 und 3	Stand der Wissenschaft	Grundlagen von Routenzugsystemen
		Steuerung von Routenzugsystemen
	Forschungslücke	
Kapitel 4	Systemanforderungsanalyse	Auswahl der Routenzugszenarien
Kapitel 5	Systementwurf	Formalisierung von Routenzugsystemen
Kapitel 6	Softwarearchitektur und -entwurf	Modulare Struktur
		Modulkonzeption
		Modulgestaltung
		Ableitung von Steuerungsstrategien
Kapitel 7	System- und Softwareevaluation	Evaluationsmethodik und -vorgehen
		Verifikation des Systementwurfs
		Bewertung der Steuerungsstrategien
Kapitel 8	Kritische Betrachtung der dynamischen Routenzugsystemsteuerung	
Kapitel 9	Zusammenfassung und Ausblick	

Abbildung 1-3: Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit

In Kapitel 6 werden die Softwarearchitektur und der -entwurf der Steuerungsstrategien erläutert. Ausgehend von einer modularen Struktur der Routenzugsystemsteuerung (Abschnitt 6.1) werden die Inhalte sowie Zusammenhänge der einzelnen Steuerungsmodule konzeptionell modelliert und algorithmisch ausgestaltet (Abschnitt 6.2). Anschließend werden in Abschnitt 6.3 systematisch Steuerungsstrategien aus den Modulen abgeleitet und hinsichtlich ihres Dynamisierungsgrads klassifiziert. Der

Vergleich verschiedener Dynamisierungsgrade, die allgemeine Evaluation der Strategien und Referenzszenarien sowie die Beantwortung der zweiten und dritten Forschungsunterfrage erfolgen in den Kapiteln 7 und 8. Zunächst werden Evaluationsmethodik und -vorgehen dargestellt (Abschnitte 7.1 und 7.2). Danach werden der Systementwurf verifiziert (Abschnitt 7.3) und entwickelte Steuerungsstrategien in Bezug auf die Referenzsysteme bewertet (Abschnitt 7.4) sowie eine Analyse wesentlicher Einflussparameter auf die Effektivität und Effizienz der dynamischen Steuerungsstrategien durchgeführt (Abschnitt 7.5). Im Anschluss an die System- und Softwareevaluation erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit der dynamischen Routenzugsystemsteuerung (Kapitel 8) durch einen Abgleich der Erwartungen an diese sowie den gefundenen Ergebnissen (siehe Abschnitt 8.1). Daneben wird erläutert, inwieweit der Anwendungsbereich von Routenzugsystemen durch den Einsatz von dynamischen Steuerungsstrategien erweitert werden kann (siehe Abschnitt 8.2). Anschließend werden Handlungsempfehlungen für den Einsatz von dynamischen Routenzugsystemsteuerungen gegeben (Abschnitt 8.3).

Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung (Abschnitt 9.1) sowie einem Ausblick. Dieser betrachtet die Weiterentwicklung von dynamischen Routenzugsystemsteuerungen (Abschnitt 9.2) und das Potential von Routenzugsystemen im Hinblick auf die zunehmende Automatisierung in der Produktionsversorgung (Abschnitt 9.3).

2 Grundlagen von Routenzugsystemen

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen von Routenzugsystemen erläutert und der Betrachtungsraum detailliert. Um eine begriffliche Grundlage zu schaffen, werden zunächst wesentliche Definitionen und Bestandteile von Routenzugsystemen dargestellt und als System im Rahmen dieser Arbeit abgegrenzt (Abschnitt 2.1). Anschließend werden Gestaltungskriterien von Routenzugsystemen beschrieben (Abschnitt 2.2). Darauf folgend werden der Anwendungsbereich und die Grenzen für den sinnvollen Einsatz von Routenzugsystemen erörtert (Abschnitt 2.3).

2.1 Systemdefinition und -abgrenzung

Um eine schlanke innerbetriebliche Logistik umzusetzen, werden branchenübergreifend vermehrt Routenzugsysteme zum Transport verwendet [Álv-2009; Lie-2017a, S. 23 f.]. Die Anzahl der eingesetzten Routenzugsysteme hat sich dabei seit 2010 mehr als verdoppelt [Lie-2017a, S. 23 f.].

Die Einsparung von Leerfahrten gegenüber einem konventionellen Direktverkehr mittels Stapler sowie ein mit der Produktion synchronisierter Materialfluss sind nur zwei von zahlreichen Vorteilen, die in der Literatur angeführt werden, um die Effizienz dieses Transportkonzepts zu belegen [Gün-2013, S. 97]. Eine umfassende Übersicht der in der Literatur angeführten Vor- und Nachteile von Routenzugsystemen wurde durch *Martini* erstellt (vgl. [Mar-2017, S. 12 ff.]). Praxisuntersuchungen ergaben, dass sich Unternehmen v. a. eine Standardisierung und Stabilisierung des Versorgungsprozesses sowie eine Reduktion von Beständen und des Transportaufkommens durch die Einführung eines Routenzugsystems versprechen [Gün-2012, S. 27; Lie-2017a, S. 53]. Zahlreiche der angeführten Vor- und Nachteile entstehen durch spezifische Ausgestaltungen des Routenzugsystems und sind in ähnlicher Weise auf einen Direktverkehr mittels Stapler oder fahrerlosem Transportsystem (FTS) übertragbar bzw. bereits für diesen umgesetzt. So führt z. B. der Einsatz eines FTS, das die Produktion per Direktverkehr versorgt, zu einem hoch standardisierten Prozess, der dauerhaft eingehalten wird [Ull-2019, S. 124].

Die Unterschiede in der Betrachtungsebene der Vor- und Nachteile spiegeln sich auch in unterschiedlichen Definitionen eines Routenzugsystems wider. Die Bezeichnung

*innerbetriebliches Routenzugsystem*¹ ist ein in der Literatur diffus definierter Ausdruck [Kle-2017, S. 9; Dew-2020, S. 12]. Eine detaillierte Betrachtung der Definitionsunterschiede verschiedener Autoren liefert *Klenk* (vgl. [Kle-2017, S. 9 ff.]). Nach Definition der VDI-Richtlinie 5586 bedient ein Routenzugsystem mindestens drei innerbetriebliche Haltepunkte durch einen gebündelten Transport. Die Transporteinheiten werden dabei auf definierten Routen bewegt [VDI-5586a]. Diese Definition orientiert sich an in Unternehmen mehrheitlich eingesetzten statischen Routenzugsystemen (vgl. [Lie-2017a, S. 71]). Um die Möglichkeiten bei der Systemplanung und -optimierung zu vergrößern, empfiehlt *Martini* eine Definition auf einem hohen Abstraktionsniveau. Gleichzeitig werden jedoch restriktive Definitionsmerkmale wie der Einsatz flurgebundener Unstetigförderer und das Abfahren definierter Routen verwendet [Mar-2017, S. 8f.]. 80 % der von *Klenk* analysierten Autoren verwenden ebenso fest definierte, statische Routen als Grundlage eines Routenzugsystems [Kle-2017, S. 10]. Die Dynamisierung der Routenzugsystemsteuerung im Rahmen dieser Arbeit erfordert jedoch insbesondere eine Aufweichung der Einschränkung statischer Routen in der allgemeinen Definition von Routenzugsystemen.

In dieser Arbeit sollen die steuerungsrelevanten Ausprägungen von Routenzugsystemen umfassend untersucht werden. Um vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten zu berücksichtigen, wird eine abstrakte Definition eines Routenzugsystems benötigt, die sich am Transportprinzip orientiert. Denn in Abgrenzung zum Direktverkehr operiert ein Routenzugsystem nach dem Prinzip der Transportbündelung, d. h., dass mehrere Transportaufträge gleichzeitig auf einem Transportmittel transportiert werden können. Lediglich aufgrund des gebündelten Transports können Vorteile des Routenzugsystems gegenüber einem Direktverkehr abgeleitet und eine Beurteilung der Effizienzunterschiede der Transportprinzipien getroffen werden [Gün-2013, S. 97]. In Einklang mit *Günthner et al.* wird für ein allgemeines innerbetriebliches Routenzugsystem daher folgende Definition gewählt:

Unter einem innerbetrieblichen Routenzugsystem wird ein innerbetriebliches Transportsystem verstanden, das Transporteinheiten gebündelt auf der Tour eines Transportmittels transportieren kann, um diese von Materialflussquellen einzusammeln und an Materialflüssen zu verteilen [Gün-2013, S. 96].²

¹ Eine Übersicht, der in der Literatur verwendeten Synonyme, liefern *Martini* sowie *Dewitz*: (deutsch) Innerbetriebliches Routenzugsystem, interner Milkrun, zirkulierendes Transportsystem, Routenverkehr, Schleppzugtransport, Logistikbustransport; (englisch) Internal shuttle system, in-plant milk run, tow/ tugger train delivery, logistics train system, mizusumashi, waterspider concept. Variationen in Begrifflichkeit und Schreibweise treten ebenso auf. [Mar-2017, S. 8; Dew-2020, S. 11].

² Der Begriffsbestandteil Routenzug setzt keinen physischen Zug als Transportmittel eines Routenzugsystems voraus. In Anlehnung an die im Duden beschriebenen Wortbedeutungen von Zug und Route/ Routing, sollte Routenzug vielmehr als das „Sichfortbewegen in einer Gruppe“ (vgl. Zug lt. Duden [Dud-o. J.c]) „auf einem besonders günstig gewählten Weg“ (vgl. Route/ Routing lt. Duden [Dud-o. J.a; Dud-o. J.b]) verstanden werden.

Gemäß der oben gewählten Definition werden einige Begriffe näher erläutert.

Die Materialflussquellen eines Routenzugsystems sind die Startpunkte des Materialflusses. Transportmittel holen dort Transporteinheiten ab und transportieren diese zu den Materialflusssenken. Sowohl Quellen als auch Senken können z. B. Lager, Supermärkte oder Produktionsstationen sein. Beide sind über Haltepunkte an das Transportsystem angebunden. Von einem Haltepunkt aus können mehrere Quellen bzw. Senken erreicht werden. Eine Quelle bzw. Senke kann aber auch über mehrere Haltepunkte mit dem Transportsystem verbunden sein. [VDI-5586a]

Die Transporteinheit ist eine organisatorische Einheit einer oder mehrerer Transportgüter, die gemeinsam bewegt werden müssen. Die Transportgüter können sich in Ladungsträgern befinden, welche sich wiederum auf Transporthilfsmitteln befinden können. Eine Transporteinheit kann beispielsweise ein einzelner Klein- oder Großladungsträger oder auch ein Bereitstellregal mit mehreren Ladungsträgern sein. [VDI-5586a]

Durch Transportaufträge wird für jede Transporteinheit bestimmt, von welcher Quelle zu welcher Senke sie transportiert werden soll. Weitere Eigenschaften eines Transportauftrags können z. B. Zeitfenster für das Bereitstellen oder das Aufnehmen der Transporteinheiten sein. [Kle-2017, S. 11]

Die Transportaufträge werden auf einer Tour durch ein Transportmittel von der Materialflussquelle zu den Materialflusssenken bewegt. Die Tour besteht aus den Haupttätigkeiten Fahren, Be- und Entladen des Routenzugs mit Transporteinheiten an den Haltepunkten sowie Nebentätigkeiten. [VDI-5586a]

Als Transportmittel werden im Routenzugsystem häufig „manuell bediente, gleislose Flurförderzeuge“ [Dew-2020, S. 14] verwendet. Auch wenn der Automatisierungsgrad in Routenzugsystemen derzeit noch gering ist, können automatisch oder autonom agierende Transportmittel zum Einsatz kommen [Lie-2017a, S. 13]. Das entscheidende Merkmal ist, dass mehrere Transporteinheiten gleichzeitig transportiert werden können [Kle-2017, S. 11]. Deshalb wird z. B. ein Verbund aus einem Schlepper mit mindestens einem Anhänger empfohlen [VDI-5586a].

Ausgehend von der allgemeinen Definition eines innerbetrieblichen Routenzugsystems wird der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit eingegrenzt (siehe Abbildung 2-1). Dies ist notwendig, um eine detaillierte Untersuchung des betrachteten Systems zu ermöglichen und dennoch ein möglichst umfassendes Bild der real auftretenden Routenzugsysteme zu erstellen. Die Eingrenzung erfolgt auf Basis der Ergebnisse der

Praxisstudie³ von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]), die im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit durchgeführt wurde.

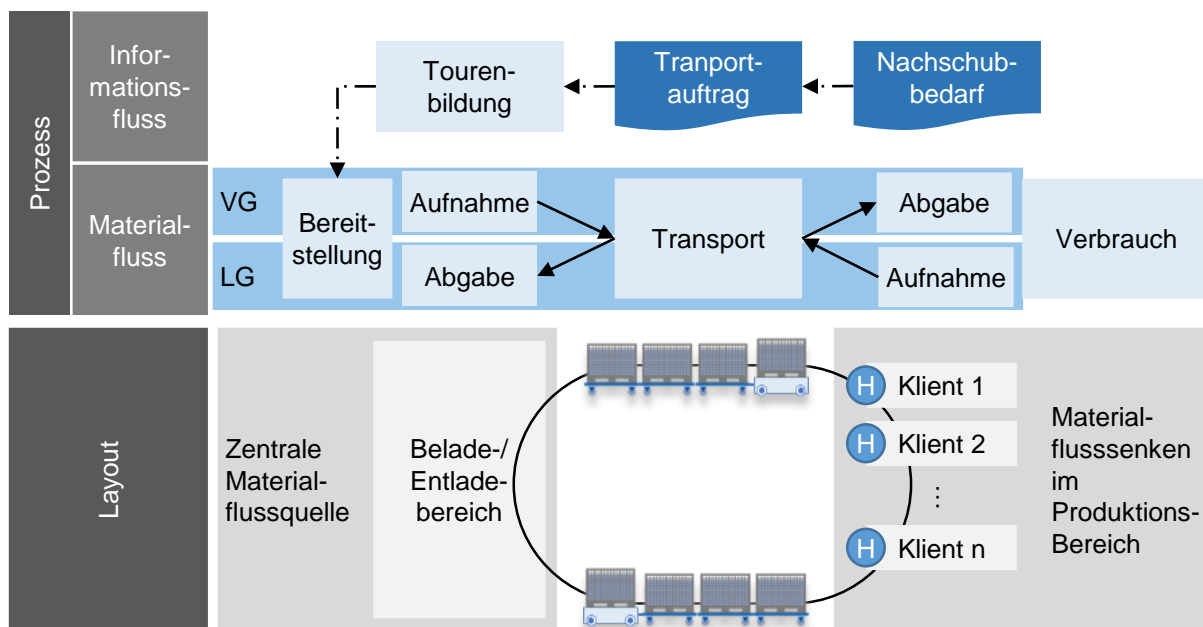


Abbildung 2-1: Schema der in dieser Arbeit betrachteten Routenzugsysteme

Der Betrachtungsraum wird anhand der maßgeblichen Transportaufgabe für Vollgut (VG) im Routenzugsystem eingegrenzt. Die Befragung der Studienteilnehmer ergab, dass zu 91 % die Produktionsversorgung neben der Produktionsentsorgung (4 %) und dem Transport zwischen Lagerstufen (5 %) die primäre Transportaufgabe von Routenzugsystemen ist [Lie-2017a, S. 22]. Nach einer Neuauswertung der im Rahmen der Studie (vgl. [Lie-2017a]) erfassten Daten erfolgt die Produktionsversorgung in 99 % der Routenzugsysteme u. a. ausgehend von zentralen Quellen, z. B. einem automatisierten Lager oder einem Bahnhof. Lediglich in 35 % der Systeme werden VG-Transporteinheiten im Produktionsbereich aufgenommen [Lie-2017a, S. 33]. Transporteinheiten einer Tour stammen bei der Versorgung aus zentralen Quellen zumeist aus einer Materialflussquelle [Lie-2017a, S. 31]. In dieser Arbeit werden daher Routenzugsysteme betrachtet, die ausgehend von einer zentralen Quelle mehrere Materialflusssenken eines Produktionsbereichs mit VG versorgen. Der Routenzugprozess wird auf Informationsflussebene durch Transportaufträge, die durch einen Nachschubbedarf an Material entstehen, initiiert. Diese VG-Transportaufträge werden im Rahmen der Tourenbildung gebündelt und rechtzeitig zum Tourenstart im Beladebereich an der Materialflussquelle bereitgestellt. Der Routenzug nimmt das Material dort auf und transportiert es gebündelt zu den Senken im Produktionsbereich, wo die Einheiten abgegeben werden. Die Materialflusssenken werden im Folgenden auch als Bereitstellorte

³ Im Rahmen eines Online-Fragebogens und weiterführender Experteninterviews wurden 241 valide Teilnehmer zu Planung, Steuerung und Betrieb von Routenzugsystemen befragt [Lie-2017a].

bezeichnet. Im Sinne einer Wertstrombetrachtung stellen die Bereitstellorte die Klienten des Routenzugsystems dar, deren Bedarf an neuem Material durch das Routenzugsystem bedient wird [Gün-2013, S. 114]. Je nach Nachschubsteuerungskonzept wird der Nachschubbedarf auch durch diese Kunden ausgelöst. Des Weiteren kann an den Bereitstellorten Leergut (LG) entstehen, das durch das Routenzugsystem abtransportiert wird [Gün-2012, S. 17]. Die Vollgutaufnahme von Halbfertigerzeugnissen im Produktionsbereich sowie deren Weitertransport zu Materialflusssenken im Produktionsbereich, auch als *Pick-Up and Delivery*⁴ bezeichnet, werden nicht weiter betrachtet.

Die technischen sowie organisatorischen Gestaltungsprinzipien und Randbedingungen der Einsatzszenarien von Routenzugsystemen sind vielfältig [Lie-2017a, S. 12]. Konkrete Gestaltungsmerkmale und deren Ausprägungen werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

2.2 Gestaltung von Routenzugsystemen

2.2.1 Beschreibungsmodelle

Die Grundlage für die Identifikation von repräsentativen Einsatzszenarien und Systemkonfigurationen (Forschungsunterfrage 1) ist eine methodische Beschreibung der Gestaltungsmöglichkeiten von innerbetrieblichen Routenzugsystemen. In der Literatur existieren dazu verschiedene Ansätze, die in Fokus und Detailtiefe variieren. Um die Merkmalsausprägungen in den Systembeschreibungen der folgenden Abschnitte den Ansätzen zuzuordnen, wird eine Indexierung vorgenommen.

Als Basis einer Planungssystematik entwickelt *Brungs* in seiner Dissertation eine Typologie zur systematischen Ermittlung der Gestaltungsalternativen von Routenzugsystemen. Dazu werden ausgehend von den Teilaufgaben eines Routenzugsystems sowie den logistischen Anforderungen Teiltypologien mit dem Stand der Technik erstellt und zu einer gemeinsamen Übersicht zusammengefügt. Die Teiltypologien werden dabei in Kommissioniersystem, Fördermittel, Bereitstellungssystem und Steuerungssystem unterschieden. Die Evaluation der Typologie erfolgt anhand industrieller Fallbeispiele. [Bru-2012, S. 4 f./ 46 ff./ 79 ff.] (Index 1)

Im Rahmen einer ganzheitlichen Planungssystematik für schlanke Logistikprozesse stellen *Günthner et al.* den Routenzug als Umsetzungsvariante der Logistikfunktion Transportieren oder Fördern vor. Neben Definition, Eignung sowie Dimensionierung

⁴ Besonderheiten und Herausforderungen des *Pick-Up and Delivery* werden im Ausblick (siehe Abschnitt 9.2) skizziert.

wird umfangreich auf prozessuale und technische Gestaltungsmöglichkeiten eingegangen. Der Fokus liegt darauf, Planern eine ganzheitliche Entscheidungshilfe für die Erstellung von Gesamtkonzepten zu geben. [Gün-2013, S. 96 ff.] (Index 2)

Droste sowie *Droste und Deuse* fokussieren die Beschreibung von Routenzugsystemen mit Parametern. Als Grundlage der parameterbasierten Modellierung werden zunächst grundsätzliche Prozessschritte der Materialbereitstellung in der Literatur identifiziert und daraus organisatorische sowie technische Gestaltungsfelder abgeleitet. Die daraus entstehende Morphologie enthält die Bereiche Bereitstellungselement, Ladungsträger, Steuerung, Kommissionierung, Transport und Abgabe. Die entwickelte Charakteristik von Routenzugsystemen wird durch eine empirische Untersuchung mit 84 Teilnehmern evaluiert. [Dro-2013b, S. 27 ff.; Dro-2013a, S. 19 ff.] (Index 3)

Mit dem Ziel der Systemanalyse und -optimierung erstellen *Martini* sowie *Martini et al.* auf Basis der Literatur eine Wissensbasis für Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen. Die Erkenntnisse basieren auch auf der Erstellung der VDI-Richtlinie 5586. [Mar-2014b; Mar-2017, S. 3 f./ 41 ff.] (Index 4)

Mit der VDI-Richtlinie 5586 aus dem Jahr 2016 gibt der *VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.* eine Empfehlung zur Gestaltung von Routenzugsystemen. Die dargestellten Morphologien unterstützen bei der Entscheidung für den Einsatz und die Konfiguration sowie bei der Dimensionierung einfacher Routenzugsysteme. Die Beschreibung der Systeme wird dabei in Randbedingungen und technische sowie organisatorische Gestaltungsmerkmale unterteilt. Die Funktionsweise der Morphologie wird durch eine Einordnung von Praxisbeispielen verdeutlicht. [VDI-5586a; VDI-5586b] (Index 5)

Keuntje sowie *Günthner und Keuntje* erstellen eine Methode für die Planung und Bewertung von Routenzugsystemen in der Grobplanungsphase. Der Fokus der Planungsmethode liegt auf der integrierten Betrachtung von Prozess und Technik, insbesondere in der Produktionsversorgung mit Großladungsträgern (GLT). Dazu wird ein Prozessbaukasten zur Bildung von Planungsvarianten entwickelt. Dieser betrachtet detailliert die Planungsdimensionen Technik, Prozess und Steuerung. Zur Dimensionierung und Bewertung von Planungsalternativen werden zusätzliche MTM⁵-Datenkarten für das Ladungsträgerhandling entwickelt. [Keu-2019, S. 184 ff.; Gün-2016, S. 18 / 51 ff.] (Index 6)

Klenk et al. beschreiben Gestaltungsmerkmale und -ausprägungen von Transportstrategien durch die Festlegung der Routenführung und Abfahrtszeitpunkte sowie die

⁵ MTM ist die Abkürzung für *Methods Time Measurement*. Die verwendeten Zeitbausteinsysteme basieren auf den beiden Systemen *Universelles Analysiersystem (UAS)* (vgl. [MTM-2004]) und *Standardvorgänge Logistik* (vgl. [MTM-2007]). [Keu-2016]

Transportauftrags- und Fahrzeugdisposition [Kle-2015b]. Die Auswirkung von schwankenden Transportbedarfen auf die Leistungsfähigkeit von Routenzugsystemen wird ebenfalls durch *Klenk* untersucht. Dazu wird ein analytisches Modell auf Basis von zeitdiskreter Bedientheorie entwickelt. Damit können das Verhalten vielfältiger Systemkonfigurationen bewertet und Empfehlungen für die Systemplanung gefolgert werden. Als Basis für die Untersuchungen werden repräsentative Einsatzszenarien von Routenzugsystemen mit einem Fokus auf den Routenzugprozess abgeleitet. Bei der Beschreibung der Systeme werden außerdem die Transporteinheiten, -mittel, -steuerung und -strategien sowie unterschiedliche Abrufprinzipien berücksichtigt. Die Identifikation der Einsatzszenarien erfolgt durch die Auswertung empirischer Untersuchungen (vgl. u. a. [Gün-2012; Lie-2017a]) [Kle-2017, S. 5/ 13 ff./ 35 f./ 81 ff.]. Des Weiteren betrachten *Klenk und Galka* verschiedene Formen der Tourenbildung und dynamischen Abfahrtszeitbestimmung [Kle-2019]. (Index 7)

Im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit entstanden zudem drei Weiterentwicklungen bisheriger Ansätze zur ganzheitlichen Beschreibung von Routenzugsystemen.

Hormes et al. entwickeln eine Morphologie für statische und dynamische Steuerungsansätze in Routenzugsystemen. Dabei werden Ausprägungen der Tourenbildung, des Scheduling, des Routings und der Ressourcenzuteilung erfasst. Das Beschreibungsmodell wird anhand empirischer Analysen (vgl. [Lie-2017a]) und industrieller Fallstudien evaluiert. [Hor-2017] (Index 8)

Lieb et al. untersuchen die Einflussfaktoren der Transportbedarfsschwankungen in Routenzugsystemen. Mittels ereignisdiskreter Simulation wird gezeigt, dass Zeitverzögerungen in der Informationsübermittlung negative Auswirkungen auf die Versorgung getakteter Variantenproduktionen haben. Als Basis dafür werden Prozessalternativen für die Wahrnehmung und die Nachfrage des Nachschubbedarfs beschrieben. [Lie-2018a] (Index 9)

Basierend auf den Ergebnissen einer Praxisstudie (vgl. [Lie-2017a]) und *Günthner und Keuntje* (vgl. [Gün-2016]) untersuchen *Lieb et al.* den Einfluss von Handhabungstätigkeiten in Routenzugsystemen. Dazu werden zunächst eine Beschreibung der Prozessorganisation, der technischen Gestaltung und der Infrastruktur vorgestellt und anschließend die Handhabungstätigkeiten an Quelle und Senken eines Routenzugsystems in Form einer Zustandsautomatenbeschreibung modelliert. [Lie-2019] (Index 10)

Neben den theoretischen Beschreibungsmodellen von Routenzugsystemen fokussiert die Literatur ebenso die empirische Untersuchung der Einsatzszenarien und

Systemkonfigurationen in der Praxis. Bei zahlreichen Autoren erfolgt die Evaluation der erstellten Beschreibungsmodelle durch eine Einordnung weniger Fallbeispiele. Empirische Untersuchungen größeren Umfangs wurden insbesondere durch *Droste* (s. o.) sowie durch *Günthner et al.* und *Lieb et al.* durchgeführt (vgl. [Dro-2013b, S. 27 ff.; Gün-2012; Lie-2017a]).

Ein Ziel der empirischen Studien von *Günthner et al.* sowie *Lieb et al.* ist die systematische Erfassung der industriellen Auftrittshäufigkeiten von Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen (vgl. [Gün-2012; Lie-2017a]).

Auf Basis von Prozessanalysen und leitfadengestützten Experteninterviews bei 16 Unternehmen ermitteln *Günthner et al.* Randbedingungen, Konzepte sowie Erfolgsfaktoren und Probleme bei der Planung und Einführung von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung. Dabei werden neun typische Routenzugprozesse, verschiedene technische Lösungen sowie Be- und Entladekonzepte identifiziert. [Gün-2012, S. 12/38 ff.] (Index 11)

Lieb et al. erweitern die Untersuchungen in ihrer Studie, die im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit entstanden ist, auf einen umfassenden Teilnehmerkreis. Per Online-Fragebogen und einzelnen vertiefenden Experteninterviews werden insgesamt 241 valide Studienteilnehmer zu Einsatz, Planung und Betrieb von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung befragt. Neben der Erfassung bewährter Einsatzszenarien und Systemkonfigurationen sowie technischer Lösungen und Steuerungsprinzipien werden die Potentiale neuer Konzepte und Technologien erörtert. [Lie-2017a, S. 17 ff.] (Index 12)

Aufgrund der unterschiedlichen Zielstellungen variieren die erläuterten Beschreibungsmodelle in Umfang und Detailtiefe. Um eine einheitliche Grundlage für den Betrachtungsumfang dieser Arbeit zu schaffen, werden diese Ansätze im Folgenden in einer gemeinsamen Übersicht der Merkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen als Morphologie zusammengefasst. Ziel der Morphologie ist es, alle für die nachfolgenden Untersuchungen notwendigen Gestaltungsmöglichkeiten mit hinreichendem Detaillierungsgrad zu erfassen, so dass relevante Einflussfaktoren auf Steuerungsstrategien von Routenzugsystemen evaluiert werden können. Die konkreten Verweise auf die bestehende Literatur zur Beschreibung von Routenzugsystemen sind als Index in der Tabellenüberschrift sowie für jede Merkmalsausprägung der Morphologie vermerkt. Die Indexierung erfolgt im gesamten Abschnitt einheitlich der vorgestellten Reihenfolge (s. o.). Basierend auf der VDI-Richtlinie 5586 wird die Morphologie in die Bereiche Randbedingungen sowie technische und organisatorische Gestaltung untergliedert (vgl. [VDI-5586a]). Als besonders komplexen Bestandteil eines

Routenzugsysteme werden die Handhabungsprozesse gesondert betrachtet. Ebenso werden Merkmale der Tourenbildung hervorgehoben, da diese für die zu entwickelnden Steuerungsstrategien besonders relevant sind.

2.2.2 Randbedingungen

Bei Planung und Betrieb von Routenzugsystemen müssen Randbedingungen berücksichtigt werden, die von außen auf das System wirken und nicht durch das Routenzugsystem beeinflusst werden können. Oft schränken die Randbedingungen die Lösungsmöglichkeiten bei der Systemkonfiguration deutlich ein [Gün-2016, S. 57 f.]. Je nach Systemgrenze werden unterschiedliche Merkmale als Randbedingung angesehen. Die für diese Arbeit geltenden Randbedingungen sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

In Abschnitt 2.1 wurde der Betrachtungsgegenstand der Arbeit auf Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung aus einer zentralen Quelle festgelegt. Das Organisationsprinzip der Produktion hat einen Einfluss auf das Transportlayout im Routenzugsystem. Bei einer Fließfertigung existieren häufig längere Wege entlang der Produktionslinie ohne Abzweigungsmöglichkeiten, wohingegen bei einer Gruppen- oder Werkstattfertigung flexiblere Möglichkeiten bei der Routenbildung vorherrschen [Lie-2017a, S. 25].

Die Transporteinheiten im Routenzugsystem werden häufig durch die Anforderungen der Produktion vorgegeben und sind maßgeblich für die Routenzugsystemplanung [Gün-2012, S. 39]. Sie beeinflussen u. a. die Prozessgestaltung sowie die Zykluszeit einer Tour und die technische Umsetzung des Transportmittels [Gün-2016, S. 61 ff.]. Während Material ohne Ladungsträger oder in Kleinladungsträgern (KLT) oft vom Mitarbeiter gehandhabt werden kann, benötigen GLT Handhabungshilfsmittel [Gün-2013, S. 99].

Jede Transporteinheit ist einem Transportauftrag zugeordnet, der aus einem Transportbedarf entsteht. Analog der Materialablaufplanung nach *Klug* werden bei der Ermittlung von Transportbedarfen zwei Prinzipien unterschieden. Bei einer bedarfsorientierten Ermittlung wird auf Basis des Produktionsprogramms sowie der Teilstücklisten der zukünftige Verbrauch des Materials berechnet. Ist das Produktionsprogramm stabil, können die Bestände im Produktionsbereich bei einer hochfrequenten Versorgung geringgehalten werden, da der Verbrauch in einem gewissen Toleranzbereich prognostizierbar ist. Bei einer verbrauchsorientierten Ermittlung der Transportaufträge, z. B. Kanban, dient der tatsächliche Verbrauch des Materials in der Produktion als Auslöser für den Transportbedarf. Deswegen werden bei diesem Prinzip redundante Bestände im Produktionsbereich vorgehalten, z. B. mindestens zwei Ladungsträger

beim Kanban-Prinzip. Der Transportbedarf wird dann ohne eine aufwändige IT-Steuerung in selbststeuernden Regelkreisen ermittelt. [Klu-2018, S. 199 ff.; VDI-5586a]

Nach der Ermittlung des Transportbedarfs muss dieser dem Routenzugsystem mitgeteilt werden. Diese Mitteilung kann in die Wahrnehmung sowie die Nachfrage des Transportbedarfs unterteilt werden. Bei der bedarfsorientierten Ermittlung der Transportbedarfe entsteht der Transportauftrag elektronisch durch das Produktionsprogramm. Bei der verbrauchsorientierten Ermittlung kann sowohl eine manuelle als auch eine elektronische Nachfrage des Transportbedarfs nach der Wahrnehmung durch einen Mitarbeiter oder durch einen Sensor am Bereitstellplatz erfolgen. Beispielsweise wird der Transportbedarf durch den Routenzugfahrer auf seiner Tour wahrgenommen und per Scan an die Systemsteuerung übermittelt (elektronisch) oder der leere Ladungsträger wird mit zur Vollgutquelle genommen (manuell), um wieder aufgefüllt zu werden. [Lie-2018a]

Tabelle 2-1: *Randbedingungen eines Routenzugsystems (vgl. [Bru-2012, S. 22/ 75 f.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [VDI-5586a]₅; [Gün-2016, S. 56 f.; Keu-2019, S. 189 f.]₆; [Kle-2017]₇; [Lie-2018a]₉; [Gün-2012, S. 38]₁₁; [Lie-2017a, S. 21 ff.]₁₂)*

Merkmal	Merkmalsausprägungen				
Organisations-/ Fertigungs- prinzip	Fließfertigung [7;12]		Gruppenfertigung [12]		Werkstattfertigung [7;12]
Transport- einheiten	Kein Ladungsträger [3;4;5;7;12]		GLT [2;3;4;5;7;11;12]		KLT [2;3;4;5;7;11;12]
Ermittlung von Transport- bedarfen	Bedarfsorientiert [1;3;4;5;6;7;9;11;12]			Verbrauchsorientiert [1;3;4;5;6;7;9;11;12]	
Wahrnehmung des Transport- bedarfs	Routenzug- fahrer [1;4;5;6;7;9;12]	Zusätzlicher Logistikmitar- beiter [4;5;7;9;12]	Produktions- mitarbeiter [4;5;6;7;9;12]	Sensor [1;4;5;6;7;9;12]	Produktions- programm [4;5;6;7;9;12]
Nachfrage des Transport- bedarfs	Elektronisch [1;4;5;6;7;9;12]			Manuell [1;4;5;6;7;9;12]	

2.2.3 Organisatorische Gestaltung

Während Randbedingungen von außen an das Routenzugsystem gestellt werden, sind Merkmale der organisatorischen Gestaltung eigenständig innerhalb der Systemgrenzen wählbar. Tabelle 2-2 stellt die Morphologie der organisatorischen Gestaltungsmerkmale eines Routenzugsystems dar.

Tabelle 2-2: *Organisatorische Gestaltung eines Routenzugsystems (vgl. [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [VDI-5586a]₅; [Gün-2016, S. 56; Keu-2019, S. 189]₆; [Kle-2017, S. 12]₇; [Gün-2012, S. 39]₁₁; [Lie-2017a, S. 29 ff/ 38 f./ 81]₁₂)*

Merkmal	Merkmalsausprägungen			
	1:1 [4;5]	1:n	m:1 [4;5]	m:n
Bereitstellort-Haltepunkt Beziehung				
Leergutabwicklung	Integriert [2;4;6;7;11;12]		Nicht integriert [2;4;6;11;12]	
Art der Leergutrückführung	Zur Leergutsammelstelle [3]		Zur Wiederbefüllung mit Material [3]	
Anzahl Ladungsträgergrößen je Tour	Kein Ladungsträger [4;5;12]	Eine Ladungsträgergröße [4;5;11;12]	Mehrere Ladungsträgergrößen [4;5;11;12]	
Beladungsreihenfolge der Tour	Beliebig [2;4;5]		Sequenziert [2;4;5]	

Die Bereitstellorte der Klienten sind an das Routenzugsystem über Haltepunkte angebunden. Je nach Ausgestaltung kann ein Bereitstellort eineindeutig einem Haltepunkt (1:1) zugeordnet sein, oder ein Haltepunkt verknüpft mehrere Bereitstellorte (m:1) mit dem Routenzugsystem [VDI-5586a]. Die bestehende Literatur ergänzend können ein (1:n) oder mehrere (m:n) Bereitstellorte auch durch mehrere Haltepunkte gleichzeitig erreicht werden.

Wird Material zu den Klienten in Ladungsträgern geliefert, entsteht durch den Verbrauch des Materials häufig Leergut, das entweder zu einer Leergutsammelstelle oder an die Materialflussquelle zur Wiederbefüllung transportiert werden muss [Dro-2013b, S. 44]. In dieser Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass sich die Leergutsammelstelle an der Materialflussquelle befindet. Der Leerguttransport kann entweder in die Vollgut-Tour integriert sein oder als zusätzlicher reiner Leerguttransport stattfinden [Lie-2017a].

Die in der Produktion bereitzustellenden Transporteinheiten sind häufig nicht einheitlich [Lie-2017a, S. 29 ff.]. Dennoch werden die einzelnen Touren in einem Routenzugsystem meist mit einer einheitlichen Ladungsträgerart durchgeführt. Dies liegt u. a. an den technischen Anforderungen an die Be- und Entladung [Gün-2012, S. 55 ff.]. Allerdings gibt es auch die Möglichkeit gemischter Touren mit mehreren Ladungsträgerarten. Diesem Konzept wird ein großes Potential zugesprochen, um die Produktionsversorgung flexibler und effizienter zu gestalten [Lie-2017a, S. 81].

Die Effizienz in der Aufnahme und Abgabe der Transporteinheiten zum und vom Transportmittel kann ebenso durch eine optimierte, vorgegebene Beladungsreihenfolge der Tour verbessert werden. Ist beispielsweise ein Abkuppeln von Anhängern erforderlich, sollte die zuerst zu bereitstellende Transporteinheit zuletzt an einen Anhängerverband angekoppelt werden. Sofern kein Leergutanhängen aufgenommen wird, werden die erforderlichen Kuppelvorgänge dadurch erheblich reduziert. [Gün-2012, S. 49]

2.2.4 Gestaltung der Handhabungsprozesse

Die organisatorische Gestaltung der Handhabungsprozesse in Routenzugsystemen ist besonders vielfältig [Lie-2017a, S. 37]. Da jeder Prozess Vor- und Nachteile hat, müssen die Randbedingungen, Anforderungen und die Systemgröße bei der Wahl eines Prozesses berücksichtigt werden [Gün-2012, S. 46]. Die Handhabungsprozesse beinhalten die Aufnahme und Abgabe von Voll- und Leerguteinheiten an Materialflussquelle und den Klienten sowie die Fahrt zwischen diesen. Die Handhabungsprozesse an den Quellen und Klienten können aus Perspektive der Tour in vorbereitende, durchführende und nachbereitende Tätigkeiten unterteilt werden [Lie-2017a, S. 37] (siehe Abbildung 2-2).

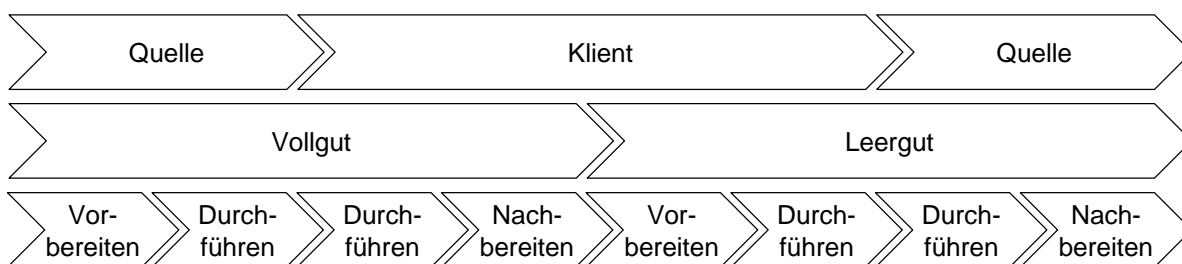


Abbildung 2-2: Schematischer Aufbau des linearisierten Handhabungsprozesses in Routenzugsystemen

Je nach Prozessstruktur werden die Routenzugsysteme als einstufig oder mehrstufig bezeichnet. Einstufig bedeutet, dass alle beschriebenen Tätigkeiten innerhalb einer Tour durchgeführt werden. Bei mehrstufigen Systemen können Tätigkeiten parallel durch unterschiedliche Ressourcen von der Tour entkoppelt bearbeitet werden [Kle-

2017, S. 90 ff.]. Zusätzliche Tätigkeiten, wie z. B. die Bestätigung von einzelnen Handhabungstätigkeiten per Scan, können ebenso Teil der Prozessgestaltung sein [Lie-2019], werden im Folgenden aber nicht explizit betrachtet.

Vorbereiten an der Quelle

Bei der Produktionsversorgung mit Vollgut aus zentralen Quellen müssen die Vollgut-Transporteinheiten an der Quelle zunächst vorbereitet werden [Lie-2017a, S. 37] (siehe Tabelle 2-3). Dies kann zum einen Tätigkeiten wie das Auslagern und das Bereitstellen der Einheiten, z. B. an einen Routenzugbahnhof, zum anderen auch das Kommissionieren der Transporteinheiten in einem Supermarkt umfassen. Einerseits können diese Tätigkeiten in die Tour integriert sein und z. B. durch einen Routenzugfahrer durchgeführt werden. Andererseits kann die Vorbereitung durch eine weitere Ressource, z. B. einen Logistikmitarbeiter oder ein automatisches Lager, entkoppelt von der Tour erfolgen [Gün-2012, S. 41 ff.].

Tabelle 2-3: Vorbereitende Handhabungsprozesse an der Quelle (vgl. [Bru-2012, S. 54 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [Mar-2014b]₄; [VDI-5586a]₅; [Kle-2017, S. 87 ff.]₇; [Gün-2012, S. 41 ff.]₁₁; [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen		
Merkmalsausprägungen			
Tätigkeit	Bereitstellen [1;2;5;7;11;12]	Auslagern [1;2;11;12]	Kommissionieren [1;2;3;4;5;11]
Dimension	Integriert [1;2;3;4;5;7;11;12]		Entkoppelt [1;2;3;4;5;7;11;12]
Art	Manuell [1;2;4;5;7;11;12]		Automatisch [1;5;7;11;12]

Durchführen an der Quelle

Die vorbereiteten Vollgut-Transporteinheiten werden an der Quelle auf den Routenzug geladen (Aufnehmen). Ebenso können am Ende der Tour die Leergut-Transporteinheiten vom Routenzug entladen werden (Abgeben). Beide Tätigkeiten können wiederum in die Tour integriert oder von dieser entkoppelt stattfinden und auf manuelle oder automatische Art, z. B. mittels Drive-Thru Regalen (vgl. [Dew-2012]), durchgeführt werden [Lie-2017a, S. 37]. Diese Tätigkeiten können auf unterschiedliche Weise erfolgen (siehe Tabelle 2-4). Entweder werden Transporteinheiten individuell gehandhabt oder im Verbund, wenn z. B. ein kompletter Anhängerverband von einem Schlepper abgekoppelt wird. Daneben gibt es die Möglichkeit, dass der Routenzugfahrer sein Fahrzeug wechselt und mit einem vorbeladenen Fördermittel die nächste Tour startet [Gün-2012, S. 39].

Tabelle 2-4: Durchführende Handhabungsprozesse an der Quelle (vgl. [Bru-2012, S. 54 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [VDI-5586a]₅; [Gün-2016, S. 55 f.; Keu-2019, S. 188 f.]₆; [Kle-2017, S. 87 ff.]₇; [Lie-2019]₁₀; [Gün-2012, S. 39 ff.]₁₁; [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)

Merkmal	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Aufnehmen [1;2;4;5;6;7;10;11;12]	Abgeben [2;4;5;6;7;10;12]	
Dimension	Integriert [1;2;4;5;6;7;10;11;12]	Entkoppelt [2;4;5;6;7;10;11;12]	
Art	Manuell [1;2;4;5;6;7;10;11;12]	Automatisch [1;4;5;6;7;10;11;12]	
Weise	Einzel [2;4;5;6;7;10;11]	Verbund [2;4;5;6;10;11]	Zugwechsel [2;6;10;11]

Nachbereiten an der Quelle

Nachdem die Leergut-Transporteinheiten vom Routenzug entladen wurden, werden diese für einen nachfolgenden Prozess bereitgestellt. Je nach Systemen werden die Ladungsträger auch sortiert oder direkt eingelagert. Diese Tätigkeiten können wiederum in die Tour integriert, z. B. durch den Routenzugfahrer selbst, oder von der Tour entkoppelt sowohl manuell als auch automatisch erfolgen [Lie-2017a, S. 37 ff.] (siehe Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Nachbereitende Handhabungsprozesse an der Quelle (vgl. [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [VDI-5586a]₅; [Kle-2017, S. 87 ff.]₇; [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)

Merkmal	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen [2;5;7;12]	Einlagern [12]	Sortieren [2;12]
Dimension	Integriert [2;5;7;12]	Entkoppelt [2;5;12]	
Art	Manuell [2;5;7;12]	Automatisch [5;12]	

Vorbereiten an der Senke

Auch an den Klienten eines Routenzugsystems fallen vorbereitende Handhabungsprozesse an (siehe Tabelle 2-6). In den in dieser Arbeit betrachteten Systemen muss das Leergut für die Beladung auf den Routenzug bereitgestellt werden. Z. B. muss der

Routenzugfahrer das Leergut erst von der Produktionsstation zum Haltepunkt transportieren, um es anschließend auf den Routenzug zu laden. Die Literatur ergänzend ist je nach System aber auch ein Auslagern oder Kommissionieren der Transporteinheiten an den Klienten denkbar. Dimension und Art der vorbereitenden Tätigkeiten gestalten sich analog der bisher beschriebenen Handhabungsprozesse [Lie-2017a, S. 37 ff.].

Tabelle 2-6: Vorbereitende Handhabungsprozesse an der Senke (vgl. [VDI-5586a]₅; [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen		
Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen [5;12]	Auslagern	Kommissionieren
Dimension	Integriert [5;12]		Entkoppelt [5;12]
Art	Manuell [5;12]		Automatisch [5;12]

Durchführen an der Senke

Die durchführenden Handhabungstätigkeiten an den Klienten des Routenzugsystems sind das Aufnehmen und Abgeben der Transporteinheiten [Dro-2013b, S. 32 ff.] (siehe Tabelle 2-7).

Tabelle 2-7: Durchführende Handhabungsprozesse an der Senke (vgl. [Bru-2012, S. 68 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [VDI-5586a]₅; [Kle-2017, S. 87 ff.]₇; [Lie-2019]₁₀; [Gün-2012, S. 41 ff.]₁₁; [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen	
Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen	
Tätigkeit	Aufnehmen [2;3;4;5;7;10;11;12]	Abgeben [1;2;3;4;5;7;10;11;12]
Dimension	Integriert [1;2;3;4;5;7;10;11;12]	Entkoppelt [4;5;12]
Art	Manuell [1;2;3;4;5;7;10;11;12]	Automatisch [4;5;10;12]
Weise	Einzel [1;2;3;4;5;7;11]	Verbund [1;3;4;5]

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Systemen wird Vollgut vom Zug entladen, und Leergut kann auf den Routenzug geladen werden. Dimension und Art dieser Tätigkeiten erfolgen analog den Handhabungsprozessen an der Materialflussquelle. Ebenso können die Transporteinheiten einzeln oder im Verbund gehandhabt werden [Bru-2012, S. 68 ff.]. Ein Wechsel des Routenzugs ist allerdings nicht möglich.

Nachbereiten an der Senke

Nachdem die Vollgut-Transporteinheiten vom Routenzug entladen wurden, müssen diese am Klienten, z. B. in einem Regal oder auf einer Bodenfläche, bereitgestellt werden. Dies kann als Bestandteil der Tour, z. B. durch den Routenzugfahrer, außerhalb der Tour, z. B. durch einen Line-Runner, der für einen abgegrenzten Produktionsbereich verantwortlich ist, erfolgen [Dro-2013b, S. 44]. Ebenso können ein Sortieren durch eine Vereinzelnung der Materialien [Bru-2012, S. 70] oder das Einlagern der Transporteinheiten erforderlich sein.

Tabelle 2-8: *Nachbereitende Handhabungsprozesse an der Senke (vgl. [Bru-2012, S. 68 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [VDI-5586a]₅; [Kle-2017, S. 87 ff.]₇; [Gün-2012]₁₁; [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)*

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen [1;2;3;5;7;11;12]	Sortieren [1]	Einlagern
Dimension	Integriert [1;2;3;5;7;11;12]		Entkoppelt [3;5;12]
Art	Manuell [1;2;5;7;11;12]		Automatisch [5;12]

Durchführen der Fahrt

Die Prozesse an Quelle und Senken werden durch die Fahrt des Routenzugs verbunden. Diese kann manuell, d. h. mit einem Routenzugfahrer, oder automatisch, z. B. per fahrerlosem Transportfahrzeug (FTF), erfolgen [Lie-2017a, S. 37 ff.] (siehe Tabelle 2-9).

Tabelle 2-9: *Durchführen der Fahrt einer Tour (vgl. [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃, [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄, [Kle-2017, S. 87 ff.]₇, [Lie-2017a, S. 37 ff.]₁₂)*

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen	
Art	Manuell [3;4;7;12]	Automatisch [3;4;12]

2.2.5 Technische Gestaltung

Zentraler Bestandteil jedes Routenzugsystems ist die technische Gestaltung des Transportmittels. Je nach Randbedingungen, z. B. Fertigungslayout oder Transporteinheiten, sowie Prozess, z. B. Handhabung durch den Routenzugfahrer oder eine automatische Infrastruktur, sind unterschiedliche Konzepte geeignet [Gün-2012, S. 46 ff.]. Besonders bei der manuellen Handhabung von Transporteinheiten kann eine optimierte technische Gestaltung die Ergonomie des Prozesses erheblich verbessern [Keu-2017]. Als Transportmittel sind in der Literatur verschiedene Arten aufgeführt (siehe Tabelle 2-10). Häufig werden Schleppzüge eingesetzt, um Material auf einer Tour zu mehreren Haltepunkten im Produktionsbereich zu transportieren oder dieses von dort abzuholen. Ebenso kann der gebündelte Transport aber auch mit einem Niederhubkommissionierer, Stapler o. ä. erfolgen [Lie-2017a, S. 44 f.]. Durch zusätzliche Anhänger können die Transportkapazität des Transportmittels und damit die Tourenkapazität erhöht werden [Mar-2017, S. 47]. Hier treten sowohl Anhängerverbände mit einheitlichen als auch mit unterschiedlichen technischen Konzepten auf [VDI-5586a]. Daneben werden in der Literatur verschiedene Antriebs- und Bedienarten (vgl. [VDI-5586a]) sowie technische Details, wie die Art der Feststellbremse (vgl. [Gün-2016, S. 86 f.]), beschrieben. Diese Details werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

Tabelle 2-10: *Transportmittel in einem Routenzugsystem (vgl. [Bru-2012, S. 64 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [VDI-5586a]₅; [Gün-2016, S. 52; Keu-2019, S. 184 f.]₆; [Kle-2017, S. 19 ff.]₇; [Gün-2012, S. 38/ 46 ff.]₁₁; [Lie-2017a, S. 44 f.]₁₂)*

Merkmal	Merkmalsausprägungen		
Art des Transportmittels	Schlepper [1;2;3;4;5;6;7;11;12]	Niederhubkommissionierer [1;3;7;11;12]	Sonstiges Transportmittel (Stapler, FTS, Transportwagen, etc.) [1;2;4;7;12]
Homogenität des Anhängerverbands	Keine Anhänger [4;11]	Ein Konzept [4;5;11;12]	Mehrere Konzepte [4;5;11;12]

Die technischen Konzepte der Anhänger haben einen deutlichen Einfluss auf die Zykluszeit [Lie-2019]. Prinzipiell werden diese in Transportwagen, Ein-/ Aufschubkonzept sowie Rollenverschiebesystem unterteilt [Gün-2016, S. 52] (siehe Tabelle 2-11). Während für GLT-Transporteinheiten alle drei Konzepte möglich sind, werden KLT-Transporteinheiten mit einem Transportwagen bewegt. Häufig haben KLT-Transportwagen geneigte Ebenen, wodurch die Be- und Entladeseite des Anhängers vorbestimmt ist [Lie-2017a, S. 44 ff.]. Ebenso haben die Ein-/ Aufschubkonzepte bei GLT-Transporten

mit wenigen Ausnahmen vorbestimmte Be- und Entladeseiten, z. B. C-Frames [Mar-2017, S. 77 ff.]. Können Materialflussquelle und -senke nicht auf der richtigen Seite angefahren werden, verlängern sich die Handhabungszeiten, oder die Be- und Entladung ist nicht möglich [Lie-2019]. Bei GLT-Transporten mit Ein-/ Aufschubkonzept sind meist zusätzliche Hilfsmittel, wie z. B. Rolluntersetzer für die Transporteinheiten, erforderlich, damit die Einheiten gehandhabt werden können. Dahingegen ist die Transporteinheit bei GLT-Transportwagen der Anhänger selbst [Lie-2017a, S. 47 f.]. Bei Aufnahme und Abgabe dieser Transporteinheit wird der Anhänger an- bzw. abgekuppelt. Dafür existieren verschiedene technische Umsetzungen (vgl. [Keu-2019, S. 186]). Technische Details wie Lenksysteme (vgl. [Ulr-2014]), Medienversorgung (vgl. [Mar-2017, S. 77 ff.]) und Hubfunktionen der Anhänger (vgl. [Gün-2016, S. 150]) oder Rollenmaterial und -anordnung (vgl. [Keu-2019, S. 187 f.]) werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Tabelle 2-11: *Allgemeine technische Konzepte der Anhänger (vgl. [Bru-2012, S. 64 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [Gün-2016, S. 52 f.]; [Keu-2019, S. 184 ff.]₆; [Kle-2017, S. 19 ff.]₇; [Lie-2019]₁₀; [Gün-2012, S. 46 ff.]₁₁; [Lie-2017a, S. 47 f.]₁₂)*

Merkmal	Merkmalsausprägungen		
Anhänger-konzept	Transportwagen [1;2;4;6;7;10;11;12]	Ein-/ Aufschubkonzept [2;4;6;7;10;11;12]	Rollenverschiebesystem [2;4;6;7;10;11;12]

2.2.6 Gestaltung der Tourenbildung

Um Touren im Routenzugsystem vollständig festzulegen, müssen unterschiedliche Merkmale berücksichtigt werden (siehe Tabelle 2-12). Die Ausprägung eines Merkmals beeinflusst oft die Lösungsmöglichkeiten eines anderen Merkmals. Bei Planung und Betrieb von Routenzugsystemen werden die Entscheidungen bei der Tourenbildung daher oft integriert getroffen [Lie-2017a, S. 63 ff.]. Die Tourenbildung ist Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Arbeit. In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über die groben Konzepte gegeben, die in der Literatur beschrieben werden. Eine detailliertere Untersuchung des Stands der Technik zur Tourenbildung erfolgt in Kapitel 3.

Die Bündelung von Transportaufträgen auf einer Tour eines Transportmittels ist die Basis für die Effizienz eines Routenzugsystems [Gün-2013, S. 97]. Um eine gebündelte Tour zu erstellen, müssen die Transportaufträge zusammengefasst und eine Bedienreihenfolge innerhalb der Tour festgelegt werden. Des Weiteren muss ein Fahrweg zwischen den einzelnen Haltepunkten, an denen die Transportaufträge vom Routenzug abgegeben oder aufgenommen werden, gewählt werden [Lie-2017a, S. 63 ff.]. Alle drei Entscheidungen können ungeregelt durch den Routenzugfahrer im Betrieb oder nach definierten Regeln erfolgen (vgl. [Kle-2015b]). Dabei werden statische

Vorgaben, z. B. feste Routen, bei denen Haltepunkte, Bereitstellorte sowie Fahrweg langfristig definiert sind, und dynamische Logiken, bei denen die Entscheidungen im Betrieb aufgrund optimierender Algorithmen erfolgen, unterschieden. Je nach Betrieb kann ein Regelwerk auch nur für bestimmte Bereiche im Werk definiert sein [Hor-2017].

Hormes et al. resümieren, dass der Startzeitpunkt einer definierten Tour ebenfalls entweder beliebig durch den Fahrer oder nach definierten Regeln erfolgen kann. Sind die Transportaufträge langfristig bekannt, kann ein fester Fahrplan für jede Tour berechnet werden. Bei dynamischen Bedarfen werden drei Logiken zum Tourenstart unterschieden. Demnach können Touren in einem Takt starten, der sich meist am Produktionstakt orientiert, um Produktion und Logistik zu synchronisieren. Beim permanenten Tourenstart beginnen Touren immer dann, wenn mindestens ein Transportmittel und ein Transportauftrag zur Verfügung stehen. In Systemen, in denen der Routenzugfahrer die Transportbedarfe wahrnehmen muss, fährt der Routenzug bei einem permanenten Tourenstart auch dann los, wenn noch kein konkreter Transportbedarf vorliegt. Dadurch entstehen allerdings Leerfahrten. Bei der dritten Tourenstartlogik erfolgt der Start auslastungsorientiert, d. h. dann, wenn ein Transportmittel zur Verfügung steht und die Tour genügend Transportaufträge enthält, damit die Transportkapazität des Transportmittels voll ausgelastet ist. Um die Sicherheitsbestände in der Produktion gering zu halten, wird diese Logik oft mit einer Zeitgrenze verwendet. Diese Zeitgrenze sorgt dafür, dass Touren, die die volle Transportkapazität des Transportmittels noch nicht erreicht haben, trotzdem starten dürfen. Die Zeitgrenze bestimmt sich entweder nach den konkreten Zeitfenstern oder spätesten Bereitstellzeitpunkten der Transportaufträge (vgl. [Kle-2015b]), sofern diese vorhanden sind, oder nach geplanten Wiederbeschaffungszeiten der Transportaufträge. [Hor-2017]

Schließlich müssen die Touren noch Ressourcen zugeteilt werden [Kle-2015b]. Wesentliche Ressourcen einer Tour sind der Fahrer des Transportmittels sowie das Transportmittel selbst [VDI-5586a]. Beide Zuteilungen können nach Verfügbarkeit getroffen werden, oder jeder Tour werden vorab definierte Ressourcen zugeteilt. Oft ist ein Fahrer fest einem Transportmittel und einer bestimmten oder mehreren Routen zugeordnet. Die Tourenzuteilung erfolgt jedoch nach Verfügbarkeit. Des Weiteren kann die Ressourcenzuteilung durch technische Restriktionen beeinflusst werden, z. B. müssen KLT-Bereitstellorte durch KLT-Transportmittel bedient werden. Eine komplett offene Zuteilung ohne Restriktionen kann daher nur in homogenen Routenzugsystemen erfolgen [Hor-2017].

Tabelle 2-12: Tourenbildung in Routenzugsystemen (vgl. [Bru-2012, S. 35 ff./ 72 ff.]₁; [Gün-2013, S. 96 ff.]₂; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.]₃; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.]₄; [VDI-5586a]₅; [Gün-2016, S. 57]₆; [Kle-2015b; Kle-2017, S. 21 ff.; Kle-2019]₇; [Hor-2017]₈; [Gün-2012, S. 38 ff.]₁₁; [Lie-2017a, S. 41 ff./ 63 ff.]₁₂)

Merkmal	Merkmalsausprägungen				
Zusammenfassung Aufträge zu Touren	Ungeregelt [8]	Statisch [3;4;5;7;8;11;12]		Dynamisch [4;7;8;11;12]	
Bestimmung Reihenfolge auf einer Tour	Unbestimmt [8]	Statisch [3;4;5;7;8;11;12]		Dynamisch [4;7;8;11;12]	
Definition Fahrweg	Undefiniert [2;8;11]	Statisch [2;3;4;5;7;8;11;12]		Dynamisch [2;3;4;7;8;11;12]	
Festlegung Tourenstart	Nicht festgelegt [8]	Fester Fahrplan [1;2;3;4;5;7;8;11;12]	Getaktet [1;2;4;5;6;7;8;11;12]	Permanent [2;4;5;6;7;8;11;12]	Auslastungsorientiert [1;2;4;5;6;7;8;11;12]
Berücksichtigung Bereitstellzeitpunkt	Nicht berücksichtigt [7;8;12]	Zeitfensterbasiert [7;8;12]		Zeitpunktbasier (Spätester Zeitpunkt) [2;5;7;8;11;12]	
Zuteilung Touren zu Fahrer	Statisch [8;12]	Nach Verfügbarkeit (eingeschränkt) [4;5;8;12]		Nach Verfügbarkeit (offen) [4;5;8;12]	
Zuteilung Touren zu Transportmittel	Statisch [7;8;11;12]	Nach Verfügbarkeit (eingeschränkt) [4;5;7;8;11;12]		Nach Verfügbarkeit (offen) [4;5;7;8;11;12]	

2.3 Anwendungsbereich von Routenzugsystemen

Nach der grundsätzlichen Definition sowie der Erläuterung der Merkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen wird im Folgenden der empfohlene Anwendungsbereich von Routenzugsystemen dargestellt. Dazu werden sowohl die in der Literatur beschriebenen Grenzen des Routenzugeinsatzes als auch gestalterische Einflussfaktoren betrachtet. Bei der Evaluation der in Kapitel 6 entwickelten Steuerungsstrategien wird schließlich überprüft, ob die dynamischen Strategien das Potential besitzen, den Anwendungsbereich von Routenzugsystemen zu vergrößern.

Während Routenzugsysteme häufig die Effizienz erhöhen, sinkt meist die Flexibilität in der Produktionsversorgung gegenüber individuellen Direkttransporten [Kra-2014]. Hinsichtlich der Eignung von Routenzugsystemen für einen sinnvollen Einsatz werden

in der Literatur v. a. die drei Randbedingungen Layout, Transporteinheiten und Teilespektrum betrachtet (vgl. [Gün-2013, S. 99 ff.; Mar-2017, S. 17 ff.]).

Layout

Das Layout betreffend gibt es zum einen Anwendungsvoraussetzungen, wie z. B. eine ausreichende Wegbreite, damit das meist seitliche Be- und Entladen der Transportmittel technisch durchführbar ist [Gün-2012, S. 61; Gün-2013, S. 99], oder ausreichende Kurvenradien, damit die Fahrt des Routenzugs unter Einhaltung erforderlicher Sicherheitsabstände erfolgen kann [Bru-2012, S. 62]. Zum anderen erhöhen breite Wege die Eignung für den Einsatz eines Routenzugsystems, da andere Fahrzeuge ein am Haltepunkt stehendes Transportmittel überholen können [Gün-2012, S. 61; Gün-2013, S. 99]. Dadurch werden Blockaden im Verkehrsfluss des Routenzugsystems vermieden [Sta-2015]. Werden Schleppzüge als Transportmittel eingesetzt, ist die Versorgung von Sackgassen zudem schwierig, da die Züge meist nicht rückwärtsfahren können und ein Wenden in der Sackgasse oft nicht möglich ist [Gün-2012, S. 61; Gün-2013, S. 99]. Der Haltepunkt des Schleppers muss in diesem Fall an den Start der Sackgasse gelegt werden, wovon das Material aus manuell weitertransportiert oder an eine andere Transportressource übergeben werden muss. Neben dem Transportnetzwerk besteht das Layout des Routenzugsystems aus den Haltepunkten, von welchen die Materialflussquellen und -senken aus bedient werden. Je höher die Anzahl der Quellen und Senken im Routenzugsystem ist und je weiter diese voneinander entfernt sind, desto besser ist ein Routenzugsystem als Transportkonzept für die Produktionsversorgung geeignet [Bat-2015; VDI-5586a]. Bei sehr kurzen Entfernungen zwischen den Materialflusssknoten ist der Einsatz eines Routenzugsystem hingegen weniger sinnvoll, sofern die im Vergleich zu alternativen Transportkonzepten erforderliche zusätzliche Handhabungszeit die Einsparung der Fahrtzeit durch die Transportbündelung übersteigt [Gün-2012, S. 61]. Das Layout einer Produktion und damit das Transportnetzwerk werden u. a. durch die Produktionsorganisation bestimmt. Eine Fließproduktion mit fest verketteten Produktionsstationen führt z. B. dazu, dass häufig längere Wege entstehen, ohne die Möglichkeit die Produktionslinie zu kreuzen. Bei Gruppen- oder Werkstattfertigungen sind die Fahrwege dagegen oft vielfältiger. Generell werden Routenzugsysteme jedoch für alle Arten der Produktionsorganisation eingesetzt [Lie-2017a, S. 25 f.].

Transporteinheiten

Transporteinheiten wurden in Abschnitt 2.2.2 als Randbedingung eines Routenzugsystems beschrieben. Grundsätzlich werden jede Art von Ladungsträger sowie Material ohne Ladungsträger mit einem Routenzugsystem transportiert [Lie-2017a, S. 29 ff.]. Da die Ladungsträger in Routenzugsystemen meistens manuell gehandhabt werden, ist es erforderlich, dass diese durch Tragen oder Schieben bewegt werden

können [Bru-2012, S. 111]. Für GLT und Sonderladungsträger werden deswegen z. B. zusätzliche Rolluntersetzer verwendet. Um eine ergonomische Handhabung zu ermöglichen, gibt es länder- und unternehmensspezifische Grenzwerte für die manuell zu manipulierende Masse. Die Grenzwerte liegen bei ca. 15 kg für das Tragen von KLT und ca. 1000 kg für das Schieben von GLT [Gün-2013, S. 99]. *Günthner et al.* halten fest, dass je schwerer und größer ein Ladungsträger ist, desto schwieriger ist die Handhabung und desto länger ist die Handhabungszeit. Daher sinkt die Eignung von Routenzugsystemen, je schwerer und größer ein zu transportierender Ladungsträger ist. Sind die zu handhabenden Ladungsträger homogen, ist ein Routenzugsystem als Transportkonzept geeigneter, als wenn viele unterschiedliche Ladungsträger in einem System bewegt werden müssen, da dadurch die Komplexität in der technischen Gestaltung des Routenzugsystems steigt [Gün-2012, S. 61]. Zusätzlich können bei Transporteinheiten mit großen Abmessungen weniger Transporteinheiten auf einer Tour gebündelt werden. Je geringer die mögliche Transportbündelung einer Tour ist, desto höher fällt die Gesamtfahrtzeit zur Auslieferung derselben Transportaufträge aus. Dies kann zur Folge haben, dass mehr Ressourcen benötigt werden und die Effizienz der Produktionsversorgung bei einer geringeren Transportkapazität einer Tour sinkt [Emd-2011; Han-2014]. Bei ausreichender Dimensionierung der Tourenkapazität werden des Weiteren Engpässe in der Materialbereitstellung vermieden [Cie-2013].

Teilespektrum

Das bei der Produktionsversorgung zu transportierende Teilespektrum ist meist eine harte Anforderung aus der Produktion an die innerbetriebliche Logistik⁶. Bei der Betrachtung eines Bereitstellorts unterteilen *Günthner et al.* Unterschiede im Durchsatz der Materialien von hoch nach niedrig in A-, B- und C-Kategorien. Die Schwankungen, also die Regelmäßigkeit der Transportbedarfe eines Materials zu einem Bereitstellort werden von regelmäßig bis unregelmäßig in X-, Y- und Z-Kategorien klassifiziert. Routenzugsysteme eignen sich prinzipiell für den Einsatz bei allen Durchsatzkategorien [Gün-2013, S. 99; Bat-2015]. Bei sehr hohen Transportbedarfen mit geringen Ladungsträgerreichweiten (z. B. JIT-/ JIS-Teilen) sinkt jedoch die Eignung eines Routenzugsystems. Genauso sind sehr niedrige, unregelmäßige Transportbedarfe, sog. Exotenteile, weniger für den Transport in einem Routenzugsystem geeignet [Gün-2012, S. 61]. Generell gilt: Je größer die Schwankungen werden, desto geringer ist die Eignung eines Routenzugsystems als Transportkonzept [Gün-2013, S. 98 f.]. Dennoch wird in manchen Unternehmen das komplette Teilespektrum mittels Routenzug bedient [Gün-2012, S. 60]. Je geringer die Verbrauchsschwankungen einzelner Materialien sind, desto stabiler kann das Routenzugsystem geplant und mit hoher Auslastung betrieben werden. Teile mit schwankendem Verbrauch, dringende Teile sowie C-Teile

⁶ Stellenweise wird in der Literatur auch eine Aufweichung der harten Randbedingung untersucht. *Laschinger et al.* beschäftigten sich dazu z. B. mit variablen Ladungsträgerfüllmengen (vgl. [Las-2015])

werden seltener durch ein Routenzugsystem versorgt, ebenso Teile mit hohem Durchsatz und geringen Reichweiten der Ladungsträger. Für derartige Teile wird ein Direktverkehr verwendet [Gün-2013, S. 98].

Tabelle 2-13 fasst die in der Literatur angeführte Eignung für den Einsatz von innerbetrieblichen Routenzugsystemen als Transportkonzept zur Produktionsversorgung in Abhängigkeit der Einflussfaktoren zusammen.

Tabelle 2-13: Eignung von Routenzugsystemen in Abhängigkeit von Einflussfaktoren (vgl. [Gün-2013, S. 99; Mar-2017, S. 19; Kle-2017, S. 237 ff.]

Kategorie	Einflussfaktor	Eignung Routenzugsystem (Tendenz)	
		niedriger	höher
Allgemein			
Layout	Anzahl Klienten	Niedrig	Hoch
	Entfernung Haltepunkte	Niedrig	Hoch
	Transportnetzwerk	Restriktiv	Flexibel
Transporteinheiten	Vielfalt	Heterogen	Homogen
	Ladungsträger	Groß	Klein
	Gewicht	Hoch	Niedrig
	Transportkapazität je Tour	Niedrig	Hoch
Teilespektrum	Durchsatz je Klienten	Sehr niedrig oder sehr hoch	Niedrig bis hoch
	Schwankungen je Klienten	Hoch	Niedrig
Fokus auf kurzfristige Transportbedarfsschwankungen			
Tourenbildung	Tourenstartabstand	Hoch	Niedrig
	Routenlänge	Kurz	Lang
Prozesse	Prozessstruktur	Gekoppelt	Entkoppelt

Über diese drei Kategorien hinaus werden in der Literatur Gestaltungsalternativen im Hinblick auf kurzfristige Transportbedarfsschwankungen verglichen. Um Abrufspitzen auszugleichen, empfiehlt *Klug* für getaktete Routenzugsysteme die Wahl einer kurzen Taktzeit. Im Vergleich zu längeren Tourenstartabständen können die Produktionsversorgung stabilisiert und der interne Bullwhip-Effekt (vgl. [Klu-2013]) verringert werden [Klu-2018, S. 312 f.]. V. a. die Durchlaufzeiten werden durch einen kürzeren Tourenstartabstand verringert. Dadurch erweist sich die permanente Tourenstartlogik als besonders vorteilhaft [Kle-2019]. Neben dem Tourenstart untersucht *Klenk* u. a. die Auswirkungen der Routenlänge sowie verschiedener Prozessstrukturen. Bei einem

permanenten Tourenstart zeigen sich kaum Unterschiede im Vergleich verschiedener Routenlängen. Für einen getakteten oder auslastungsorientierten Tourenstart kann bei größeren Routen eine kürzere mittlere Durchlaufzeit der Transportaufträge erreicht werden. Hinsichtlich der Mehrstufigkeit von Prozessen ergeben sich kaum Unterschiede in den Durchlaufzeiten der Transportaufträge. Jedoch zeigt sich, dass durch eine Entkopplung von Prozessschritten kürzere Durchlaufzeiten erreicht werden können [Kle-2017, S. 237 ff.].

Nach dem Stand der Wissenschaft stellen besonders hohe Transportbedarfsschwankungen ein Hindernis für die Anwendung eines Routenzugsystems dar. Die kurzfristigen Transportbedarfsschwankungen wirken sich besonders bei den häufig verwendeten Routenzugsystemen mit festen Routen und getaktetem Tourenstart negativ auf die Effizienz aus [Lie-2017a, S. 87 f.]. Die Herausforderungen, die in Kapitel 1 skizziert wurden, führen dazu, dass die kurzfristigen Transportbedarfsschwankungen in der Produktionsversorgung zunehmen. Dies gilt insbesondere aufgrund der vermehrten Variantenproduktion. *Klenk* untersucht daher die Auswirkungen von schwankenden Transportbedarfen auf die Leistung von Routenzugsystemen. Ausgehend von stochastischen Abrufen getakteter Produktionsprogramme wird gezeigt, dass unregelmäßige Nachschubbedarfe innerhalb einer Route zu erhöhten Durchlaufzeiten der Transportaufträge und zu verspäteten Transportaufträgen führen können [Kle-2017, S. 253 f.]. Zusätzlich zu den unregelmäßigen Nachschubbedarfen lassen sich die Schwankungen der Transportbedarfe in innerbetrieblichen Routenzugsystemen auf schwankende Zeitspannen in der Informationsübermittlung sowie der Prozessdurchführung zurückführen [Lie-2018a].

Wie bereits in Abschnitt 1.2 erläutert, werden unterschiedliche Strategien zum Umgang mit Schwankungen empfohlen. Neben dem Vermeiden bzw. Eindämmen der Schwankungen durch eine Nivellierung des Produktionsprogramms oder eine Anpassung der Ladungsträgerfüllmengen werden Sicherheitspuffer in Form von Überkapazitäten der Transportmittel und Bestände im Produktionsbereich vorgesehen. Zusätzlich kann durch einen manuellen, operativen Eingriff mit Sondertransporten und Springern auf kurzfristige Bedarfe reagiert werden. Eine Möglichkeit, das Routenzugsystem zu einer systemimmanenten, robusten Reaktion zu befähigen ohne manuell eingreifen zu müssen, stellen dynamische Steuerungsstrategien dar. Planer und Betreiber von Routenzugsystemen erhoffen sich durch diese, dass die Effizienz der Produktionsversorgung erhöht wird [Lie-2017a, S. 68 f.]. Für einen eingeschränkten Anwendungsbereich weist *Teschemacher* dies bereits nach (vgl. [Tes-2019]). Als Grundlage für die systematische Entwicklung und Untersuchung von dynamischen Steuerungsstrategien wird im nächsten Kapitel der Stand der Wissenschaft zur Steuerung von Routenzugsystemen analysiert.

3 Steuerung von Routenzugsystemen

In diesem Kapitel wird der Stand der Wissenschaft zur Steuerung von Routenzugsystemen erläutert und analysiert. Dazu wird in Abschnitt 3.1 der Begriff Steuerung zunächst vom Begriff Planung abgegrenzt und im Rahmen dieser Arbeit definiert. Anschließend wird die Routenzugsystemsteuerung in routenzugspezifische Entscheidungen unterteilt, anhand derer der Begriff Dynamik als Dimension der steuerungsrelevanten Entscheidungsprobleme eingeführt wird. Die den Entscheidungen zugrundeliegenden mathematischen Basisprobleme werden in Abschnitt 3.2 dargestellt, ehe der routenzugspezifische Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Steuerungsentscheidungen klassifiziert (Abschnitt 3.3) und darauf basierend die dieser Arbeit zugrundeliegende Forschungslücke detailliert werden (Abschnitt 3.4).

3.1 Grundlagen der Routenzugsystemsteuerung

3.1.1 Abgrenzung von Steuerung und Planung

Die rechtzeitige Bereitstellung der richtigen Transportaufträge ist ein Hauptziel der Logistik [Mar-2011, S. 2]. Um dieses Ziel zu erfüllen, müssen im Rahmen der Produktionsversorgung unterschiedliche Entscheidungen getroffen werden (vgl. [Hor-2017]). Basiert eine Entscheidung auf dem Systemzustand, der beim Wirken der Entscheidung vorliegt, wird im Rahmen dieser Arbeit von einer in der Steuerung getroffenen Entscheidung gesprochen. Dies betrifft insbesondere das Vorhandensein tatsächlicher Transportaufträge. Im Gegensatz dazu basieren Planungsentscheidungen auf angenommenen Werten, den Planwerten. In Bezug auf die Transportaufträge können z. B. durchschnittliche Transportbedarfe herangezogen werden, oder es wird ein Produktionsprogramm zur Erzeugung deterministischer Plan-Transportaufträge verwendet [Kle-2017, S. 35 ff.]. Der Unterschied zwischen Steuerung und Planung weist folglich eine zeitliche Komponente bzgl. der Fristigkeit von Entscheidungen auf. Während kurzfristige Entscheidungen eher der Steuerung zugerechnet werden, da Routenzugsysteme selten vorbestimmt agieren, gehören mittel- und langfristige Entscheidungen zum Bereich der Planung [Lie-2017a, S. 63 ff.]. Im Folgenden werden Überschneidungen der Entscheidungen von Planung und Steuerung untersucht.

Im Rahmen der Planung der Materialversorgung einer Montagelinie aus einem Supermarkt mittels Routenzugsystem identifizieren *Boysen et al.* auf der Basis von *Battini et al.* (vgl. [Bat-2013]) sowie *Alnahhal et al.* drei essentielle Entscheidungsprobleme. Einerseits werden beim *Routing* Bereitstellorte gruppiert, in Reihenfolge gebracht und

Zügen zugeordnet sowie der Fahrweg bestimmt. Andererseits legt das *Scheduling* für jeden Zug und dessen Route einen Fahrplan fest, der die Abfahrtszeit sowie die Zwischenzeiten einer Tour definiert. Des Weiteren werden beim *Loading* konkrete Transportaufträge einer Tour zugeordnet. Alle drei Entscheidungen sind wechselseitig voneinander abhängig. Als Zielstellung für die Lösung dieser Probleme werden die Minimierung der benötigten Züge sowie des Bestands an den Verbauorten empfohlen [Boy-2015; Aln-2014b]. Neben diesen Entscheidungen werden noch die Planung zur Positionierung der Materialflussquellen (vgl. z. B. [Emd-2012b; Bat-2013; Aln-2015a; Nou-2018]) oder der Einfluss der Ergonomie auf die Touren (vgl. z. B. [Klu-2019a; Die-2020]) in der Literatur behandelt. Diese beiden Entscheidungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht untersucht.

Bezüglich der Steuerung werden in der routenzugspezifischen Literatur häufig lediglich die Nachschubsteuerung sowie die Freigabe von Touren diskutiert (vgl. [Dro-2013b, S. 38; VDI-5586a]). Die Nachschubsteuerung wird im Rahmen dieser Arbeit als Randbedingung eines Routenzugsystems gesehen (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Daneben stellen *Hormes et al.* im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit durch Prozessanalysen und Experteninterviews fest, dass eine ganzheitliche Steuerungsstrategie die vier Dimensionen *Auftrag*, *Weg*, *Zeit* und *Ressourcen* berücksichtigt. Zur Dimension *Auftrag* gehören das Zusammenfassen von Transportaufträgen zu einer Tour sowie die Abarbeitungsreihenfolge der Transportaufträge innerhalb der Tour. In der Dimension *Weg* wird der konkrete Fahrweg zwischen zwei Haltepunkten einer Tour festgelegt. Die zeitliche Dimension umfasst Entscheidungen zur Tourenstartlogik. Und die Dimension *Ressourcen* beschäftigt sich mit der Zuteilung von Fahrzeugen und Fahrern zu Touren. Die ganzheitliche Betrachtung von Steuerungsstrategien im Rahmen der vier Dimensionen erfordert folglich einen Transfer von bisherigen Planungsentscheidungen in den Steuerungsbereich [Hor-2017].

Klenk fasst die Phasen der Routenzugsystemplanung auf Basis der Literatur zusammen. Ausgehend von der Zieldefinition, die mit der Einführung des Routenzugsystems verfolgt wird, werden Randbedingungen (vgl. Abschnitt 2.2.2) beschrieben und notwendige Daten erhoben. Daran schließt die Konzeptentwicklung an. In dieser Phase sollen mehrere Alternativen entwickelt werden, damit darauffolgend eine vergleichende Bewertung und Entscheidung für ein Konzept, das detailliert ausgeplant und umgesetzt wird, erfolgen kann. Die Konzeptentwicklung unterteilt sich in die beiden Teilphasen Systemkonfiguration und Systemdimensionierung (siehe Abbildung 3-1). Bei der Konfiguration werden zunächst Gestaltungsparameter hinsichtlich des Prozesses (vgl. Abschnitte 2.2.3 und 2.2.4) sowie der technischen Umsetzung der Transportmittel (vgl. Abschnitt 2.2.5) festgelegt. Auf dieser Basis können die Zeiten für die

Durchführung der notwendigen Tätigkeiten, z. B. mittels MTM-Analysen, ermittelt werden. Als letzter Punkt der Systemkonfiguration werden die Steuerungsprinzipien der Tourenbildung sowie Auftrags- und Ressourcenzuordnung ausgewählt. Die Systemdimensionierung startet mit der Festlegung der Routen. Auf dieser Basis werden die benötigten Ressourcen kalkuliert und anschließend Strategieparameter, wie z. B. der Routentakt, bestimmt [Kle-2017, S. 25 ff.].

In Abbildung 3-1 sind die Überschneidungen zwischen der Konzeptentwicklung bei der Planung und den Dimensionen einer ganzheitlichen Steuerungsstrategie aufgezeigt.

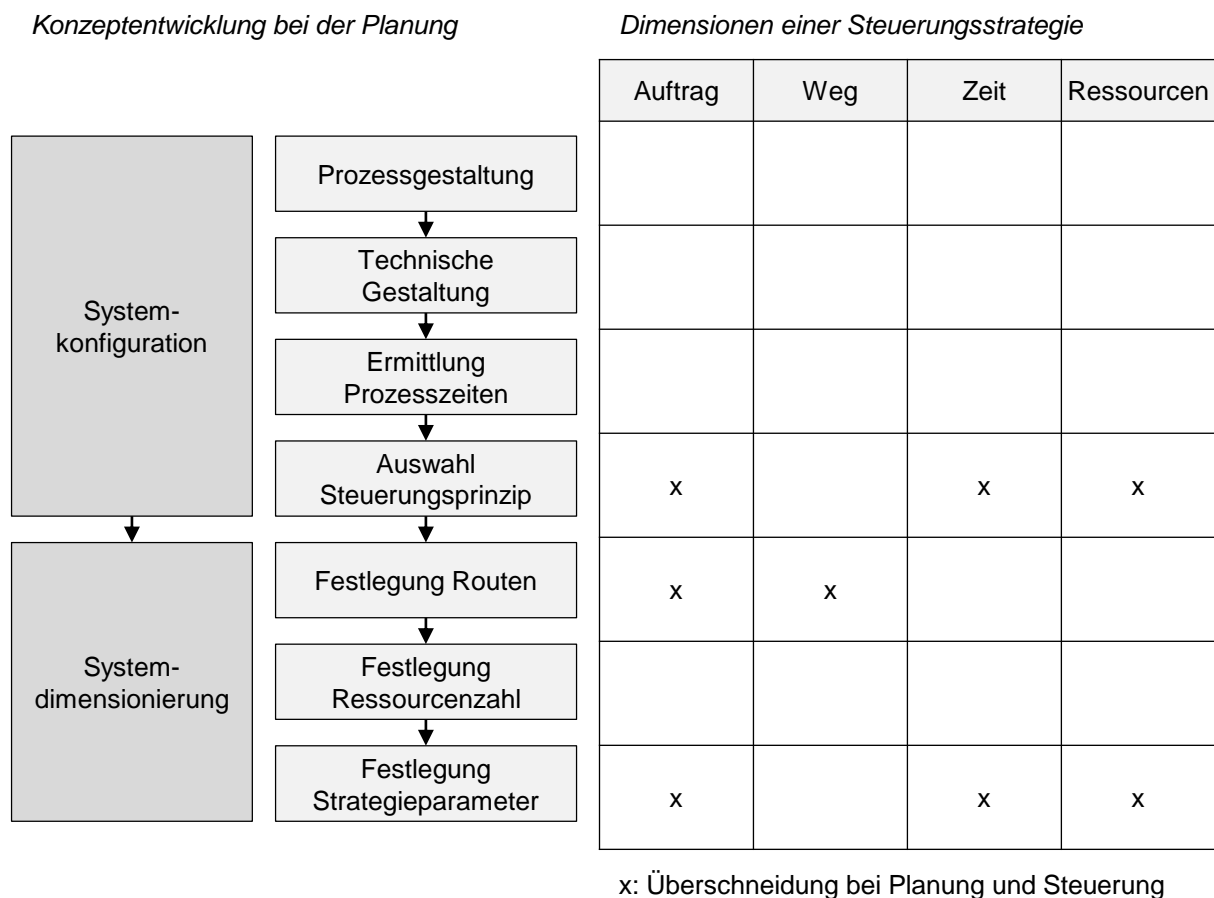


Abbildung 3-1: Vorgehensweise zur Konzeptentwicklung bei der Planung von Routenzugsystemen (vgl. [Kle-2017, S. 28]) und Überschneidungen mit den Dimensionen einer ganzheitlichen Steuerungsstrategie

Bei der Auswahl der Steuerungsprinzipien im Rahmen der Systemkonfiguration werden nach *Klenk* Logiken festgelegt, wie die Tourenbildung im Betrieb angestoßen wird, z. B. nach vorgegebenen Zeiten, welche Transportaufträge auf eine Tour disponiert werden, z. B. nach FIFO, und welche Tour von welchem Fahrer und Fahrzeug durchgeführt wird [Kle-2017, S. 21 ff.]. Diese Entscheidungen können den Dimensionen *Auftrag*, *Zeit* und *Ressourcen* einer Steuerungsstrategie zugeordnet werden (vgl. [Hor-

2017]). Die von *Klenk* betrachteten Teilentscheidungen beziehen sich im Betrieb des Routenzugsystems auf in der Planung fest definierte Routen. Die Festlegung dieser Routen erfolgt als erster Schritt der Systemdimensionierung und wird nach Bedarf im Rahmen der Detailplanung oder im Systembetrieb überarbeitet [Kle-2017, S. 27]. Durch die Festlegung einer Route werden zum einen der Fahrweg definiert und zum anderen die Definitionsmenge für die Zusammenfassung von Transportaufträgen zu Touren eingeschränkt sowie deren Abarbeitungsreihenfolge vorbestimmt. Die Steuerungsstrategie wird daher in den Dimensionen *Auftrag* und *Weg* beeinflusst (vgl. [Hor-2017]). Im letzten Schritt der Systemdimensionierung sind Parameter der zuvor gewählten Steuerungsstrategien zu definieren [Kle-2017]. Dies umfasst z. B. die Festlegung einer Taktzeit, falls ein getakteter Tourenstart als Steuerungsprinzip gewählt wurde, (vgl. [VDI-5586b]) oder die konkrete Zuteilung der dimensionierten Ressourcen zu den initial definierten Routen. Analog zur Auswahl der Steuerungsprinzipien sind bei der Festlegung der Parameter daher auch die Steuerungsdimensionen *Auftrag*, *Zeit* und *Ressourcen* betroffen (vgl. [Hor-2017]).

3.1.2 Entscheidungsprobleme der Steuerung

Auf Basis der in der Planung bekannten Parameter kann eine global optimale Lösung für diese Entscheidungen getroffen werden. Weichen die tatsächlichen Werte im Betrieb des Routenzugsystems jedoch von den Planwerten ab, verlieren die geplanten Entscheidungen ihre Optimalität. Fällt eine Entscheidung im Rahmen der Steuerung, kann für den aktuellen Systemzustand eine global optimale Lösung gefunden werden, die näher am zeitlichen Geschehen, jedoch ebenso zeitlich begrenzt ist. Um die vier Dimensionen einer ganzheitlichen Steuerungsstrategie (vgl. [Hor-2017]) zu berücksichtigen, werden in Anlehnung an die Planungsentscheidungen von *Boysen et al.* (vgl. [Boy-2015]) sowie *Alnahhal et al.* (vgl. [Aln-2014b]) folgende Entscheidungsprobleme für die Entwicklung dynamischer Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme im Rahmen dieser Arbeit betrachtet:

- Clusterbildung,
- Reihenfolgebildung,
- Tourenbildung,
- Wegfindung,
- Abfahrtszeitbestimmung und
- Ressourcenzuteilung.

Unter Clusterbildung wird die Gruppierung von Transportaufträgen aufgrund definierter Merkmale verstanden. Diese Merkmale können z. B. technische Eigenschaften wie die Ladungsträgerart oder die räumliche Anordnung der den Transportaufträgen

zugehörigen Klienten im Transportnetzwerk sein. Im Routenzugsystem wird die Gesamtheit der Transportaufträge für die weiteren Steuerungsentscheidungen vorgefiltert, z. B. werden Klienten organisatorisch in einer Route zusammengefasst. Die Cluster werden zwar im Rahmen der Planung gebildet, sind aber aufgrund des Einflusses auf die Steuerungsentscheidung wichtiger Bestandteil der Steuerungsstrategie. Erfolgt keine Clusterbildung, können alle Transportaufträge im System frei miteinander zu einer Tour gebündelt werden. (vgl. [Boy-2015; Lie-2017a, S. 63])

Neben der reinen Vorgruppierung von Transportaufträgen besteht die Möglichkeit, eine statische Abfahrreihenfolge der dem Cluster zugehörigen Klienten festzulegen. Daneben kann die Reihenfolgebildung dynamisch integriert in die Tourenbildung oder während der Durchführung einer Tour erfolgen. (vgl. [Hor-2017])

Aufgabe der Tourenbildung ist es, aus einer vordefinierten Menge an Transportaufträgen gebündelte Touren so zu erzeugen, dass alle Randbedingungen eingehalten werden [Lie-2017a, S. 63]. Für ein Routenzugsystem sind das u. a. die Kapazitätsrestriktionen der Züge sowie späteste Zeitpunkte, zu welchen ein Transportauftrag beendet sein soll [Boy-2015; Tes-2019, S. 38]. In statisch gesteuerten Routenzugsystemen liegen die Informationen zu den Zeitfenstern der Transportaufträge häufig nicht vor [Lie-2017a, S. 73 f.]. Die Tourenbildung erfolgt dann nach Prioritätsregeln, z. B. FIFO [Kle-2017, S. 23 f.]. Für die dynamischen Steuerungsstrategien ergibt sich die optimale Tourenbildung als Lösung des *Vehicle Routing Problems with Time Windows* (VRPTW) (vgl. [Tes-2019]). Die Bündelung der Transportaufträge zu Touren ist der Ursprung der Effizienzpotentiale eines Routenzugsystems im Vergleich zu anderen Transportprinzipien (vgl. Abschnitt 2.1). Die Ausgestaltung der Tourenbildung und damit die Lösung des VRPTW für Routenzugsysteme steht daher im Fokus dieser Arbeit.

Bei der Wegfindung wird der exakte Fahrweg zwischen den Haltepunkten auf der Tour bestimmt. Dies kann in der Planung mit dem Festlegen der Route erfolgen oder im Rahmen der Steuerung, indem z. B. der beim aktuellen Systemzustand kürzeste Weg gesucht wird. (vgl. [Hor-2017; Lie-2017a, S. 63 f.])

Das Entscheidungsproblem der Abfahrzeitbestimmung legt für jede Tour fest, wann diese an der Materialflussquelle startet (vgl. [Boy-2015]). Je nach Strategie sind dazu Informationen über die Bereitstellzeitfenster bzw. über maximale Wiederbeschaffungszeiten der Transportaufträge notwendig, um Engpässe in der Produktionsversorgung zu vermeiden. (vgl. [Kle-2017, S. 22 f.]).

Im Rahmen der Ressourcenzuteilung wird entschieden, welche Ressourcen welche Touren bedienen [Kle-2017, S. 24]. Als Ressource wird im Rahmen dieser Arbeit das

Transportmittel verstanden. Eine gesonderte Betrachtung der Fahrerzuteilung erfolgt nicht. Wurden im Rahmen der Planung Cluster bestimmt, können die Ressourcen z. B. fest einem oder mehreren Clustern zugeteilt werden (vgl. [Hor-2017]).

3.1.3 Dynamik der Entscheidungsprobleme

Bei der zweiten Forschungsunterfrage steht der Dynamisierungsgrad einer Steuerungsstrategie im Fokus. Um den Einfluss unterschiedlich dynamischer Strategien auf die Effizienz der Produktionsversorgung untersuchen zu können, wird in diesem Abschnitt zunächst der zugrundeliegende Begriff *Dynamik* erörtert.

Psarafatis definiert, dass ein abstraktes VRP dann dynamisch⁷ ist, wenn für das Problem relevante Informationen dem Entscheider zum Zeitpunkt der Tourenbildung bekannt sind und während der Durchführung aktualisiert werden. Im Gegensatz dazu besteht ein statisches Problem, wenn alle Eingangsparameter vor der Tourenbildung bekannt sind und nicht geändert werden. Zur Problemcharakterisierung werden vier Kriterien hinsichtlich der für das Problem relevanten Informationen vorgestellt [Psa-1995]:

- Informationsevolution: statisch, dynamisch,
- Informationsqualität: deterministisch bekannt, prognostiziert, stochastisch, unbekannt,
- Informationsverfügbarkeit: lokal, global und
- Informationsverarbeitung: zentral, dezentral.

Für die Informationsevolution ist die zeitliche Entwicklung einer für das VRP relevanten Eingangsinformation interessant. Unterschieden werden statische und dynamische Eingangsparameter. Statische Parameter sind für die gesamte Dauer der Tour bekannt und werden nicht aktualisiert. Dennoch können diese Funktionen in Abhängigkeit der Zeit sein. Dynamische Eingangsparameter sind hingegen nicht für die gesamte Dauer der Tour bekannt und werden erst mit fortschreitender Entwicklung der Tour aufgedeckt und in der Problemlösung berücksichtigt. [Psa-1995]

Die Informationsqualität beschreibt, mit welcher Sicherheit eine Information gilt. Einerseits können Eingangsparameter während des gesamten Prozesses deterministisch bekannt sein, z. B. die Anzahl der Transportmittel oder die Position und Entfernung der Haltepunkte. Andererseits können Informationen, z. B. die Fahrtzeit zwischen zwei Haltepunkten, prognostiziert werden. Ändern sich die Parameter während des Tourenprozesses, werden diese Informationen in der Problemlösung angepasst. Des

⁷ Synonym zur Eigenschaft *dynamisch* werden die Begriffe *echtzeitfähig* oder *online* verwendet [Psa-1995].

Weiteren können Informationen auf Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen stochastisch bekannt sein, z. B. wenn Handhabungszeiten auf Basis von MTM-Analysen mit Schwankungsbreiten berücksichtigt werden. Zuletzt können Informationen zum Zeitpunkt einer Entscheidung noch unbekannt sein, z. B. Zeitpunkt oder Verbaort des nächsten Transportbedarfs. Die Informationsqualität ist immer abhängig vom Betrachtungszeitpunkt und kann sich für eine Information während des Tourenprozesses ändern. Je kurzfristiger ein Ereignis ansteht, desto sicherer ist für gewöhnlich die Information. [Psa-1995]

Die Informationsverfügbarkeit wird in lokal und global unterteilt [Psa-1995]. Eine lokal verfügbare Information kann z. B. das Verkehrsaufkommen an einer Kreuzung sein. Falls die Positionen der Transportmittel permanent der Steuerung mitgeteilt werden, z. B. über Indoor-GPS, können Verkehrsinformationen auch global vorliegen (vgl. [Psa-1995]).

Die Verarbeitung der Informationen erfolgt zentral oder dezentral [Psa-1995]. Beispielsweise kann die gesamte aktuelle Auftragslage von einer zentralen Einheit in Touren aufgeteilt werden. Die Verarbeitung dieser Informationen ist dezentral, falls z. B. jeder Fahrer eines Transportmittels oder jedes Transportmittel sich die Transportaufträge der eigenen Tour oder den Fahrweg selbst bestimmen (vgl. [Psa-1995]).

Die Definition und Charakterisierung des Dynamikbegriffs für das abstrakte VRP wird im Folgenden auf die Steuerung von Routenzugsystemen übertragen. Je nachdem wie die Steuerungsprinzipien ausgestaltet werden, sind die Ausprägungen der Gestaltungsdimensionen eher statisch oder eher dynamisch [Gol-2013, S. 44 f.]. Diese Beurteilung erfolgt neben den oben erläuterten Kriterien im Hinblick darauf, inwieweit im Routenzugsystem geregelte Entscheidungen in Abhängigkeit des aktuellen Systemzustands, insbesondere der tatsächlichen Transportaufträge, getroffen werden. Um die Gesamtdynamik einer ganzheitlichen Routenzugsystemsteuerung zu beurteilen, müssen alle vier Dimensionen betrachtet werden [Hor-2017]. In den in der Industrie eingesetzten Systemen überwiegen statische Entscheidungen [Lie-2017a, S. 64 ff.]. Jedoch erfolgt bei realen Systemen mit statischen Steuerungsstrategien zumeist mindestens die Transportauftragsdisposition zu einer Tour dynamisch im Betrieb, z. B. nach FIFO für eine feste Route [Kle-2017, S. 23 f.]. Gegenteilig müssen für dynamische Steuerungsstrategien ebenso Logiken statisch im Rahmen der Planung definiert werden. Eine ganzheitliche Steuerungsstrategie ist daher nie gesamtheitlich dynamisch oder statisch, sondern sortiert sich auf einer Dynamikdimension zwischen statisch und dynamisch ein (vgl. [Hor-2017]). *Golz* differenziert in diesem Zusammenhang statische, halb-dynamische sowie dynamische Möglichkeiten. Statisch werden Routen und Taktzeiten mittelfristig geplant und operativ nur die Aufträge den Touren

zugeordnet. Halb-dynamisch wird zusätzlich die Abfahrtszeit im Betrieb bestimmt. Bei der dynamischen Materialbereitstellung erfolgen alle Entscheidungen operativ [Gol-2013, S. 44 f.].

In diesem Abschnitt wurden grundlegende Begriffe der Steuerung von Routenzugsystemen aufgezeigt und die Tourenbildung als Kernproblem der dynamischen Routenzugsystemsteuerung vorgestellt. Der dynamischen Tourenbildung liegt das *Problem der Tourenplanung* in Form des VRPTW als Optimierungsproblem zugrunde. Notwendig dafür sind die Kosten zwischen den Klienten, welche durch die Lösung des *Problems des kürzesten Pfades* ermittelt werden können. Neben diesen beiden mathematischen Problemen wird im folgenden Abschnitt das *Problem des Handlungsreisenden* für eine lokale Optimierung der gebildeten Touren erläutert.

3.2 Basisprobleme der Steuerungsentscheidungen

3.2.1 Problem des kürzesten Pfades

Durch die Lösung des *Problems des kürzesten Pfades*⁸ werden die minimalen Kosten berechnet, um von einem Ort im Routenzugsystem zu einem anderen Ort zu gelangen. Zudem kann der damit verbundene Fahrweg bestimmt werden. Dieses Basisproblem ist damit sowohl für das Entscheidungsproblem der Wegfindung als auch für alle anderen Entscheidungsprobleme, die die minimalen Kosten zwischen zwei Haltepunkten benötigen, relevant. Je nach Ausgestaltung der Steuerungsentscheidungen berücksichtigt sogar jedes Entscheidungsproblem die kürzesten Pfade.

Die Grundlage für die Lösung des *Problems des kürzesten Pfades* ist die Darstellung eines Netzwerkes als mathematischer Graph mit Knoten und Kanten. Zusätzlich werden Kosten benötigt, die u. a. den Kanten zugeordnet werden können. Beispielsweise können die Haltepunkte in einem Routenzugsystem als Knoten und die Strecke zwischen den Haltepunkten als Kosten der verbindenden Kante modelliert werden. Die Modellierung des Transportnetzwerkes eines Routenzugsystems wird in Abschnitt 5.2.1 vorgestellt.

Zur Lösung des *Problems des kürzesten Pfades* existieren unterschiedliche Algorithmen. Diese Algorithmen können sowohl mit statischen Kosten der Kanten verwendet werden, wodurch Gesamtkosten und Fahrweg zwischen zwei Knoten nur einmalig bestimmt werden müssen, als auch mit variablen Kosten, die z. B. das aktuelle Verkehrsaufkommen berücksichtigen. Die Kosten sind dabei während der Lösung einer

⁸ engl.: shortest path problem

Probleminstanz statisch, variieren jedoch von einer Instanz zu einer andern. Damit können individuelle Lösungen auf Basis des aktuellen Systemzustands ermittelt werden.

Mit dem Dijkstra-Algorithmus (vgl. [Dij-1959]) werden die kürzesten Wege von einem Startknoten zu allen anderen Knoten des Netzwerks bestimmt [Dij-1959]. Der Algorithmus liefert eine garantiert optimale Lösung, sofern die Kosten der Kanten nicht negativ sind [Her-2014b]. Soll nur der kürzeste Pfad von einem Startknoten zu einem Endknoten berechnet werden, liefert der A*-Algorithmus (vgl. [Har-1968]) ebenfalls eine optimale Lösung. Die Laufzeit ist dabei kleiner gleich der Laufzeit des Dijkstra-Algorithmus, da bei diesem informierten Suchverfahren zusätzlich eine zielgerichtete Schätzfunktion, mit der der Lösungsraum eingeschränkt wird, verwendet wird [Her-2014a]. Daneben existieren der Floyd-Warshall Algorithmus (vgl. [Flo-1962]), der die kürzesten Wege paarweise zwischen allen Knoten im Netzwerk bestimmt [Her-2015], sowie der Bellman-Ford-Algorithmus (vgl. [For-1956; Bel-1958]), mit dem auch negative Kantengewichte berücksichtigt werden können [Her-2013].

Da bei der Tourenbildung die Kosten von einem Knoten zu zahlreichen anderen Knoten verglichen werden, wird im Rahmen dieser Arbeit der Dijkstra-Algorithmus zur Bestimmung des kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten verwendet. Die Funktionsweise des Algorithmus ist als Pseudocode in Abbildung 3-2 dargestellt.

Auf der Basis eines Graphen G mit Knoten (V : *vertex*) und Kanten (E : *edge*) werden die minimalen Kosten von einem Startknoten $v[1]$ zu allen anderen Knoten des Netzwerks bestimmt und in einer Liste ausgegeben. Zudem wird für jeden Knoten der direkte Vorgänger (*parent*) auf dem minimalen Weg gespeichert. Je nach Datenstruktur des Graphen G mit den zugeordneten Kantengewichten können die Lösungskomplexität des Dijkstra-Algorithmus und damit die Laufzeit reduziert werden. Die Organisation in einer Liste ist dabei erheblich vorteilhafter als eine Matrixstruktur. Neben dem Graphen G ist eine Warteschlange (*queue*) als Zwischenspeicher für aktive Knoten erforderlich. Hauptoperationen mit der Warteschlange sind die Extraktion eines Minimums sowie die Aktualisierung der Kosten. Werden Heaps als Datenstruktur für die Warteschlange verwendet, kann wiederum die Laufzeit des Algorithmus reduziert werden. Ein Vergleich der Lösungskomplexität und Laufzeiten des Dijkstra-Algorithmus mit unterschiedlichen Datenstrukturen wird in Anhang A vorgestellt.

Im ersten Schritt des Algorithmus wird der Startknoten als aktiver Knoten in die leere Warteschlange geschrieben. Zusätzlich werden die Kosten zum Startknoten genullt und der Vorgänger des Startknotens auf den Startknoten selbst gesetzt. Anschließend werden die Kosten zu allen anderen Knoten des Netzwerks auf unendlich gehoben

und deren Vorgänger gelöscht. Solange sich in der Warteschlange aktive Knoten befinden, wird folgende Prozedur wiederholt: Aus der Warteschlange wird der Knoten u extrahiert, der die aktuell minimalen Kosten zum Startknoten $v[1]$ hat. Dann werden für alle direkten Nachfolger w des Knotens u die Kosten vom Startknoten über den Knoten u bestimmt. Befindet sich der Nachfolger w bereits in der Warteschlange und sind die bestimmten Kosten niedriger als die in der Warteschlange gespeicherten Kosten, werden die Kosten des Knotens w aktualisiert und der Vorgänger von w auf dem kürzesten Weg von $v[1]$ als u gesetzt. Ist der Knoten w noch nicht in der Warteschlange und hat keinen zugeordneten Vorgänger, d. h. er war noch nie aktiv, werden der Knoten w in die Warteschlange geschrieben, seine Kosten vom Startknoten $v[1]$ auf die berechneten Kosten gesetzt und sein Vorgänger u gespeichert. Befinden sich nun Knoten in der Warteschlange, beginnt erneut die Extraktion des Minimums. (vgl. [Her-2014b])

```

1  BEGIN
2      queue[1] ← v[1]
3      c(v[1]) ← 0
4      parent(v[1]) ← v[1]
5      FOR i = 2,..,n DO
6          c(v[i]) ← ∞, parent(c[i]) ← NULL
7      WHILE queue ≠ ∅ DO
8          u = queue.extractMin()
9          FOR ALL (u,w) ∈ E DO
10             cost ← c(u) + c(u,w)
11             IF w ∈ queue AND c(w) > cost DO
12                 c(w) = cost, parent(w) = u
13             ELSE IF parent(w) == NULL THEN
14                 c(w) = cost, parent(w) = u
15                 queue.insert(w,cost)
16  END

```

Abbildung 3-2: Pseudocode des Dijkstra-Algorithmus (vgl. [Her-2014b])

3.2.2 Problem der Tourenplanung

Der Bündelung von Transportaufträgen auf kapazitätsbeschränkte Touren liegt das *Problem der Tourenplanung*, kurz VRP, zugrunde. Bei der klassischen Problemstellung wird die Nachfrage geographisch verteilter Kunden aus einem zentralen Depot

von einer homogenen Flotte von Fahrzeugen mit beschränkter Transportkapazität bedient. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der gesamten Transportdistanz unter Einhaltung der Restriktionen [Dan-1959]. Der eigentliche Begriff VRP bezeichnet die von *Clarke und Wright* untersuchte Problematik. Diese erweitern die klassische Problemstellung auf variable Kapazitäten der Fahrzeuge [Cla-1964]. Des Weiteren gibt es zahlreiche Abwandlungen und Erweiterungen des VRP insbesondere hinsichtlich geltender Restriktionen. *Eksioglu et al.* sowie *Braekers et al.* stellen zur Charakterisierung des VRP eine Klassifikation auf Basis detaillierter Literaturanalysen vor. Neben einer Erfassung der Lösungsmethode, z. B. exakte oder heuristische Methoden sowie Simulation, werden die Szenarien, z. B. deterministische oder stochastische Transportbedarfe, charakterisiert sowie physische Restriktionen, z. B. Bereitstellzeitfenster, beschrieben. Des Weiteren werden die Dynamik (vgl. Abschnitt 3.1.3) erfasst und die Datengrundlage, z. B. echte oder synthetische Daten, gekennzeichnet [Eks-2009; Bra-2016].

Da die dynamische Tourenbildung robust erfolgen soll, ist eine Grundvoraussetzung, dass das Material an den Verbauorten in der Produktion bereitsteht, wenn es benötigt wird. Um die Dringlichkeit von Transportaufträgen zu kennzeichnen, können diese mit spätesten Bereitstellzeitpunkten versehen werden. Daraus ergibt sich das *Problem der Tourenplanung mit Zeitfenstern* (VRPTW). Grundsätzlich legen die Zeitfenster eine früheste und späteste Bereitstell- oder Abholzeit für einen Transportauftrag eines Kunden fest. Dabei werden weiche Zeitfenster, die bei Nicht-Einhaltung zu Strafkosten in der Problemlösung führen, von harten Zeitfenstern, die eingehalten werden müssen, unterschieden. Des Weiteren können die Zeitfenster einseitig sein und z. B. nur einen spätesten Bereitstellzeitpunkt enthalten [Des-2014, S. S. 119]. Dies ist auch die im Rahmen dieser Arbeit relevante Zeitfensterrestriktion. Optimierungsziel des VRPTW ist der Einsatz möglichst weniger Fahrzeuge bei einer gleichzeitigen Minimierung der gesamten Transportkosten [Des-2014, S. 119].

Die mathematische Formulierung des VRPTW nach *Desaulniers et al.* ist in den Formeln (3-1) bis (3-9) dargestellt (vgl. [Des-2014, S. 120 f.]). Grundlage für diese Formulierung sind ein gerichteter Graph $G = (V, E)$, bestehend aus einer Menge an Knoten V und einer Menge an Kanten E . Die zentrale Materialflussquelle wird durch die beiden Knoten 0 und $n + 1$ repräsentiert. Daraus ergibt sich für die Klienten die Menge $N = V \setminus \{0, n + 1\}$. Die maximale Anzahl der Fahrzeuge und damit der zu bildenden Touren werden durch die Mächtigkeit der Menge V ausgedrückt. Die Transportkapazität eines Fahrzeugs beträgt k_v . Jedem Klienten i sind eine individuelle Nachfragemenge λ_i und eine Servicezeit s_i zugeordnet. Nachfragemenge und Servicezeit an der Quelle werden vereinfachend genullt. Zusätzlich sind Quelle und Klienten Zeitfenster $[a_i, b_i]$ zugeteilt, zu denen sie bedient werden dürfen. Die tatsächliche Ankunftszeit eines

Fahrzeugs v an einem Knoten i wird durch die Variable T_{iv} beschrieben. Die Fahrzeit für eine Kante (i, j) beträgt $t_{(i,j)}$, und die Kosten dieser Kante sind $c_{(i,j)}$ [Des-2014, S. 120 f.]).

Zielfunktion:

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A} c_{(i,j)} x_{ijv} \quad (3-1)$$

Nebenbedingungen⁹:

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3-2)$$

$$\sum_{j \in \delta^+(0)} x_{0jv} = 1 \quad \forall v \in V \quad (3-3)$$

$$\sum_{i \in \delta^-(j)} x_{ijv} - \sum_{i \in \delta^+(j)} x_{ijv} = 0 \quad \forall v \in V, j \in N \quad (3-4)$$

$$\sum_{j \in \delta^-(n+1)} x_{i,n+1,v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (3-5)$$

$$x_{ijv}(T_{iv} + s_i + t_{(i,j)} - T_{jv}) \leq 0 \quad \forall v \in V, (i,j) \in E \quad (3-6)$$

$$a_i \leq T_{iv} \leq b_i \quad \forall v \in V, i \in V \quad (3-7)$$

$$\sum_{i \in N} \lambda_i \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ijv} \leq k_v \quad \forall v \in V \quad (3-8)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, (i,j) \in E \quad (3-9)$$

Für eine festgelegte Anzahl an Fahrzeugen werden die Gesamtkosten minimiert (Zielfunktion (3-1)). Durch Hinzufügen einer Null-Tour zwischen dem Knoten 0 und $n + 1$,

⁹ Die Notation $\delta^+(i)$ bedeutet, dass der Knoten i nicht in der Menge enthalten ist, $\delta^-(i)$ bedeutet, dass der Knoten i enthalten ist [Irn-2014, S. 4].

also der Materialflussquelle, kann auch die Anzahl an Fahrzeugen minimiert werden. Die Gesamtkosten werden bestimmt, indem die Kosten einer Kante (i, j) aus der Menge aller Kanten E für ein Fahrzeug v aufsummiert werden, falls das Fahrzeug v diese Kante in seiner Tour verwendet. Anschließend werden die Kosten aller Fahrzeuge aufsummiert. Durch die Nebenbedingung (3-2) wird sichergestellt, dass jeder Kunde exakt auf einer Tour bedient wird. Jede Tour startet und endet an der Materialflussquelle (Nebenbedingungen (3-3) bis (3-5)) unter Einhaltung der Zeitfenster (Nebenbedingungen (3-6) und (3-7)) sowie der Kapazitätsrestriktionen (Nebenbedingung (3-8)). In Nebenbedingung (3-9) wird durch binäre Variablen schließlich spezifiziert, dass jede Kante (i, j) nur von einem Fahrzeug v genutzt wird. [Des-2014, S. 120 f.]

Das VRP gehört zur Komplexitätsklasse NP. Dies bedeutet, dass die Zeitkomplexität stärker als polynomiell ansteigt. Je größer das untersuchte Problem wird, desto schwieriger wird es, eine exakte Lösung in annehmbarer Rechenzeit zu finden [Len-1981]. Daher werden zur Lösung des VRPTW neben exakten Methoden auch Heuristiken verwendet, die eine gute Lösung, jedoch ohne Optimum-Garantie, finden. Heuristiken unterteilen sich in spezifische Heuristiken und Metaheuristiken. Während spezifische Heuristiken auf die Lösung eines spezifischen Problems zugeschnitten sind, stellen Metaheuristiken einen abstrakten Algorithmus dar, der auf vielfältige Problemstellungen angewandt werden kann [Tal-2009, S. 21].

In Tabelle 3-1 sind gängige Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme dargestellt.

Tabelle 3-1: Lösungsverfahren für Tourenplanungsproblem (vgl. [Tes-2019, S. 44; Cac-2015])

Exakte Verfahren	Spezifische Heuristiken	Metaheuristiken
Vollständige Enumeration	Nearest Neighbor	Tabu Search
Branch and Bound	Einfügeverfahren	Variable Neighborhood Search
Branch and Cut	Savings	Simulated Annealing
Branch and Price	Zwei-Phasen-Algorithmen	GRASP
Dynamic Programming	Lokale Suchverfahren	Genetische Algorithmen
		Scatter Search
		Partikelschwarmoptimierung
		Ameisenalgorithmus
		Maschinelles Lernen

Eine kompakte Erläuterung der Verfahren geben *Teschmacher* (vgl. [Tes-2019, S. 46 ff.]) sowie *Caceres-Cruz et al.* (vgl. [Cac-2015]). Exakte Lösungsverfahren liefern zwar eine optimale Lösung, sind aufgrund der Laufzeiten für das Finden dieser Lösung allerdings nicht für kurzfristig erforderliche Reaktionen für die dynamische Tourenbildung geeignet¹⁰. Heuristiken haben zwar sehr gute Laufzeiten, weisen aber zugleich meist nicht die geforderte Lösungsqualität auf. Heuristiken werden allerdings häufig im Rahmen der Metaheuristiken zum Finden einer initialen Lösung verwendet. Metaheuristiken werden oft zur Lösung der Tourenplanung eingesetzt, da sie einen guten Kompromiss zwischen Lösungsqualität und Rechenzeit aufweisen [Tes-2019, S. 45 f.]. Eine detaillierte Beschreibung der in Tabelle 3-1 aufgeführten und weiterer Metaheuristiken liefert *Talbi* (vgl. [Tal-2009]).

Ein Vergleich der Lösungsqualität sowie der Rechenzeiten verschiedener Metaheuristiken kann anhand von Benchmarkinstanzen durchgeführt werden. Für das außerbetriebliche VRPTW existieren die Solomon-Benchmarks (vgl. [Sol-1987]), mit denen verschiedene Layouts und Auftragsszenarien abgebildet werden. *Teschmacher* stellt fest, dass die Anforderungen der innerbetrieblichen Produktionsversorgung mit gleichmäßig verteilten Klienten und kleinen Zeitfenstern sowie kurzem Planungshorizont am ehesten durch die Klassen R1 und RC1¹¹ der Solomon-Benchmarks berücksichtigt werden [Tes-2019, S. 63]. In Abbildung 3-3 ist ein Vergleich der in Tabelle 3-1 aufgeführten Metaheuristiken dargestellt. Zum einen werden die prozentualen Abweichungen einer Metaheuristik zur besten bekannten Lösung gezeigt. Zum anderen ist die für das Lösen des VRPTW erforderliche Rechenzeit in Sekunden zugeordnet. Die Werte sind jeweils durchschnittliche, minimale und maximale Werte der Solomon-Klassen R1 und RC1. Die zugrundeliegende Literatur wurde ursprünglich von *Teschmacher* analysiert und in dieser Arbeit mit aktuellen Daten erneut ausgewertet. Aufgrund unterschiedlich verwendeter Hardware ist der Vergleich hinsichtlich der Rechenzeit qualitativ zu sehen (vgl. [Tes-2019, S. 65]). Die vollständige Bewertung der Algorithmen kann in Anhang B nachvollzogen werden.

Der Algorithmus Variable Neighborhood Search (vgl. [Brä-2003]) und sowohl die Tabu Search (vgl. [Tai-1997]) als auch die Scatter Search (vgl. [Rus-2006]) weisen deutlich höhere Rechenzeiten als die anderen Algorithmen auf. Hinsichtlich der prozentualen Abweichungen von der optimalen Lösungen schneiden das Simulated Annealing (vgl. [Chi-1996]), GRASP (vgl. [Kon-1995]), die genetischen Algorithmen (vgl. [Ber-2004]) und die Partikelschwarmoptimierung (vgl. [Gon-2012]) erheblich schlechter ab als die anderen Lösungsverfahren. Der Ameisenalgorithmus (vgl. [Gam-1999]) erreicht

¹⁰ Für die Solomon-Benchmarks (siehe nächster Absatz) erreicht der von *Cook und Rich* verwendete Branch and Cut Algorithmus innerhalb eines Zeitlimits von 50.000 s in 42 % (R1) bzw. 25 % (RC1) der Instanzen die optimale Lösung [Coo-1999].

¹¹ Die Bezeichnung der Klassen der Solomon-Benchmarks ergibt sich durch eine zufällige Verteilung der Klienten im Transportnetzwerk (R) und einen Mix aus zufälliger und geclusterter Verteilung (RC).

sowohl in der Lösungsqualität als auch in der Rechenzeit gute Ergebnisse. Das maschinelle Lernen (vgl. [Hag-2009]) weist in Anwendung auf das VRPTW eine akzeptable Lösungsqualität auf. Von *Haghighi et al.* (vgl. [Hag-2009]) wurden keine Rechenzeiten zur Problemlösung angegeben. Jedoch zeigen sowohl *Ghaziri und Osman* (vgl. [Gha-2006]) als auch *Straub* (vgl. [fml-2019a]), dass Algorithmen des maschinellen Lernens besonders bei großen VRP-Instanzen sehr hohe Rechenzeiten aufweisen. Deswegen erscheint der Ameisenalgorithmus am geeignetsten als Lösungsverfahren für eine dynamische Tourenbildung auf Basis des VRPTW.

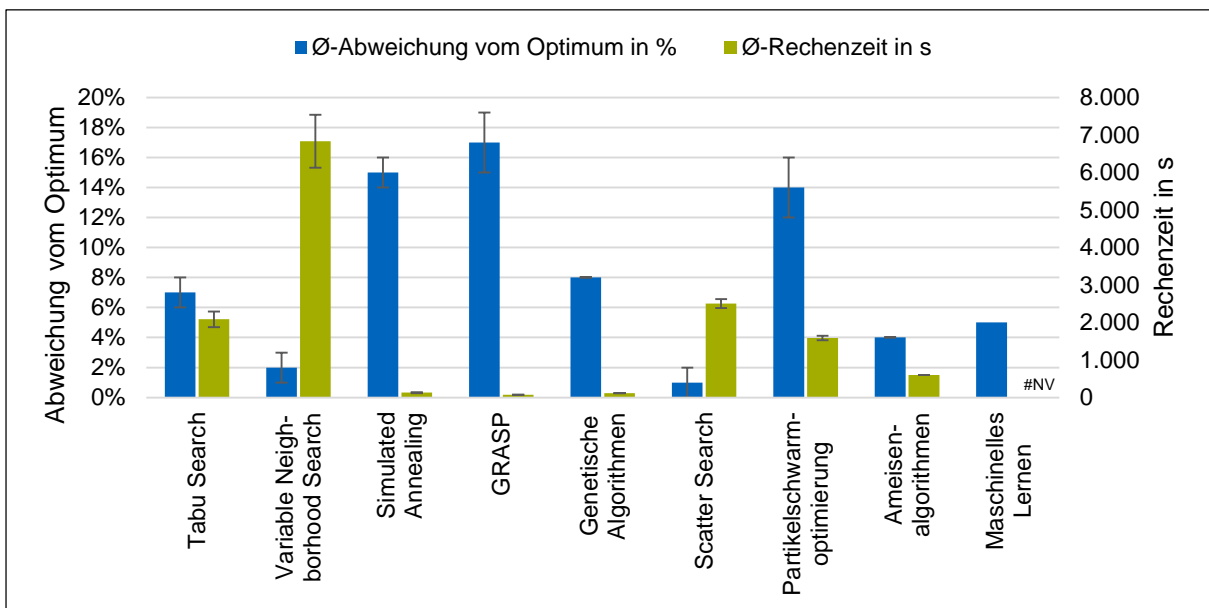


Abbildung 3-3: Gemittelte Bewertung der Metaheuristiken für Tourenplanungsprobleme auf Basis der Solomon-Klassen R1 und RC1 (vgl. [Tes-2019, S. 65])

3.2.3 Problem des Handlungsreisenden

Beim *Problem des Handlungsreisenden* (TSP¹²) nach *Dantzig et al.* werden Orte so zu einer Rundtour zusammengefasst, dass die Distanz der Tour minimal ist [Dan-1954]. Das TSP ist ursprünglich die Basis des VRP [Irn-2014, S. 13]. Jedoch kann es, wie in dieser Arbeit, auch genutzt werden, um durch das VRP gefundene initiale Touren lokal zu optimieren. Da die Zeitfenster der Transportaufträge berücksichtigt werden müssen, ergibt sich das TSPTW (vgl. [Sav-1985]) mit der Materialflussquelle als Start- und Endpunkt einer Tour. Ebenso wie das VRPTW gehört das TSPTW zur Komplexitätsklasse NP [Sav-1985]. In Abbildung 3-4 ist die Entwicklung der Kombinationsmöglichkeiten von Transportaufträgen zu einer Tour in Abhängigkeit der Problemgröße für ein TSP im Routenzugsystem dargestellt. Zeitfenster sind nicht berücksichtigt. Unter der Annahme, dass ein Haltepunkt eines dem Transportauftrag zugeordneten Klienten aus zwei Richtungen und damit mit unterschiedlichen Kosten erreicht werden kann (vgl.

¹² TSP (engl.): traveling salesman problem

Abschnitt 5.2.1), ergeben sich die Kombinationsmöglichkeiten von m Transportaufträgen zu einer Tour $N_{TSP}(m)$ nach Formel (3-10):

$$N_{TSP}(m) = 2^{0,5m(m+1)} \quad (3-10)$$

Je nach Kapazität des Transportmittels bedeutet die Optimierung einer Tour enormen Rechenaufwand. Bei einer GLT-Tour, bei welcher um die vier Transportaufträge transportiert werden, ist der Aufwand mit 1.024 Lösungsmöglichkeiten beherrschbar. Dagegen enthalten KLT-Touren auch über 45 Transportaufträge, wodurch die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten auf über $1 \cdot 10^{300}$ steigen. Eine vollständige Enumeration aller Möglichkeiten ist aufgrund des zeitlichen Aufwands zur Problemlösung nicht mehr vertretbar.

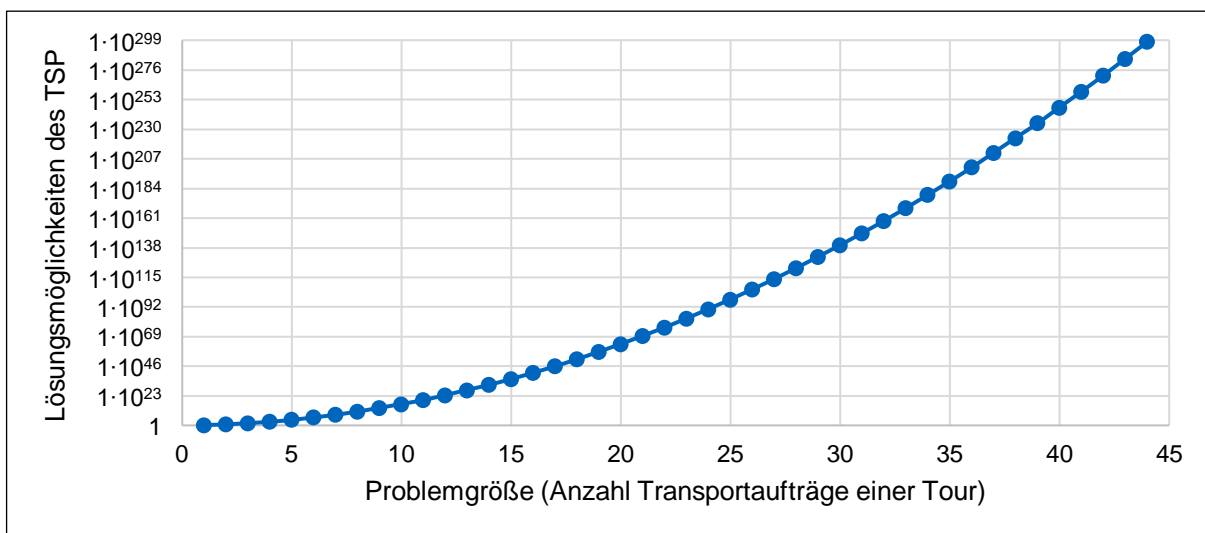


Abbildung 3-4: Lösungsmöglichkeiten des TSP im Routenzugsystem in Abhängigkeit der Problemgröße (ohne Berücksichtigung von Zeitfenstern)

Um die Lösungskomplexität einzuschränken, werden anstelle exakter Verfahren zur Lösung des TSPTW Näherungsverfahren verwendet. Da durch das VRPTW bereits initiale Lösungen für eine Tour bestehen, können lokale Suchverfahren zur Optimierung eingesetzt werden, indem die Reihenfolge der Knoten innerhalb der Tour variiert wird. Dazu werden beim k -Austauschverfahren k Kanten einer Tour mit k anderen Kanten ersetzt. Eine Tour ist k -optimal (k -opt), falls durch den Austausch von k Kanten eine Tour mit geringeren Kosten unter Einhaltung der gültigen Restriktionen erreicht werden kann [Sav-1985]. Lin zeigt, dass der Rechenaufwand mit größer werdendem k steigt, die Lösungsqualität ab $k = 3$ jedoch stagniert [Lin-1965]. In dieser Arbeit werden daher die beiden Fälle $k = 2$ sowie $k = 3$ betrachtet. In Abbildung 3-5 ist die Funktionsweise eines 2-opt Austausches schematisch dargestellt. Die Tour wird in zwei Segmente unterteilt. Dadurch lassen sich die freien Kanten $(i, i + 1)$ und $(j, j + 1)$

durch zwei neue Kanten (i, j) und $(i + 1, j + 1)$ ersetzen. Ungünstige Überschneidungen der initialen Tour werden dadurch gelöst. Dieses Prinzip wird für alle möglichen Kantenpaare der Tour solange wiederholt, bis eine bessere Lösung gefunden wird. Wird eine erlaubte optimierte Tour gebildet, startet der Algorithmus von vorne. Erst wenn alle Paarungen getestet wurden und keine Optimierung erfolgte, ist das 2-opt-Verfahren beendet (vgl. [Sav-1985]). Der 3-opt Austausch funktioniert nach demselben Prinzip. Anstelle von zwei Segmenten werden drei Verbindungen der Tour gelöst und dadurch drei Segmente gebildet [Sav-1985]. Je Segment-Triple können beim symmetrischen TSP sieben Fälle für einen Austausch gebildet werden (vgl. [o. -2017; Sav-1985]) (siehe Abbildung 3-6). Ein Fall ist besser als die verglichene Tour, wenn die Zeitfenster eingehalten werden und die Transportkosten geringer sind [Sav-1985].



Abbildung 3-5: Schematische Funktionsweise eines 2-opt Austausches (vgl. [Psa-1983])

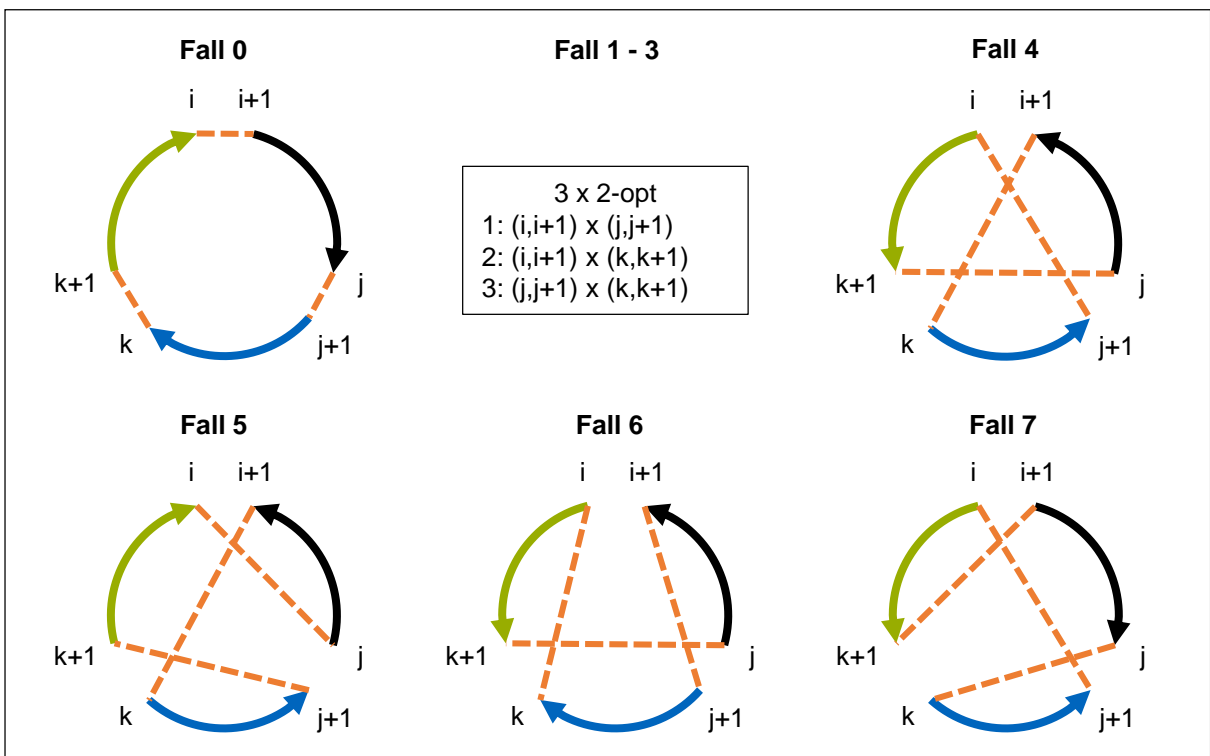


Abbildung 3-6: Schematische Funktionsweise eines 3-opt Austausches (vgl. [o. -2017])

3.3 Routenzugspezifische Steuerungsentscheidungen

3.3.1 Algorithmische Umsetzung

Die in diesem Kapitel erläuterten Steuerungsentscheidungen (siehe Abschnitt 3.1.2) werden in der Literatur zu innerbetrieblichen Routenzugsystemen in unterschiedlicher Art und Weise untersucht. Zum einen werden neben der qualitativen Beschreibung zur Ausgestaltung bestimmter Strategien konkrete Lösungsalgorithmen für die Entscheidungsprobleme entwickelt. Zum anderen werden verschiedene Ausprägungen der Steuerungsstrategien in Experimenten miteinander verglichen, um deren Robustheit und Effizienz zu beurteilen. Literatur zur Beschreibung der qualitativen Gestaltungsmerkmale wurde bereits in Abschnitt 2.2.6 vorgestellt. In diesem Abschnitt werden vorhandene Ansätze zur expliziten algorithmischen Umsetzung routenzugspezifischer Steuerungsentscheidungen aufgeführt. Im folgenden Abschnitt 3.3.2 werden die Untersuchungen zum Vergleich von unterschiedlichen Ausgestaltungen der Entscheidungen dargestellt.

Zur Analyse der algorithmischen Ausgestaltung der Steuerungsentscheidungen wird die Literatur hinsichtlich der Entscheidungen Clusterbildung, Reihenfolgebildung, Tourenbildung, Wegfindung, Abfahrtszeitbestimmung und Ressourcenzuteilung klassifiziert. Im Folgenden wird nur routenzugspezifische Literatur angeführt, die explizite Algorithmen zur Lösung mindestens einer dieser Steuerungsentscheidungen erläutert. Die Literatur wird zur besseren Übersichtlichkeit in rein analytische Verfahren sowie Algorithmen mit integrierter Optimierung unterteilt. Um einen Überblick über die Dynamik der in der Literatur behandelten Entscheidungen zu schaffen, werden des Weiteren die Informationsevolution (IE) sowie die Informationsqualität (IQ) der den Algorithmen zugrunde liegenden Transportbedarfe beurteilt (siehe Abschnitt 3.1.3). Auftretende Ausprägungen der Dynamik der Transportbedarfe sind in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2: Ausprägungen der Dynamik der Transportbedarfe klassifiziert nach Informationsevolution (IE) und Informationsqualität (IQ)

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen		
IE	Statisch (S)		Dynamisch (D)
IQ	Deterministisch (D)	Stochastisch (S)	Prognostiziert (P)

Rein analytische Algorithmen

Die Klassifikation der Literatur mit rein analytischen Verfahren zur Lösung der routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen ist in Tabelle 3-3 dargestellt. Die Literatur

ist nach Erstautor geclustert und in chronologischer Reihenfolge der ersten aufgeführten Veröffentlichung eines Autors sortiert.

Tabelle 3-3: Klassifikation der Literatur zur rein analytischen Lösung der routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen

Literatur	Clusterbildung	Reihenfolgebildung	Tourenbildung	Wegfindung	Abfahrtszeitbestimmung	Ressourcenzuteilung	Dynamik der Transportbedarfe	
							IE	IQ
[Dom-2007]		●	●		●		S	D
[Mei-2011; Mei-2012]					●		S	S
[Dro-2011; Dro-2013a; Dro-2013b]					●		S	S
[Kle-2012]	●				●		S	S
[Gün-2013]					●		S	S
[VDI-5586b]					●		S	S
[Lie-2018b]					●		S	S

Domingo et al. bilden für festgelegte Zeitscheiben individuelle Touren für einen Routenzug. Auf Basis von für eine Zeitscheibe deterministischen Transportaufträgen werden abzufahrende Stationen sowie deren Bearbeitungsreihenfolge analytisch so festgelegt, dass die Transportkapazität des Routenzugs nicht überschritten wird. [Dom-2007]

Meinhardt et al. stellen Untersuchungen zum Tourenstartabstand auf vorab festgelegten Routen vor. Der Zyklus zum Bedienen einer Route wird dabei durch analytische Gleichungen auf Basis durchschnittlicher Transportbedarfe bestimmt. [Mei-2011; Mei-2012]

Darüber hinaus entwickeln *Droste und Deuse* im Rahmen eines mathematischen Planungsmodells einen analytischen Algorithmus auf Basis durchschnittlicher Bedarfe, MTM-Zeiten sowie der Transportkapazität, um in einer frühen Planungsphase für vordefinierte Routen eine Routenzugtaktzeit zu bestimmen [Dro-2011; Dro-2013a, S. 61 ff.]. Der Algorithmus wird ebenso in der Dissertation von *Droste* (vgl. [Dro-2013b]) verwendet.

Klenk et al. stellen für die analytische Dimensionierung von Routenzugsystemen Berechnungen für die Clusterbildung sowie für eine Taktbestimmung vor. Zur

Berücksichtigung von Schwankungen werden stochastisch verteilte Bedarfe zugrunde gelegt [Kle-2012].

Im Gegensatz dazu differenzieren *Günthner et al.* die analytische Berechnung der Routenzugtaktzeit in einen einheitlichen Takt für alle Routen und individuelle Takte je Route. Die Kalkulationen beruhen jeweils auf durchschnittlichen Transportbedarfen je Klienten. [Gün-2013, S. 119 ff.]

Im Rahmen der *VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2* werden die bestehenden Ansätze aufgegriffen und zu einem analytischen Vorgehen zusammengefasst, mit welchem ein Routentakt für eine vorgegebene Route auf Basis durchschnittlicher Bedarfe je Klienten bestimmt werden kann. [VDI-5586b]

Zusätzlich stellen *Liebetruth und Merkl* im Rahmen einer Beschreibung der Routenzugplanung an einem Fallbeispiel nochmals eine analytische Taktzeitberechnung für festgelegte Routen und durchschnittlich bekannte Transportbedarfe je Bereitstellort vor. [Lie-2018b, S. 8 f.]

Algorithmen mit integrierter Optimierung

Neben den rein analytischen Verfahren werden in der Literatur Ansätze zur mathematischen oder simulativen Optimierung der Lösungen der routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen behandelt. Grundlage dafür sind dennoch die analytischen Zusammenhänge im Routenzugsystem. Die Klassifikation der Literatur ist in Tabelle 3-4 dargestellt. Die Literatur ist nach Erstautor geclustert und in chronologischer Reihenfolge der ersten aufgeführten Veröffentlichung eines Autors sortiert.

Vaidyanathan et al. formulieren das JITCVRP für Routenzugsysteme, bei welchem Routen und Touren der Transportmittel für die JIT-Versorgung gebildet werden. Die Touren basieren auf der Annahme konstanter Transportbedarfe und werden permanent wiederholt. Als Lösungsverfahren wird eine zweistufige Heuristik, bestehend aus einer modifizierten *Nearest Neighbor Heuristik* (NNH) sowie einer lokalen 3-opt Verbesserung entwickelt. [Vai-1999]

Choi und Lee stellen einen Algorithmus zur dynamischen Produktionsversorgung vor. Auf Basis des Produktionsfortschritts und -programms werden die Transportaufträge prognostiziert und dynamisch zu Touren zusammengefasst. Die Startzeit einer Tour wird unter Berücksichtigung der Transportzeiten sowie der Bereitstellfenster der Transportaufträge berechnet und dem geeignetsten Fahrzeug zugeteilt. Die Bündelung der Transportaufträge erfolgt mittels einer Einfügeheuristik. Durch Simulationsexperimente wird die Effizienz der dynamischen Produktionsversorgung gezeigt. [Cho-2002]

Tabelle 3-4: Klassifikation der Literatur zu Lösungsalgorithmen für die routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen mit integrierter Optimierung

Literatur	Cluster- bildung	Reihenfolge- bildung	Touren- bildung	Wegfindung	Abfahrtszeit- bestimmung	Ressourcen- zuteilung	Dynamik der Transportbe- darfe	
							IE	IQ
[Vai-1999]	●	●	●		●		S	D
[Cho-2002]		●	●		●	●	D	P
[Dre-2009]	●	●		●	●		S	S
[Emd-2011]	●	●	●		●		S	D
[Emd-2012a]			●		●		S	D
[Emd-2017]			●		●		S	D
[Emd-2018]	●	●			●		S	D
[Fac-2013]					●		D	S
[Kil-2012]	●	●				●	S	D
[Kil-2013]	●	●	●		●		S	D
[Gol-2012]			●		●		S	D
[Gol-2013]	●	●	●		●		S	D
[Sat-2012]	●	●			●		S	D
[Sat-2018]	●	●			●		S	D
[Aln-2013; Aln-2015c]	●		●		●		S	D
[Aln-2014a; Aln-2015c]			●		●		S	D
[Aln-2015b; Aln-2015c]	●		●		●		S	S
[Gyu-2013b; Gyu-2013a]	●	●	●	●			S	D
[Dew-2014; Dew-2020]			●		●	●	S	S
[Fat-2014]			●		●		S	D
[Kle-2015a]	●	●	●		●		D	S
[Kle-2019]			●		●		D	S
[Bae-2016]		●	●				D	D
[Tes-2017; Tes-2019]		●	●		●		D	P
[Urr-2018c]	●	●			●		S	S
[Buy-2019; Buy-2020]	●	●			●	●	S	S
[Boc-2019a]	●	●	●		●	●	S	D
[Boc-2019b]	●	●	●		●		S	D
[Boc-2020]	●	●	●		●		S	D
[Pen-2020]					●		S	D
[Sim-2020]			●				S	D
[Zho-2020]			●		●		S	D

Dreher et al. lösen die Routenbildung und Wegoptimierung durch den Einsatz einer Einfügeheuristik, eines Austauschverfahrens und eines Ameisenalgorithmus. Ausgehend von bekannten durchschnittlichen Transportbedarfen je Klienten werden statische Routen sowie deren exakte Fahrwege im Transportnetzwerk bestimmt. Des Weiteren werden feste Taktzeiten je Route berechnet. [Dre-2009]

Emde und Boysen untersuchen die simultane Touren- und Reihenfolgebildung sowie Abfahrtszeitbestimmung für die JIT-Versorgung von variantenreichen Montagelinien in der Automobilindustrie. Die Entscheidungsprobleme werden durch *Dynamic Programming* (DP) auf der Basis von deterministisch bekannten Transportaufträgen exakt gelöst. Neben einer individuellen statischen Tourenfestlegung einschließlich Fahrplan für einen gewissen Betrachtungszeitraum, z. B. eine Schicht, werden Algorithmen für statische Cluster mit definierten Versorgungszyklen vorgestellt [Emd-2011]. *Emde et al.* fokussieren darauf aufbauend die Tourenbildung und Fahrplanfestlegung auf statischen Routen [Emd-2012a]. Zusätzlich präsentieren *Emde und Gendreau* neben einer exakten Lösung der Touren- und Fahrplanfestlegung auf statischen Routen ein heuristisches Lösungsverfahren für größere Probleminstanzen. Als Heuristiken werden die *Neighborhood Search* sowie *Tabu Search* verwendet. Die Transportbedarfe sind wiederum deterministisch bekannt. Optimierungsziel sind minimale Linienbestände bei absoluter Versorgungssicherheit [Emd-2017]. Darüber hinaus widmen sich *Emde und Schneider* der Cluster- und Reihenfolgebildung mit getakteten Versorgungszyklen. Ziele sind vorrangig die Minimierung der notwendigen Transportmittel und nachrangig die Minimierung der gesamten Transportzeit. Die formulierte Problemstellung wird durch eine NNH sowie eine *Large Neighborhood Search* gelöst. Die zugrundeliegenden Transportaufträge sind deterministisch bekannt und konstant. Die Auswirkung von abweichenden Transportbedarfen wird zusätzlich untersucht [Emd-2018].

Faccio et al. untersuchen die Tourenstartabstände in Abhängigkeit der Anzahl an Kanban-Behältern für vorgegebene Routen. Dazu wird die Abhängigkeit zwischen Transport- und Behälterressourcen analytisch modelliert. Mittels Multiszenariosimulation werden unterschiedliche Parameter variiert und die Versorgungszyklen optimiert. Die Transportaufträge werden im Rahmen der Simulation stochastisch erzeugt. [Fac-2013]

Kilic et al. betrachten ein Routenzugsystem mit statischen Routen und zyklischen Touren. Für vorgegebene maximale Zykluszeiten und deterministische Transportbedarfe werden Routen so bestimmt, dass möglichst wenig Transportmittel und ein geringer Umlaufbestand notwendig sind. Zudem werden den gebildeten Routen eine individuelle Anzahl an Routenzügen fest zugeteilt. Zur Problemlösung werden exakte Verfahren angewendet [Kil-2012]. *Kilic und Durmusoglu* erweitern die Untersuchungen auf

die Festlegung einheitlicher Routentakte unter der Berechnung konstanter Touren. Routenbildung und Taktfestlegung werden heuristisch gelöst [Kil-2013].

Golz et al. stellen ein zweistufiges Verfahren zur Lösung des innerbetrieblichen Transportproblems mit Routenzügen auf. Dabei werden zunächst die Transportaufträge auf Basis des Produktionsprogramms determiniert und anschließend unter Einhaltung von Kapazitäts- und Zeitfensterrestriktionen zu Touren zusammengefasst. Zur Lösung der Tourenbildung wird eine angepasste *Savings Heuristik* eingesetzt. Der Abfahrtszeitpunkt einer Tour wird unter Einhaltung aller Zeitfenster so bestimmt, dass insgesamt möglichst wenig parallele Touren stattfinden, um die Anzahl der notwendigen Transportmittel zu reduzieren [Gol-2012]. Die Algorithmen werden durch *Golz* um eine Stufe der Routenplanung erweitert. Zur Cluster- und Reihenfolgebildung werden ebenso die deterministischen Transportbedarfe verwendet und mittels eines *Distribution Patterns* heuristisch gelöst [Gol-2013, S. 57 ff.].

Satoglu und Sahin entwickeln ein mathematisches Modell zur Routenbildung und Lieferzyklusoptimierung bei bekannten Transportbedarfen. Ausgehend von einem initialen Lieferzyklus werden die Cluster und die Reihenfolge der zugeordneten Stationen heuristisch bestimmt. Anschließend werden die Zyklen der Routen variiert, um den Umlaufbestand zu minimieren [Sat-2012]. Für dieselbe Problemstellung präsentieren *Satoglu und Sipahioglu* ein zweistufiges Vorgehen. Im ersten Schritt werden die Routen sowie Transportzyklen durch die Lösung eines *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) - Problems bestimmt. Anschließend wird im zweiten Schritt die Reihenfolge der Stationen innerhalb einer Route durch Lösen des TSP optimiert. Daneben wird eine alternative Lösung zur simultanen Optimierung beider Problemstellungen angeführt [Sat-2018].

Alnahhal und Noche untersuchen die Routen- und Tourenbildung sowie die Festlegung eines Fahrplans für die Produktionsversorgung aus einem Supermarkt. Die Reihenfolge von Stationen auf einer Route sowie die Kosten, um von einer Station zu einer anderen zu gelangen, werden aufgrund der restriktiven Anordnung an einer Montagelinie als statische Eingangsparameter gesetzt. Die Entscheidungsprobleme werden durch analytische Gleichungen, DP sowie *Mixed Integer Programming* (MIP) optimal gelöst. Die zugrundeliegenden Transportaufträge sind deterministisch bekannt und ändern sich während der Problemlösung nicht. Die Probleme werden parallel betrachtet, um die Anzahl der Transportmittel und die Bestandskosten zu minimieren. Als Restriktionen werden die Kapazität der Transportmittel, ein maximaler Linienbestand, ein maximaler Zeitpuffer sowie eine maximale Zykluszeit verwendet. Die zu fahrenden Touren entsprechen exakt den gebildeten Routen, die in identischen Perioden wiederholt werden. Dazu werden Periodenlänge sowie Periodenstart festgelegt [Aln-2013].

Weitergehende Untersuchungen beschäftigen sich mit einer Flexibilisierung der Tourenbildung. Dazu werden variable Zykluszeiten, das Vorziehen von Transportaufträgen auf frühere Touren sowie die Reduktion von zusätzlichen Transporten betrachtet, um die Transportkapazität und den Linienbestand zu minimieren. Diese Maßnahmen beeinflussen neben der Tourenbildung die Abfahrtszeitbestimmung. Zur Lösung werden *Integer Programming* (IP) und DP verwendet. Um die Auswirkungen der Systemdynamik zu untersuchen, werden auf Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen Transportbedarfsdaten generiert. Die Problemlösung erfolgt auf Basis dieser statischen Datenreihen [Aln-2014a]. Zudem wird von *Alnahhal und Noche* eine Gruppierung der Stationen auf Basis durchschnittlicher Transportbedarfe entwickelt. Für die Tourenbildung und die Abfahrtszeitbestimmung werden Poisson-verteilte Transportbedarfe in einer Kombinationen aus bedarfs- und verbrauchsorientierter Nachschubsteuerung verwendet, um Störungen im System sowie eine Resequenzierung der Montagereihenfolge zu berücksichtigen [Aln-2015b]. Die vorgestellten Untersuchungen werden zudem in der Dissertation von *Alnahhal* (vgl. [Aln-2015c]) aufgeführt.

Gyulai und Monostori entwickeln eine Methodik zur Routenplanung für getaktete Routenzugsysteme. Grundlage dafür ist die Wegfindung innerhalb des Transportnetzwerks durch den Dijkstra-Algorithmus. Die Cluster- und Reihenfolgebildung erfolgt durch einen Greedy-Algorithmus, bei welchem die naheliegendste zulässige Station zuerst gewählt wird. Durch eine *Neighborhood Search* werden die Routen anschließend lokal optimiert. Die zu fahrenden Touren werden durch eine *First-fit Heuristik* unter Einhaltung von Zeitfenstern bestimmt. Als Kalkulationsgrundlage werden deterministische Transportbedarfe verwendet [Gyu-2013b; Gyu-2013a]

Dewitz et al. präsentieren eine Logik zur Fahrplanerstellung für getaktete Routenzugsysteme. Damit kann die Produktionsversorgung mittels KLT-Transportmittel ausgelegt und gesteuert werden. Basis dafür sind vorgegebene Routenverläufe, für welche ein jeweils fester Takt bestimmt wird, sodass möglichst wenig Ressourcen benötigt werden. Die Berechnungen erfolgen auf Grundlage von durchschnittlichen Transportbedarfen. Unter der Berücksichtigung von Restriktionen können die Ressourcen zwischen den vordefinierten Routen wechseln. Zur Lösung der Problemstellung wird ein MILP verwendet. [Dew-2014]. Diese Logik wird im Rahmen der Dissertation von *Dewitz* (vgl. [Dew-2020]) detailliert.

Fathi et al. entwickeln ein MILP Modell für die JIT-Versorgung von Montagelinien. Als Lösungsverfahren wird eine Heuristik auf Basis des *Simulated Annealing* verwendet, um die Anzahl der Touren sowie die Bestände zu minimieren. Dazu werden die Tourenbildung sowie die Abfahrtszeitbestimmung ausgehend von deterministisch bekannten Transportaufträgen betrachtet. [Fat-2014]

Klenk et al. präsentieren eine *Best-fit Heuristik* zur Routenbildung mit gleichmäßig verteilten durchschnittlichen Transportbedarfen. Zudem werden zusätzlich zum Routenzugtakt verschiedene Betriebsstrategien für die Tourenbildung und die Abfahrtszeitsteuerung in Ausnahmefällen entwickelt und simulativ untersucht [Kle-2015a]. Darüber hinaus werden die Auswirkungen von verschiedenen Logiken zur Abfahrtszeitbestimmung bei kurzfristig bekannten Transportbedarfen simuliert. Dazu werden die Strategien *Getaktet*, *Maximale Kapazitätsauslastung*, *Minimale Wartezeit* und *Späteste Bereitstellzeit* entwickelt. Diese Abfahrtsstrategien beeinflussen zugleich die Tourenbildung [Kle-2019].

Bae et al. stellen eine dynamische Tourenbildung auf Basis kurzfristig bekannter Transportbedarfe vor. Die Bündelung der Aufträge zu einer Tour erfolgt nach dem FIFO-Prinzip, die Auslieferreihenfolge wird durch die Lösung des TSP mittels IP bestimmt. Die Evaluation der Strategie erfolgt ebenfalls durch Simulation. [Bae-2016]

Teschemacher und Reinhart entwickeln zur dynamischen Tourenplanung in Routenzugsystemen einen Ameisenalgorithmus. Basierend auf aus dem Produktionsprogramm abgeleiteten Transportbedarfen werden damit für die aktuelle Auftragslage möglichst wenig, möglichst kurze Touren, die die Zeitfensterrestriktionen der Transportaufträge einhalten, gebildet [Tes-2017]. Um die Anzahl der gleichzeitig zu verarbeitenden Aufträge und damit die Optimierungspotentiale zu erhöhen, erweitert *Teschemacher* diesen Algorithmus um ein Vorhersagemodell der eintretenden Transportaufträge [Tes-2019].

Urru et al. stellen eine Methode vor, um zum einen Routen mittels eines *First-fit Algorithmus* sowie einer *Greedy Search Heuristik* zu bestimmen und zum anderen Taktzeiten für diese Routen festzulegen. Die analytische Berechnung der Taktzeiten erweitert das Modell der VDI-Richtlinie 5586 um Informationsflussprozesse und eine Worst-Case Kalkulation. [Urr-2018c]

Buyukozkan et al. bestimmen für Transporteinheiten, die für die Belieferung mittels Routenzugkonzept geeignet sind, Routen sowie Taktzeiten durch eine Kombination aus Metaheuristik und mathematischer Programmierung. Ebenso werden die je Route erforderlichen Transportmittel durch das Lösungsverfahren bestimmt. Eine optimale Lösung wird nicht garantiert [Buy-2019]. Um auch größere Instanzen lösen zu können, wird zusätzlich ein *Bienenkolonie-Algorithmus* eingesetzt [Buy-2020].

Bocewicz et al. fokussieren die Abhängigkeit von Produktionstakt und Umfang der Transportaufträge im Rahmen zyklischer Routenzugsysteme mit statischen Routen. Die Routen, darauf zu absolvierende Touren sowie der dafür gültige Fahrplan werden

auf Basis von deterministisch bekannten Transportaufträgen in Abhängigkeit des Produktionstakts bestimmt. Optimierungsziele sind minimale Transport- sowie Lagerkapazitäten. Zur Problemlösung wird ein *Constraint Optimization Problem* formuliert, das exakt gelöst wird [Boc-2019a]. Des Weiteren werden Routenbildung und Fahrplanfestlegung unter der Vermeidung von Deadlocks im Materialfluss untersucht. Dazu wird ein *Constraint Satisfaction Problem* im Rahmen eines deterministischen Systems aufgestellt [Boc-2019b]. Schließlich werden die Lösungsverfahren auf das *Pick-up and Delivery Problem* für Routenzüge erweitert [Boc-2020].

Peng et al. betrachten die Abfahrt der Routenzüge für die JIT-Produktionsversorgung. Die Touren werden auf einer möglichen Route so geplant, dass das Material möglichst nah zum Verbrauch in der Produktion bereitgestellt wird. Dazu wird eine Heuristik entwickelt, die darauf abzielt, die Anzahl der notwendigen Routenzüge zu reduzieren. [Pen-2020]

Simić et al. untersuchen die Tourenbildung in Abhängigkeit der Transportkapazität der Routenzüge für ein Kanban-System. Die Basis dafür sind feste Routen mit vordefiniertem Routentakt. Zur Optimierung der Kapazität bei der Tourenbildung werden iterative Berechnungen durch eine *Schwarmoptimierung* durchgeführt. [Sim-2020]

Zhou und Zhu betrachten die Tourenbildung und Abfahrtszeitbestimmung von Routenzügen mit dem Ziel die Bestände an der Produktionslinie zu minimieren. Dazu wird ein *immuner Klon-Selektionsalgorithmus* in Verbindung mit einer lokalen Nachbarschaftssuche verwendet. Zudem wird gezeigt, dass der Bestand mit einer zunehmenden Anzahl an Routenzügen verringert wird. [Zho-2020]

3.3.2 Vergleich verschiedener Ausprägungen

Im Folgenden wird die Literatur zum Vergleich verschiedener Ausprägungen der Steuerungsentscheidungen vorgestellt. In Tabelle 3-5 ist je Literaturquelle dargestellt, für welche routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen Ausprägungen variiert und miteinander verglichen werden. Die Literatur ist nach Erstautor geclustert und in chronologischer Reihenfolge der ersten aufgeführten Veröffentlichung eines Autors sortiert.

Choi und Lee vergleichen für einen konkreten Anwendungsfall die statische Tourenbildung auf Basis einer vordefinierten Route mit einer dynamischen Tourenbildung, bei welcher die Bedienreihenfolge aufgrund der aktuellen Auftragslage gebildet wird. Im statischen Fall werden einmal täglich Touren mit einem Zyklus von zwei Stunden bestimmt. Im dynamischen Fall starten Touren bei ausreichender Auslastung. Durch die

dynamische Tourenbildung kann das Bestandsniveau um 10 % gegenüber der statischen Tourenbildung gesenkt werden. [Cho-2002]

Im Gegensatz dazu variieren *Costa et al.* die Länge von statischen Routen für eine vorgegebene Taktzeit von 20 Minuten. Die Simulationsexperimente zeigen, dass die Systemauslastung bei längeren Routen gegenüber kürzeren Routen bis hin zu einem Grenzwert erhöht werden kann. [Cos-2008]

Tabelle 3-5: Klassifikation der Literatur zum Vergleich verschiedener Ausprägungen der Lösungsalgorithmen der routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen

Literatur	Cluster- bildung	Reihenfolge- bildung	Touren- bildung	Wegfindung	Abfahrtszeit- bestimmung	Ressourcen- zuteilung
[Cho-2002]		●	●		●	
[Cos-2008]	●	●				
[Eri-2008]	●	●				
[Dro-2011; Dro-2013b]					●	
[Dro-2013a; Dro-2013b]					●	
[Mei-2011; Mei-2012]					●	
[VDI-5586b]					●	
[Mei-2018]		●			●	
[Dia-2012]					●	
[Gol-2012]			●		●	
[Kil-2012]						●
[Fac-2013]					●	
[Aln-2014a; Aln-2015c]			●		●	
[Dew-2014; Dew-2020]					●	●
[Kle-2015a]			●			
[Kle-2017]	●				●	
[Kle-2019]					●	
[Bae-2016]		●				
[Sta-2016]		●			●	
[Emd-2017]					●	
[Emd-2019]					●	
[Roe-2017]					●	
[Boc-2019a]	●	●				

Eriksson und Hanson betrachten ebenso die Routenbildung für feste Zeitintervalle. Durch einen qualitativen Vergleich von festen und variablen Routen werden beide Konzepte bewertet. Fixe Routen weisen demnach eine einfache Umsetzung sowie eine geringe Fehleranfälligkeit auf. Zudem sind die Abläufe transparent und vorhersehbar. Die Wiederbeschaffungszeit wird bei fixen Routen des Weiteren überwiegend als geringer als bei variablen Routen eingestuft, da Transportbedarfe im Kanban-System durch den Routenzugfahrer schneller erkannt werden können. [Eri-2008]

Für statische Routen untersuchen *Droste und Deuse* die Auswirkungen unterschiedlicher Versorgungszyklen auf den Bestand an den Arbeitsstationen. Durch eine Reduzierung der Zykluszeit kann Bestand eingespart werden. Eine höhere Versorgungsfrequenz führt demnach zu einem platzsparenderen und transparenteren Prozess [Dro-2011]. In weiterführenden Untersuchungen wird durch die Anpassung der Routenzugtaktzeit der optimale Betriebspunkt für das Routenzugsystem unter Berücksichtigung der zeitlichen, kapazitiven und ergonomischen Auslastung bestimmt [Dro-2013a, S. 104 f.]. Die Vergleiche werden ebenso in der Dissertation von *Droste* präsentiert (vgl. [Dro-2013b]).

Meinhardt et al. untersuchen zunächst ebenfalls den Effekt unterschiedlicher Tourenstartabstände auf statischen Routenverläufen. Je größer der Tourenstartabstand gewählt wird, desto weniger Züge werden für den Betrieb gebraucht und desto höher ist der Gesamtnutzungsgrad. Gleichzeitig bedingen längere Versorgungszyklen eine höhere maximale Wiederbeschaffungszeit sowie erhöhte Pufferbestände, um einen stabilen Systembetrieb zu gewährleisten [Mei-2011; Mei-2012]. Die Erkenntnisse werden ebenso in die *VDI-Richtlinie 5586* eingebracht (vgl. [VDI-5586b]). Weiterführend werden die Konzepte der statischen und dynamischen Routen miteinander verglichen. Bei statischen Routen wird ein fester Fahrplan verwendet. Bei dynamischen Routen erfolgt die Abfahrt einer Tour nach Bedarf. Die Zusammenfassung der Aufträge zu Touren erfolgt in beiden Konzepten nach dem FIFO-Prinzip. In vereinfachten Experimenten wird gezeigt, dass das Konzept der statischen Routen sowohl hinsichtlich Planbarkeit als auch Effizienz vorteilhafter als das Konzept der dynamischen Routen ist. Dies gilt insbesondere bei höheren Transportbedarfen und Schwankungen. Die negative Bewertung der dynamischen Routen wird auf das FIFO-Prinzip beim Beladen zurückgeführt [Mei-2018].

Dias et al. untersuchen wiederum die Auswirkung unterschiedlicher Taktzeiten auf den Pufferbestand bei vorgegebenen Routen. Zwischen den beiden Größen wird eine positive lineare Korrelation nachgewiesen. Je größer die Routenzugtaktzeit ist, desto mehr Pufferbestand ist für einen stabilen Systembetrieb notwendig. Je kleiner die

Taktzeiten gewählt werden, desto mehr unnötige Transportwege entstehen jedoch. [Dia-2012]

Golz et al. vergleichen für statische Routen zwei Konzepte zum Start der Tourenbildung und zur Abfahrtszeitbestimmung. Beim ersten Konzept erfolgt die Tourenbildung auf Basis der Aufträge von Kanban-Abrufen. Beim zweiten Konzept werden die Aufträge proaktiv aufgrund des Produktionsprogramms antizipiert. Die Touren starten in vorgegebenen Zeitintervallen. Für mittlere und größere Szenarien können durch das proaktive Konzept Fahrer gegenüber der klassischen Kanban-Tourenbildung eingespart werden. Des Weiteren werden durch eine Reduzierung des Tourenstartintervalls deutlich weniger Sonderfahrten benötigt. [Gol-2012]

Kilic et al. betrachten unterschiedliche Ausprägungen der Ressourcenzuteilung zu vorhandenen Routen bei statischen Routenzugtaktzeiten. Unterschieden werden die feste Zuteilung eines Fahrzeugs zu einer Route und die flexible Zuteilung eines Fahrzeugs zu mehreren Routen. Durch die flexible Ressourcenzuteilung können Fahrzeuge eingespart und Wartezeiten am Depot erheblich reduziert werden. [Kil-2012]

Faccio et al. fokussieren den Vergleich verschiedener Wiederbeschaffungszeiten als Eingangsparameter für die Abfahrtszeitbestimmung. In den Untersuchungen wird gezeigt, dass eine vorgegebene Wiederbeschaffungszeit die Stabilität der Produktionsversorgung erst ab hohen Werten negativ beeinflusst. [Fac-2013]

Alnahhal und Noche betrachten verschiedene Strategien zur Tourenbildung und Abfahrtszeitbestimmung auf statischen Routen, um die JIT-Versorgung zu garantieren. Verglichen werden variable Abfahrtszeiten, ein Vorziehen von Aufträgen und eine Minimierung von zusätzlichen Anhängern. Durch eine Kombination aller drei Strategien zu einer integrierten Steuerung werden die besten Resultate hinsichtlich der Versorgungssicherheit erreicht [Aln-2014a]. Die Strategien werden ebenso in der Dissertation von *Alnahhal* gegenübergestellt (vgl. [Aln-2015c]).

Dewitz et al. vergleichen zum einen die feste sowie die flexible Mitarbeiterdisposition zu Routen und zum anderen überschneidungsfreie sowie nicht überschneidungsfreie Abfahrtszeiten der Touren. Durch die Verbindung von flexibler Mitarbeiterdisposition und einer Reduzierung der Überschneidungen beim Tourenstart lassen sich erhebliche Effizienzpotentiale erzielen [Dew-2014]. Die Untersuchungen werden ebenso in der Dissertation von *Dewitz* gezeigt (vgl. [Dew-2020]).

Um verspätete Lieferungen bei Bedarfsspitzen in Kanban-Systemen zu vermeiden, betrachten *Klenk et al.* folgende drei Tourenbildungsausnahmestrategien:

Sonderdirekttransporte, Sondertouren und Auftragsverlagerungen. Durch die Verlagerung von Transportaufträgen auf spätere Touren können die Transportbedarfe am kostengünstigsten geglättet werden. Da sich dadurch jedoch die Wiederbeschaffungszeiten verlängern, kann die Strategie bei zeitkritischen Transportaufträgen nicht angewandt werden [Kle-2015a]. *Klenk* untersucht mit einem entwickelten analytischen Modell des Weiteren die Auswirkung verschiedener Strategien zur Abfahrtszeitbestimmung und Clusterbildung auf die Durchlaufzeiten der Transportaufträge. Hinsichtlich der Abfahrtszeitstrategien werden einerseits verschiedene Taktzeiten betrachtet. Dabei wird gezeigt, dass größere Routenzugtaktzeiten zu breiter streuenden Durchlaufzeiten führen. Andererseits werden unterschiedliche Zeitgrenzen für einen spätesten Tourenstart verglichen. Unterschiede in den sehr breiten Durchlaufzeitverteilungen sind für diese Strategie kaum vorhanden. Zudem wird gezeigt, dass ein permanenter Tourenstart zu geringen Durchlaufzeiten mit geringen Streubreiten führt. Für diese Strategie werden insgesamt die kürzesten erwarteten Durchlaufzeiten der Transportaufträge erreicht. Zusätzlich wird gefolgert, dass die Steuerungsstrategien *Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze* sowie *Permanent* insbesondere in Systemen mit hoher Auslastung am besten zum Umgang mit Schwankungen der Transportbedarfe geeignet sind. Daneben werden die Abfahrtszeitstrategien in Abhängigkeit der Anzahl an Bereitstellorten je Route untersucht. Für die beiden Strategien *Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze* sowie *Getaktet* sind die Durchlaufzeiten bei größeren Routen geringer als bei Routen mit weniger zugeordneten Bereitstellorten, da mehr Transportaufträge pro Zeiteinheit zur Verfügung stehen und die Touren deshalb in einer höheren Frequenz durchgeführt werden. Für die Tourenstartstrategie *Permanent* weisen die Durchlaufzeiten keine Abhängigkeit von der Routengröße auf [Kle-2017, S. 211 ff.]. *Klenk und Galka* überprüfen die Abfahrtszeitstrategien mit ereignisdiskreter Simulation. Als zusätzliche Strategie wird die *Späteste Abfahrtszeit* unabhängig von der Kapazitätsauslastung vorgestellt. Durch Experimente mit verschiedenen Szenarien werden die oben getroffenen Aussagen bestätigt. Zudem wird gezeigt, dass die Strategie *Späteste Abfahrtszeit* hohe mittlere Durchlaufzeiten sowie ein hohes Risiko von verspäteten Bereitstellungen beinhaltet [Kle-2019].

Bae et al. variieren die Abfahrtsreihenfolge der Bereitstellorte innerhalb einer Route in Abhängigkeit der Orientierung der Materialflussquelle. Dabei werden sowohl manuell als auch durch Lösung des TSP optimierte Reihenfolgen miteinander verglichen. Zusätzlich zur Betrachtung der statischen Route werden dynamische Tourenreihenfolgen auf Basis von FIFO-Touren betrachtet. Mittels Simulation wird an einem Anwendungsfall gezeigt, dass für ein Routenzugsystem mit einem Zug die statisch optimierte Reihenfolgebildung die besten Ergebnisse liefert. Bei Systemen mit zwei Zügen erzielen alle betrachteten Strategien die gleichen Ergebnisse. [Bae-2016]

Staab et al. variieren wiederum den Zeitversatz zwischen den Tourenstarts auf verschiedenen Routen, um den gleichzeitigen Zugriff auf Ressourcen, z. B. Beladestationen, zu reduzieren. Des Weiteren werden die Reihenfolgen der Stationen auf den Routen angepasst, um Kreisschlüsse innerhalb einer Route sowie Staus im Verkehrsfluss zu vermeiden. In Simulationsexperimenten wurde für ein Anwendungsbeispiel gezeigt, dass die Routen im Mittel deutlich gekürzt und die mittlere Zykluszeit reduziert werden konnten. [Sta-2016]

Emde und Gendreau betrachten die Erstellung eines getakteten Fahrplans. Dabei werden eine einfache Strategie, bei der jeder Bereitstellort in einem Zyklus besucht wird, mit einer komplexeren Strategie, bei welcher manche Bereitstellorte Versorgungszyklen auslassen, verglichen. Es wird gezeigt, dass die komplexere Strategie zu einer Halbierung des Linienbestands im Vergleich zur einfachen Strategie führen kann [Emd-2017]. Darüber hinaus untersuchen *Emde und Polten* die Auswirkung verschiedener Lieferzyklen auf den Linienbestand. Aus den Ergebnissen wird gefolgert, dass eine beinahe lineare Abhängigkeit zwischen den beiden Größen besteht. Durch eine Verdopplung der Lieferfrequenz können die Linienbestände um 30 % reduziert werden [Emd-2019].

Roessler et al. vergleichen ebenso unterschiedliche Strategien zur Bestimmung der Abfahrtszeit einer Tour auf einer vorgegebenen statischen Route. Zum einen wird der Tourenstart durch einen statischen, zyklischen Fahrplan bestimmt, zum anderen beginnen Touren in Abhängigkeit der Nachfrage in einem Kanban-System. Es wird für verschiedene Szenarien gezeigt, dass der nachfrageorientierte Tourenstart im Vergleich zur statischen Versorgung besonders bei einem hohen Variantenmix im Produktionsprogramm einen positiven Effekt auf die Systemauslastung hat. Demgegenüber steht jedoch ein höherer Umlaufbestand, da durch eine höhere Tourenfrequenz mehr Material in das Routenzugsystem geliefert wird. [Roe-2017]

Bocewicz et al. beschäftigen sich mit unterschiedlichen Ausprägungen der Cluster- und Reihenfolgebildung, indem verschiedene Routenführungen miteinander verglichen werden. Die Computerexperimente ergeben, dass neben Produktionstakt, Anzahl der notwendigen Routenzüge sowie Umlaufbestand die Routenführung einen Einfluss auf die Systemeffizienz hat. Daraus wird gefolgert, dass ebenso die Produktionsstruktur die Leistung der Produktionsversorgung beeinflusst. [Boc-2019a]

3.4 Detaillierung der Forschungslücke

Ausgehend von den Forschungsfragen dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.3) wurde in den Kapiteln 2 und 3 der zugehörige Stand der Wissenschaft vorgestellt. Die daraus resultierende Forschungslücke wird in diesem Abschnitt detailliert.

Die **Hauptforschungsfrage** beschäftigt sich mit der Konzeption einer dynamischen Steuerungsstrategie. Der Stand der Wissenschaft enthält bereits relevante Steuerungsentscheidungen sowie Algorithmen für deren Lösung. Wie in Abbildung 3-7 dargestellt, basieren die meisten dieser Lösungsalgorithmen jedoch auf statisch bekannten Transportbedarfen. Dynamische Transportbedarfe, welche die Basis einer dynamischen Routenzugsystemsteuerung sind, werden nur selten, und dann auf einen konkreten Anwendungsfall bezogen, betrachtet.

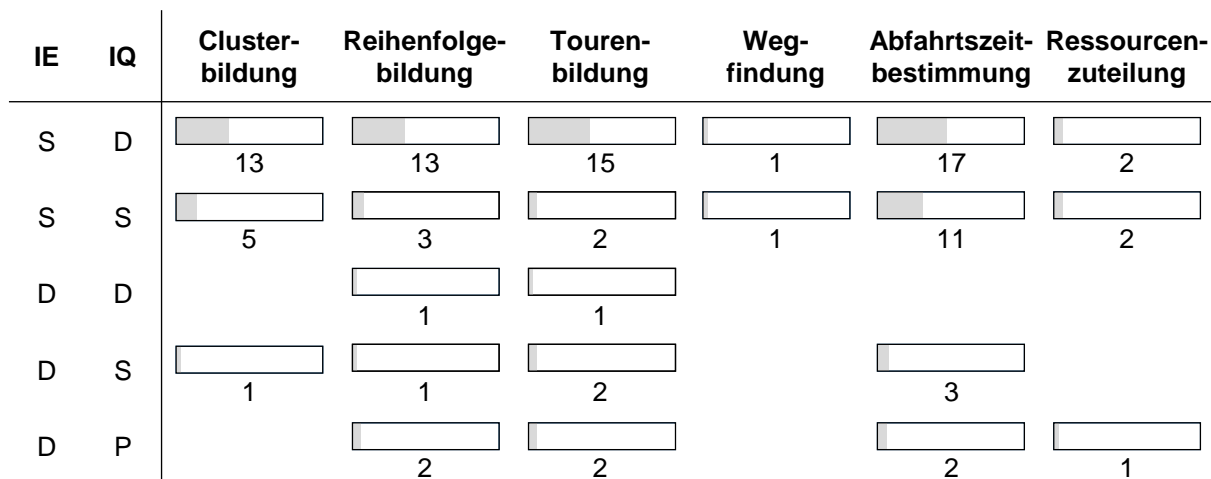


Abbildung 3-7: Anzahl der in der Literatur vorgestellten Algorithmen zu den routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen kategorisiert nach Informationsevolution (IE) und Informationsqualität (IQ) der Transportbedarfe (vgl. Tabelle 3-3, S. 53 und Tabelle 3-4, S. 55)

Eine integrierte Betrachtung aller relevanten Steuerungsentscheidungen in einem Lösungsverfahren konnte nicht gefunden werden. Insbesondere die Wegfindung auf Basis dynamischer Transportaufträge wurde bisher für Routenzugsysteme nicht untersucht. Dennoch können Teilverfahren der im Stand der Wissenschaft vorgestellten Literatur für diese Arbeit adaptiert werden. Insbesondere die dynamischen Strategien von *Klenk und Galka* (vgl. [Kle-2019]) sowie *Teschmacher und Reinhart* (vgl. [Tes-2017; Tes-2019]) werden als Basis für eine Weiterentwicklung verwendet.

Durch die Beantwortung der **ersten Forschungsunterfrage** sollen repräsentative Merkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen identifiziert werden. In Abschnitt 2.2 wurden dazu als Ausgangsbasis Beschreibungsmodelle im Stand der

Wissenschaft vorgestellt. Ebenso sind drei umfassende empirische Untersuchungen zu den in der Praxis auftretenden Merkmalsausprägungen aufgeführt (vgl. [Dro-2013b, S. 27 ff.; Gün-2012; Lie-2017a]). *Klenk* (vgl. [Kle-2017]) leitet auf dieser Basis bereits häufige Routenzugprozesse ab. *Keuntje* (vgl. [Keu-2019]) fokussiert bei der Auswertung der Studien die technischen Gestaltungsmerkmale. Eine begründete Auswahl von Merkmalen, die für Referenzsysteme im Rahmen der Routenzugsystemsteuerung relevant sind, konnte im Stand der Wissenschaft nicht gefunden werden. Ebenso werden keine Routenzugreferenzsysteme, die sich auf eine integrierte Auswertung von Merkmalsausprägungen der Randbedingungen, der Organisation, der Prozesse und der Technik der in der Praxis vorhandenen Systeme stützen, beschrieben.

Die **zweite Forschungsunterfrage** betrachtet den Einfluss der Dynamik einer Steuerung auf die Effektivität und Effizienz des Routenzugsystems. Abbildung 3-8 gibt eine Übersicht, welche Steuerungsentscheidungen in verschiedenen Ausprägungen miteinander im Stand der Wissenschaft verglichen werden.

	Cluster- bildung	Reihenfolge- bildung	Touren- bildung	Weg- findung	Abfahrtszeit- bestimmung	Ressourcen- zuteilung
Cluster- bildung	4	3			1	
Reihenfolge- bildung	3	7	1		3	
Touren- bildung		1	4		3	
Wegfindung						
Abfahrtszeit- bestimmung	1	3	3		17	1
Ressourcen- zuteilung					1	2

Abbildung 3-8: Anzahl der in der Literatur vorgestellten Vergleiche von Ausprägungen verschiedener Steuerungsentscheidungen (vgl. Tabelle 3-5, S. 61)

Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung unterschiedlicher statischer Routenzugtaktzeiten bei der Abfahrtszeitbestimmung. Dennoch werden auch dynamische Ausprägungen einzelner Steuerungsentscheidungen mit statischen Ausprägungen verglichen und in ihrer Effizienz beurteilt (vgl. z. B. [Cho-2002; Mei-2018; Kle-2019]). Die Untersuchungen beschränken sich aber auf einzelne Steuerungsentscheidungen oder sind nach Angabe der Autoren aufgrund vereinfachter Annahmen nicht auf andere Anwendungsfälle übertragbar. Ein Vergleich von Steuerungsstrategien, die unterschiedliche Dynamikausprägungen für alle Steuerungsentscheidungen aufweisen, sowie

deren Beurteilung hinsichtlich der Auswirkungen auf die Routenzugsystemeffizienz konnten im Stand der Wissenschaft nicht gefunden werden.

Die **dritte Forschungsunterfrage** beschäftigt sich mit der Untersuchung des Einflusses von Systemmerkmalen auf die Effektivität und Effizienz der dynamischen Steuerungsstrategien. Im Stand der Wissenschaft wurde der Einfluss von Systemmerkmalen auf den generellen Einsatz von Routenzugsystemen (vgl. Abschnitt 2.3) beschrieben. Ebenso existieren Untersuchungen zum Einfluss von Systemmerkmalen auf statische Steuerungsausprägungen, wie z. B. die Routenzugtaktzeit oder die Festlegung statischer Routen. Veröffentlichungen zum Einfluss von Systemmerkmalsausprägungen auf die Effizienz einer dynamischen Routenzugsystemsteuerung wurden nicht gefunden.

Die beschriebene Forschungslücke soll in dieser Arbeit geschlossen werden. Dazu wird im folgenden Kapitel 4 zunächst die erste Forschungsunterfrage bearbeitet.

4 Identifikation repräsentativer Routenzugreferenzsysteme

Als Grundlage für die Untersuchung der zu konzipierenden Steuerungsstrategien werden in diesem Kapitel repräsentative Routenzugreferenzsysteme identifiziert (Forschungsunterfrage 1). Zur methodischen Einschränkung des Betrachtungsraums werden zunächst Anforderungen an die Routenzugreferenzsysteme aufgestellt (Abschnitt 4.1). Unter deren Berücksichtigung werden auf Basis der Morphologie zur Beschreibung von Routenzugsystemen aus Abschnitt 2.2 repräsentative Merkmale und Merkmalsausprägungen ausgewählt (Abschnitt 4.2). Letztlich erfolgt in Abschnitt 4.3 die Kombination der Merkmalsausprägungen zu repräsentativen Routenzugreferenzsystemen.

4.1 Anforderungen an Routenzugreferenzsysteme

Die in dieser Arbeit entwickelten Steuerungsstrategien sollen auf die Einsatzszenarien und Systemkonfigurationen realer Routenzugsysteme anwendbar sein. Durch die zahlreichen Merkmale und Merkmalsausprägungen sowie Restriktionen bei deren Kombination zu einem Gesamtsystem sind Planungs- und Steuerungsaufgaben in Routenzugsystemen komplex. Sowohl Einsatzszenarien als auch Systemkonfigurationen von Routenzugsystemen weisen im praktischen Betrieb eine hohe Vielfalt auf [Lie-2017a, S. 12]. Die im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) erhobenen Daten zeigen, dass die Kombination aus Einsatzszenario und Systemkonfiguration für jedes untersuchte System individuell ist¹³. Somit gleicht kein Routenzugsystem einem anderen.

Um die Varianz der zu untersuchenden Routenzugsysteme einzuschränken, werden in diesem Kapitel Referenzsysteme abgeleitet. Ein Referenzsystem besteht aus der fixen Kombination einzelner Merkmalsausprägungen aller steuerungsrelevanten Merkmale zur Beschreibung eines Routenzugsystems. Auf Basis der von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) erhobenen Daten wurden durch die Mitautoren der Studie *Klenk* (vgl. [Kle-2017]) und *Keuntje* (vgl. [Keu-2019]) bereits häufige Prozesse und häufige technische Gestaltungsmerkmale ausgewertet. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, wurden Referenzsysteme, die aus der Kombination von Randbedingungen, organisatorischen

¹³ Zusätzliche Auswertung der von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) erhobenen Daten: Bei 183 Datensätzen treten 99 % der Einsatzszenarien und 100 % der Systemkonfigurationen individuell einzigartig auf. In Kombination gleicht kein Routenzugsystem einem anderen.

sowie technischen Merkmalen und Handhabungsprozessen bestehen, noch nicht identifiziert.

Ein Referenzsystem soll in diesen vier Dimensionen beschrieben werden. Die Gestaltungsmerkmale der Tourenbildung werden nicht analysiert, da dies der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen dieser Arbeit ist. Ein Referenzsystem soll des Weiteren folgende drei Anforderungen erfüllen:

- Steuerungsrelevanz,
- Praxisnähe und
- Repräsentativität.

Steuerungsrelevanz

Nicht alle Merkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen haben einen Einfluss auf die Wahl der Steuerungsstrategie. Merkmale, wie z. B. die Antriebsform des Transportmittels, beeinflussen die Steuerung nicht, sofern Ladezyklen außer Acht gelassen werden. Genauso haben Detailmerkmale, wie z. B. die Anordnung der Rollen eines Anhängers oder die Kupplungsform, nur einen geringen Einfluss auf die Zykluszeit einer Tour und damit auf die Effizienz der Steuerungsstrategie. Einige dieser nicht steuerungsrelevanten Merkmale wurden bereits in der Morphologie in Abschnitt 2.2, die durch eine Literaturanalyse entstand, begründet ausgelassen. Für alle Merkmale, die im Beschreibungsmodell enthalten sind, wird in Abschnitt 4.1 die Steuerungsrelevanz argumentativ bewertet.

Praxisnähe

Ziel dieser Arbeit ist eine praxisnahe Untersuchung, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die Realität zu ermöglichen (vgl. [VDI-3633b]). Die Referenzsysteme sollen auf den Merkmalsausprägungen von realen Routenzugsystemen basieren. Ein Referenzsystem darf zudem keine sich gegenseitig ausschließenden Merkmalsausprägungen aufweisen. Um die Praxisnähe zu gewährleisten, basiert die Identifikation der Referenzsysteme auf einer im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit durchgeführten empirischen Datenerhebung zum Einsatz von Routenzugsystemen mit insgesamt 241 validen Teilnehmern (vgl. [Lie-2017a]).

Repräsentativität

Ein repräsentatives Referenzsystem steht stellvertretend für die real auftretenden Einsatzszenarien. Deswegen sollen alle notwendigen Merkmalsausprägungen berücksichtigt werden. Zudem soll eine große Bandbreite aller real auftretenden Merkmalsausprägungen integriert sein. Da aufgrund der Variantenvielfalt von Routenzugsystemen nicht alle individuellen Systeme im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden

können, soll zumindest ein Großteil aller auftretenden Merkmalsausprägungen je steuerungsrelevantem Merkmal in Referenzsystemen abgebildet werden. Die Datengrundlage zur Auswertung (vgl. [Lie-2017a]) wird als grundsätzlich ausreichend repräsentativ für reale Routenzugsystem erachtet, da bei deren Erhebung keine einschränkende Selektion hinsichtlich Merkmalsträgern stattfand. Neben der reinen Auftretenshäufigkeit einer Merkmalsausprägung ist insbesondere deren Wechselwirkung mit anderen Ausprägungen für die Auswahl eines repräsentativen Routenzugreferenzsystems zu beachten.

Im folgenden Abschnitt 4.2 wird für jedes Merkmal der aus einer Literaturanalyse entstandenen Morphologie (siehe Abschnitt 2.2) argumentativ bewertet, ob es steuerungsrelevant und damit für ein Referenzsystem zu berücksichtigen ist. Des Weiteren werden die Merkmalsausprägungen der steuerungsrelevanten Merkmale, sofern möglich, univariat hinsichtlich deren Häufigkeit analysiert. Die statistische Auswertung basiert auf den im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit erhobenen Daten zum Einsatz von Routenzugsystemen mit 241 validen Teilnehmern (vgl. [Lie-2017a]). Die Daten wurden durch einen Online-Fragebogen erhoben. Diese Methode ermöglicht ein breites und nicht vorab selektiertes Teilnehmerfeld [Dör-2016, S. 386 ff.]. Zusätzlich wurden im Anschluss einzelne Szenarien durch leitfadengestützte Experteninterviews vertieft (vgl. [Hor-2017]). Da die Beantwortung einzelner Fragen in der Online-Erhebung optional war, variieren die Teilnehmerstichproben N je Merkmal. Durch die Verwendung der Studienergebnisse werden die Anforderungen Praxisnähe und Repräsentativität berücksichtigt.

4.2 Auswahl der Systemmerkmale und -ausprägungen

4.2.1 Randbedingungen

Das Organisations- bzw. Fertigungsprinzip beeinflusst das Layout des Transportnetzwerks. Bei einer Fließfertigung sind die Bereitstellorte häufig entlang der Produktionslinie aneinandergereiht, und es bestehen wenig sinnvolle Möglichkeiten, dass die Reihenfolge der Stationen innerhalb einer Route oder Tour von der Reihenfolge der Stationen innerhalb der Fließlinie abweicht. Ist die Fertigung in Gruppen oder Werkstätten organisiert, kann der Fahrweg im Transportnetzwerk häufig flexibler festgelegt werden. Die univariate Analyse der Auftretenshäufigkeiten der Merkmalsausprägungen der Randbedingungen eines Routenzugsystems ist in Tabelle 4-1 dargestellt. 68 % der erfassten Routenzugsysteme versorgen eine Fließfertigung, 20 % eine Gruppenfertigung und 13 % eine Werkstattfertigung. Für die Bildung der Referenzsysteme werden daher sowohl restriktivere Transportlayouts, die die Versorgung einer Fließlinie

abbilden, als auch flexiblere Layouts, die eine als Gruppen bzw. Werkstätten organisierte Fertigung simulieren, berücksichtigt.

Tabelle 4-1: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen der Randbedingungen eines Routenzugsystems

Merkmale	Merkmalsausprägungen				
Organisations-/ Fertigungsprinzip (N = 229)	Fließfertigung 68 %		Gruppenfertigung 20 %		Werkstattfertigung 13 %
Transporteinheiten (N = 241)	Kein Ladungsträger 21 %		GLT 83 %		KLT 86 %
Ermittlung von Transportbedarfen (N = 220)	Bedarfsorientiert 70 %			Verbrauchsorientiert 88 %	
Wahrnehmung des Transportbedarfs (N = 220)	Routenzug- fahrer 50 %	Zusätzlicher Logistik- mitarbeiter 21 %	Produktions- mitarbeiter 51 %	Sensor 18 %	Produktions- programm 70 %
Nachfrage des Transportbedarfs	Elektronisch			Manuell	

Die Transporteinheiten in einem Routenzugsystem beeinflussen sowohl die Handhabungszeiten und die Prozessstruktur als auch die technische Gestaltung der Transportmittel. In 21 % der Systeme werden Einheiten ohne Ladungsträger transportiert. GLT (83 %) und KLT (86 %) werden hingegen in den meisten Routenzugsystemen bereitgestellt, weshalb die weiteren Untersuchungen auch auf diese beiden Merkmalsausprägungen eingeschränkt werden.

Durch die Nachschubsteuerung wird festgelegt, wie viel Zeit zwischen Entstehung und Nachfrage des Transportbedarfs vergeht. Im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit wurde bereits gezeigt, dass Zeitverzögerungen in der Nachschubsteuerung zu einem erhöhten Umlaufbestand in der Produktionsversorgung führen (vgl. [Lie-2018a]). In 70 % der erfassten Routenzugsysteme werden die Transportbedarfe bedarfsorientiert ermittelt, in 88 % nach einer verbrauchsorientierten Logik. Dies bedeutet, dass häufig auch hybride Nachschubsteuerungen verwendet werden. Die in dieser Arbeit zu konzipierenden dynamischen Routenzugsystemsteuerungsstrategien sollen explizit für kurzfristig bekannte Transportbedarfe entwickelt werden. Da bei einer bedarfsorientierten Nachschubsteuerung die Transportbedarfe mittel- bis langfristig aus dem Produktionsprogramm deterministisch abgeleitet werden können, sofern die

Produktionssequenz stabil ist, beschränken sich die in dieser Arbeit untersuchten Systeme auf die häufig verwendete verbrauchsorientierte Ermittlung von Transportbedarfen nach dem Kanban-Prinzip. Diese Pull-Systeme führend bei nicht deterministischen Transportbedarfen zu geringeren Umlaufbeständen als Push-Systeme [Gui-2012; Cab-2019].

Durch die Auswahl entfällt auch die Wahrnehmung des Transportbedarfs auf Basis des Produktionsprogramms. In jeweils ungefähr der Hälfte der Routenzugsysteme wird der Transportbedarf durch den Routenzugfahrer oder durch einen Produktionsmitarbeiter wahrgenommen. Zu 21 % ist ein zusätzlicher Logistikmitarbeiter, z. B. ein Line-Runner, für die Wahrnehmung zuständig. Die Nachfrage des Transportbedarfs erfolgt dann entweder manuell durch die Mitnahme einer Karte bzw. eines Ladungsträgers oder elektronisch, z. B. durch einen Scan. Eine integrierte automatische Wahrnehmung des Transportbedarfs durch einen Sensor mit elektronischer Nachfrage ist nur in 18 % der erfassten Routenzugsysteme umgesetzt. Für die Referenzsysteme zur Untersuchung einer dynamischen Routenzugsystemsteuerung entfällt allerdings die Auslösung des Transportbedarfs durch den Routenzugfahrer, da nicht garantiert ist, dass der Fahrer jeden Bereitstellort rechtzeitig passiert. Ebenso entstehen durch die Abrufe durch andere Mitarbeiter Zeitverzögerungen im Abrufprozess, weshalb ein erhöhter Umlaufbestand zum robusten Systembetrieb notwendig ist [Urr-2018b]. Elektronische Abrufe, z. B. per E-Kanban, führen zu geringeren Beständen im Routenzugsystem [Aln-2016]. Des Weiteren zeigt sich beim Abruf durch Mitarbeiter, dass die Unregelmäßigkeit der Abrufe im Vergleich zu automatischen Abrufen zunimmt, indem z. B. vor Pausen besonders viele Transportbedarfe nachgefragt werden [Lie-2018a]. Gerade um auf kurzfristig auftretende Transportbedarfe zu reagieren, sollte die Nachschubsteuerung durch automatische Abrufe ohne Zeitverzögerung ausgelöst werden. In jedem Fall ist ein prozesskonformes Verhalten der Systementitäten mit geschultem Personal erforderlich. Für die in dieser Arbeit untersuchten Systeme werden im Sinne einer integrierten Informationsvernetzung der Logistik 4.0 (vgl. [Lap-2014; Lie-2017b, S. 453 f.]) automatische Abrufe ohne Zeitverzögerung zugrunde gelegt.

4.2.2 Organisatorische Gestaltung

Um die Anzahl an Haltestellen im Transportnetzwerk und damit die Zeiten für das Anfahren und Abbremsen sowie Auf- und Absteigen vom Transportmittel zu reduzieren, werden häufig mehrere Bereitstellorte von einem Haltepunkt aus versorgt. Möglich ist aber auch, dass ein Bereitstellort mehrere Haltestellen hat, wenn der Bereitstellort dementsprechend groß gestaltet ist (z. B. bei einer Werkstattfertigung). Auf die Steuerungsstrategie hat die Beziehung zwischen Bereitstellorten und Haltepunkten jedoch kaum einen Einfluss. Vereinfachend wird im Weiteren daher angenommen, dass einem Bereitstellort eineindeutig ein Haltepunkt zugeordnet ist (siehe Tabelle 4-2).

Werden Ladungsträger im Routenzugsystem als Transporteinheiten verwendet, entsteht nach dem Materialverbrauch zumeist Leergut. Bei 92 % der analysierten Routenzugsysteme ist die Leergutabwicklung in das Routenzugsystem integriert. Beim Bereitstellen von Vollgut-Transporteinheiten wird das Leergut dann im Austausch mitgenommen. Daneben besteht die Möglichkeit, dass die Leergutabwicklung nicht in das Routenzugsystem integriert ist (8 %) und durch einen Sonderprozess abtransportiert wird. Im Folgenden wird die Leergutabwicklung als in den Routenzugprozess integriert betrachtet und muss bei den Handhabungsprozessen an Materialflussquelle und -senken berücksichtigt werden. Dazu wird angenommen, dass das Leergut zu einer Leergutsammelstelle an der Vollgut-Materialflussquelle zurückgeführt wird. Es werden nicht dieselben Ladungsträger für aufeinanderfolgende Touren verwendet, wie es z. B. bei Sonderladungsträgerprozessen häufig der Fall ist. Das Routenzugsystem ist flexibler, wenn auf jeder Tour andere Ladungsträger verwendet werden. Dadurch ist es möglich, mehrstufige Prozesse, wie z. B. eine Kommissionierung von Transporteinheiten, von der Routenzugtour entkoppelt durchzuführen und somit die Zykluszeit zu senken.

Tabelle 4-2: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen der organisatorischen Gestaltung eines Routenzugsystems

Merkmale	Merkmalsausprägungen			
Bereitstellort-Haltepunkt Beziehung	1:1	1:n	m:1	m:n
Leergutabwicklung (N = 241)	Integriert 92 %		Nicht integriert 8 %	
Art der Leergutrückführung	Zur Leergutsammelstelle		Zur Wiederbefüllung mit Material	
Anzahl Ladungsträgergrößen je Tour	Kein Ladungsträger	Eine Ladungsträgergröße	Mehrere Ladungsträgergrößen	
Beladungsreihenfolge der Tour	Beliebig		Sequenziert	

Eine weiteres organisatorisches Gestaltungsmerkmal ist die Anzahl der Ladungsträgergrößen je Tour eines Transportmittels, d. h. im vorliegenden Fall die Entscheidung, ob GLT und KLT zusammen auf einer Tour transportiert werden. Durch die gemischten Touren erhöht sich die Flexibilität des Routenzugsystems. Gleichzeitig steigt damit aber auch die Komplexität der Steuerungsaufgabe. Zudem bedingen unterschiedliche Ladungsträgergrößen verschiedene technische Konzepte für die Transportmittel sowie für die Infrastruktur an Materialflussquelle und -senken. Bei zentralen Materialflussquellen werden in der Praxis außerdem häufig entweder GLT oder KLT bereitgestellt, da diese wiederum unterschiedliche Lagerkonzepte erfordern. Vereinfachend werden

in dieser Arbeit daher keine Touren mit gemischten Ladungsträgergrößen angenommen. Deswegen können GLT- und KLT-Systeme im Folgenden getrennt voneinander betrachtet werden.

Zuletzt kann durch eine optimierte Beladungsreihenfolge je nach technischer Gestaltung der Transportmittel die Zykluszeit einer Tour im Routenzugsystem verkürzt werden. Beim Transportwagenprinzip ist es z. B. sinnvoll, den zuerst bereitzustellenden Anhänger ganz hinten am Zug anzukoppeln, um bei der Bereitstellung nur eine Kuppelung lösen zu müssen. Durch die integrierte Rückführung von Leergut-Transporteinheiten betrifft der Effekt allerdings nur den zuerst bereitzustellenden Anhänger. Besonders bei einem KLT-Prozess mit vielen Transporteinheiten auf einer Tour kann es zudem sinnvoll sein, Ladungsträger, die zusammen an einem Haltepunkt bereitgestellt werden, in unmittelbarer Nähe zueinander auf dem Transportmittel anzuordnen, um ein Suchen der Bereitstellereinheiten zu vermeiden. Zudem können bei der KLT-Leergutrückführung meist zwei oder mehr Ladungsträger gleichzeitig gehandhabt werden. In dieser Arbeit wird daher eine sequenzierte Beladungsreihenfolge angenommen, da dadurch eine effizientere Produktionsversorgung ermöglicht wird. Je eher ein Transportauftrag einer Tour bereitgestellt wird, desto näher befindet sich die Transporteinheit am Bug des Transportmittels. Für die Bereitstellung von Transportwagen gilt die umgekehrte Beladungsreihenfolge.

4.2.3 Gestaltung der Handhabungsprozesse

Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, lassen sich die Handhabungsprozesse in vorbereitende, durchführende und nachbereitende Tätigkeiten an Quelle und Senken sowie das Durchführen der Fahrt unterteilen. Der Betrachtungsraum dieser Arbeit wurde in Abschnitt 2.1 auf den Vollgut-Transport von der Quelle zu den Senken und den Leerguttransport von den Senken zur Quelle eingegrenzt. Die Merkmale der Handhabungsprozesse haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Zykluszeit und werden deshalb als steuerungsrelevant erachtet.

Vorbereiten an der Quelle

Deshalb werden an der Materialflussquelle die Vollgut-Transporteinheiten vorbereitet. In jeweils 98 % der analysierten Routenzugsysteme werden die Transporteinheiten an der Quelle ausgelagert und für eine Beladung auf den Routenzug bereitgestellt. Lediglich in 12 % der Einsatzszenarien erfolgt eine Kommissionierung von Material zu Transporteinheiten durch den Routenzugfahrer oder weitere Logistikmitarbeiter (siehe Tabelle 4-3). Die Kommissionierung von Transporteinheiten wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Das Auslagern und das Bereitstellen der Transporteinheiten, z. B. in einem Routenzugbahnhof, nehmen eine gewisse Zeitspanne in

Anspruch, die im Anschluss an die Nachfrage des Transportbedarfs berücksichtigt werden muss, bevor der Transportauftrag auf eine Tour geladen werden kann.

Werden Auslagern und Bereitstellen der Transporteinheiten in die Routenzugtour integriert, indem z. B. der Routenzugfahrer diese Tätigkeiten durchführt, verlängert sich die Zykluszeit einer Tour im Vergleich zu einer entkoppelten Handhabung, bei der eine weitere Ressource die Tätigkeiten parallel zur Routenzugtour durchführt. In den meisten analysierten Routenzugsystemen wurden sowohl das Auslagern (74 %) als auch das Bereitstellen (77 %) von Vollgut-Transporteinheiten an der Materialflussquelle von der Tour entkoppelt und manuell (86 % bzw. 89 %) von weiteren Logistikmitarbeitern erledigt. Um Zeitverzögerungen möglichst gering zu halten, sollte gerade bei dynamischen Routenzugsystemen die Auslagerung und das Bereitstellen der Transporteinheiten entkoppelt von der Routenzugtour beginnen, sobald der Transportbedarf nachgefragt wurde. Für die Referenzsysteme dieser Arbeit wird daher eine manuelle Auslagerung und Bereitstellung der Vollgut-Transporteinheiten an der Materialflussquelle entkoppelt von der Routenzugtour angenommen.

Tabelle 4-3: *Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen vorbereitender Handhabungsprozesse an der Quelle eines Routenzugsystems*

Merkmale	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen 98 % (N = 196)	Auslagern 98 % (N = 197)	Kommissionieren 12 % (N = 197)
Dimension	Integriert 26 % (Auslagern) (N = 194) 23 % (Bereitstellen) (N = 192)	Entkoppelt 74 % (Auslagern) (N = 194) 77 % (Bereitstellen) (N = 192)	
Art	Manuell 86 % (Auslagern) (N = 194) 89 % (Bereitstellen) (N = 192)	Automatisch 14 % (Auslagern) (N = 194) 11 % (Bereitstellen) (N = 192)	

Durchführen an der Quelle

Nach dem Bereitstellen kann das Transportmittel die Vollgut-Transporteinheiten aufnehmen. Ebenso werden die Leergut-Transporteinheiten an der Leergutsammelstelle in der Materialflussquelle abgegeben. Beide Tätigkeiten erfolgen in den beobachteten Routenzugsystemen häufig sowohl in die Tour integriert als auch von dieser entkoppelt. In beiden Fällen werden die Tätigkeiten jedoch manuell (89 % bzw. 96 %) und nicht automatisch durchgeführt (siehe Tabelle 4-4). Für die in dieser Arbeit betrachteten Handhabungsprozesse bedeutet dies, dass entweder der Routenzugfahrer oder ein Logistikmitarbeiter das Transportmittel einzeln mit Transporteinheiten belädt bzw. diese entlädt, oder dass bereits ein fertiger Verbund von allen zu einer Tour

gehörenden Transporteinheiten entkoppelt gebildet wurde, der innerhalb der Tour dann im Verbund angehängt bzw. abgehängt wird. Ein Zugwechsel würde ein weiteres Transportmittel erfordern. Dieses Konzept wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Tabelle 4-4: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen durchführender Handhabungsprozesse an der Quelle eines Routenzugsystems

Merkmale	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Aufnehmen 100 % (N = 200)		Abgeben 98 % (N = 199)
Dimension	Integriert 63 % (Aufnehmen) (N = 199) 71 % (Abgeben) (N = 196)		Entkoppelt 37 % (Aufnehmen) (N = 199) 29 % (Abgeben) (N = 196)
Art	Manuell 89 % (Aufnehmen) (N = 199) 96 % (Abgeben) (N = 196)		Automatisch 11 % (Aufnehmen) (N = 199) 4 % (Abgeben) (N = 196)
Weise	Einzel	Verbund	Zugwechsel

Nachbereiten an der Quelle

Die nachbereitenden Handhabungsprozesse an der Materialflussquelle umfassen nach der Abgabe vom Transportmittel das Bereitstellen, Einlagern und Sortieren von Leergut-Transporteinheiten. Alle drei Tätigkeiten werden sehr häufig in den untersuchten Routenzugsystemen beobachtet (siehe Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen nachbereitender Handhabungsprozesse an der Quelle eines Routenzugsystems

Merkmale	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen 98 % (N = 196)	Einlagern 97 % (N = 194)	Sortieren 97 % (N = 194)
Dimension	Integriert 18 % (Sortieren/ Einlagern) (N = 189)		Entkoppelt 82 % (Sortieren/ Einlagern) (N = 189)
Art	Manuell 96 % (N = 189)		Automatisch 4 % (N = 189)

Nachdem das Leergut vom Routenzugfahrer an der Leergutsammelstelle bereitgestellt wurde, erfolgen die weiteren Tätigkeiten in 82 % der analysierten Routenzugsysteme von der Tour entkoppelt durch eine weitere Ressource. Daher werden das Einlagern und Sortieren von Leergut in den betrachteten Referenzsystemen als von der Tour entkoppelt angenommen. Die Zykluszeit wird von diesen Tätigkeiten folglich nicht

beeinflusst. Insgesamt werden die nachbereitenden Tätigkeiten an der Materialflussquelle zu 96 % manuell durch einen Mitarbeiter und nur selten automatisch durchgeführt.

Vorbereiten an den Senken

Zu den Senken werden Vollgut-Transporteinheiten geliefert, und von den Senken werden Leergut-Transporteinheiten abgeholt. Damit das Leergut rückgeführt werden kann, muss es zunächst am Haltepunkt des Transportmittels bereitgestellt werden. Je nach System können zuvor weitere Tätigkeiten notwendig sein. In den analysierten Routenzugsystemen wird zu 99 % Leergut bereitgestellt (siehe Tabelle 4-6). Weitere Tätigkeiten wurden in der Datenerhebung nicht erfasst. Das Bereitstellen erfolgt in 93 % in die Tour integriert und zu 99 % manuell. In den Referenzprozessen dieser Arbeit wird das Leergut daher durch den Routenzugfahrer selbst vom Klienten zum Haltepunkt gebracht.

Tabelle 4-6: *Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen vorbereitender Handhabungsprozesse an der Senke eines Routenzugsystems*

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen 99 % (N = 197)	Auslagern	Kommissionieren
Dimension	Integriert 93 % (N = 195)		Entkoppelt 7 % (N = 195)
Art	Manuell 99 % (N = 195)		Automatisch 1 % (N = 195)

Durchführen an den Senken

Die bereitgestellten Leergut-Transporteinheiten werden am Haltepunkt vom Transportmittel aufgenommen. Zunächst erfolgt jedoch die Handhabung der Vollgut-Transporteinheiten. Diese werden an der Senke vom Transportmittel abgegeben. Beide Tätigkeiten werden überwiegend (93 % bzw. 90 %) in die Tour integriert durchgeführt und auf manuelle Art (99 % bzw. 98 %) gehandhabt (siehe Tabelle 4-7). Für diese Arbeit bedeutet dies, dass der Routenzugfahrer sowohl Vollgut- als auch Leergut-Transporteinheiten in seine Tour integriert handhabt. Die Ladungsträger werden in den Referenzprozessen aufgrund des Gewichts einzeln bewegt. Lediglich bei der Leergutrückführung von KLT-Ladungsträgern können, sofern für einen Klienten erforderlich, zwei Ladungsträger gleichzeitig gehandhabt werden, da diese nur ein geringes Gewicht aufweisen.

Tabelle 4-7: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen durchführender Handhabungsprozesse an der Senke eines Routenzugsystems

Merkmale	Merkmalsausprägungen	
Tätigkeit	Aufnehmen 99 % (N = 197)	Abgeben 99 % (N = 198)
Dimension	Integriert 93 % (Aufnehmen) (N = 195) 90 % (Abgeben) (N = 196)	Entkoppelt 7 % (Aufnehmen) (N = 195) 10 % (Abgeben) (N = 196)
Art	Manuell 99 % (Aufnehmen) (N = 195) 98 % (Abgeben) (N = 196)	Automatisch 1 % (Aufnehmen) (N = 195) 2 % (Abgeben) (N = 196)
Weise	Einzel	Verbund

Nachbereiten an den Senken

Nachdem die Vollgut-Transporteinheiten vom Transportmittel am Haltepunkt abgegeben wurden, werden diese am Klienten bereitgestellt. Ein weiterführendes Sortieren oder Einlagern tritt in den erfassten Routenzugsystemen nicht auf. Zu 90 % erfolgt das Bereitstellen am Klienten in die Tour integriert. Lediglich in 10 % der Systeme wird diese Tätigkeit von der Tour entkoppelt, z. B. durch einen Line-Runner, durchgeführt. Überwiegend werden die Transporteinheiten dabei manuell gehandhabt. Eine automatische Handhabung erfolgt lediglich in 2 % der Routenzugsysteme (siehe Tabelle 4-8). In den Referenzsystemen dieser Arbeit werden die Vollgut-Transporteinheiten nach der Entladung vom Transportmittel deshalb manuell vom Routenzugfahrer am Klienten bereitgestellt.

Tabelle 4-8: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen nachbereitender Handhabungsprozesse an der Senke eines Routenzugsystems

Merkmale	Merkmalsausprägungen		
Tätigkeit	Bereitstellen 99 % (N = 198)	Sortieren	Einlagern
Dimension	Integriert 90 % (N = 196)	Entkoppelt 10 % (N = 196)	
Art	Manuell 98 % (N = 196)	Automatisch 2 % (N = 196)	

Durchführen der Fahrt

Die Fahrt einer Tour kann manuell durch einen Fahrer oder automatisch durch ein Fahrzeug erfolgen. Während automatische Systeme aufgrund reduzierten Personals geringe Betriebskosten aufweisen, liegt der Vorteil der manuell bedienten Transportmittel darin, dass der Handhaber der Transporteinheiten sich zum einen ständig am Prozess befindet und zum anderen flexibel agieren kann. U. a. aus diesen Gründen werden in 99 % der erfassten Systeme Routenzugfahrer für den Fahrtbetrieb eingesetzt (siehe Tabelle 4-9). Dies gilt ebenso für die Referenzsysteme dieser Arbeit.

Tabelle 4-9: Auswahl der relevanten Durchführungsart der Fahrt einer Tour eines Routenzugsystems

Merkmal	Merkmalsausprägungen	
Art	Manuell 99 % (N = 203)	Automatisch 1 % (N = 203)

4.2.4 Technische Gestaltung

Die technische Gestaltung der Transportmittel wirkt sich sowohl auf die Zykluszeit als auch auf die Tourenkapazität aus und ist somit steuerungsrelevant. Maßgeblich wird diese durch die zu bewegenden Transporteinheiten beeinflusst. Sowohl für den Transport von GLT (92 %) als auch KLT (95 %) werden in den analysierten Routenzugsystemen überwiegend Schlepper mit Anhängern verwendet. Niederhubkommissionierer werden selten und sonstige Transportmittel kaum für das Routenzugprinzip eingesetzt (siehe Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10: Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen der Transportmittel in einem Routenzugsystem

Merkmal	Merkmalsausprägungen		
Art des Transportmittels	Schlepper 92 % (GLT) (N = 193) 95 % (KLT) (N = 203)	Niederhubkommissionierer 15 % (GLT) (N = 193) 13 % (KLT) (N = 203)	Sonstiges Transportmittel (Stapler, FTS, Transportwagen, etc.) 2 % (GLT) (N = 193) 2 % (KLT) (N = 203)
Homogenität des Anhängerverbands	Keine Anhänger	Ein Konzept	Mehrere Konzepte

Da in den Referenzsystemen jeweils nur eine Ladungsträgerart bewegt wird, zieht der Schlepper im Rahmen dieser Arbeit einen homogenen Anhängerverband. Dadurch werden zudem die Fahreigenschaften verbessert. Des Weiteren werden die

betrachteten Schleppzüge durch einen stehenden Fahrer bedient. Das Betätigen der Feststellbremse eines Schleppfahrzeugs beim Stillstand des Zugs erfolgt automatisch.

Das verwendete Anhängerkonzept ist wiederum von den Transporteinheiten abhängig und beeinflusst zudem den Handhabungsprozess. Während KLT in den beobachteten Einsatzszenarien bei Schleppzügen zu 100 % mit Transportwagen befördert werden, sind für den GLT-Transport zu 62 % Ein-/ Aufschubkonzepte, zu 29 % Transportwagen und zu 10 % Rollenverschiebesysteme im Einsatz (siehe Tabelle 4-11). Die Rollenverschiebesysteme werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Tabelle 4-11: Auswahl der relevanten Anhängerkonzepte in Routenzugsystemen

Merkmal	Merkmalsausprägungen		
Anhängerkonzept	Transportwagen 29 % (GLT) (N = 177) 100 % (KLT) (N = 193)	Ein-/ Aufschubkonzept 62 % (GLT) (N = 177)	Rollenverschiebesystem 10 % (GLT) (N = 177)

Weitere technische Gestaltungsmerkmale werden in dieser Arbeit nicht variiert. Dennoch werden deren Eigenschaften im Rahmen der Modellierung berücksichtigt. Für die Referenzsysteme wurden folgende Annahmen getroffen:

Transportwagen können von beiden Seiten des Routenzugs beladen und entladen bzw. an- und abgekoppelt werden. Bei Ein-/ Aufschubkonzepten kann die Belade- und Entladeseite von der konkreten technischen Ausführung abhängig sein. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird angenommen, dass die Ein-/ Aufschubrahmen in Fahrtrichtung rechts be- und entladen werden. Ebenso werden die Beladestationen und Klienten in Fahrtrichtung rechts angenommen. Um Geräuschemissionen und Materialabnutzung zu reduzieren, werden bei den Rahmen Hubfunktionen verwendet. Dadurch laufen die Rollen des Rolluntersetzers während der Routenzufahrt nicht mit. Die Auslösung dieser Hubfunktion erfolgt im weiteren Verlauf dieser Arbeit stets durch einen einmaligen Knopfdruck am Routenzugschlepper.

Zur Handhabung der Transporteinheiten an Quelle oder Senke werden zudem keine weiteren Hilfsmittel verwendet. Die Bewegungen erfolgen alle manuell durch Tragen von KLT oder Schieben von GLT.

Günthner und Keuntje (vgl. [Gün-2016]) bewerten zudem den Einfluss unterschiedlicher Kupplungskonzepte auf die Zykluszeit. Der Zeitbedarf zum manuellen Lösen einer Kupplung entspricht in dieser Arbeit stets dem Zeitbedarf zum Lösen einer Bolzenkupplung.

Des Weiteren wurden von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) der Einfluss von Rollenordnungen untersucht. Zu 85 % werden bei Transportwagen zwei Lenk- und zwei Bockrollen genutzt. Bei den Rolluntersetzern werden überwiegend vier Lenkrollen (62 %) verwendet. Diese Rollenordnungen werden ebenso für die Referenzsysteme dieser Arbeit verwendet. Das Rollenmaterial ist Polyamid, da damit die schnellsten mittleren Handhabungszeiten erreicht werden können [Gün-2016, S. 123].

4.3 Auswahl der Routenzugreferenzsysteme

Im vorherigen Abschnitt wurden für die vier Gestaltungsdimensionen Randbedingungen, organisatorische und technische Gestaltung sowie Handhabungsprozesse steuerungsrelevante Merkmalsausprägungen für die Routenzugreferenzsysteme identifiziert. Wurde für ein Merkmal nur eine Ausprägung ausgewählt, tritt diese in allen Routenzugreferenzsystemen auf. Für andere Merkmale werden mehrere Ausprägungen berücksichtigt. Da die Gestaltungsdimensionen in Wechselwirkung zueinanderstehen, sind nicht alle Varianten beliebig miteinander kombinierbar. Im Folgenden werden daher zunächst die gemeinsamen Merkmalsausprägungen der Referenzsysteme zusammengefasst und anschließend die variablen Merkmalsausprägungen hinsichtlich ihrer Korrelation in realen Routenzugsystemen (vgl. [Lie-2017a]) analysiert sowie zu Gesamtsystemen zusammengeführt.

Gemeinsame Merkmalsausprägungen

Die Transportaufträge werden in den Routenzugreferenzsystemen dieser Arbeit verbrauchsorientiert durch ein Kanban-Konzept ausgelöst. Der Abruf erfolgt dabei elektronisch durch einen Sensor und somit ohne Zeitverzögerung zur Entstehung des Nachschubbedarfs.

In einem Routenzugreferenzsystem wird nur eine Ladungsträgerart und -größe transportiert. Das Leergut, das an den Klienten im Routenzugsystem entsteht, wird im Austausch gegen die Bereitstellung von Vollgut auf dem Routenzug mitgenommen und an der Leergutsammelstelle in der Materialflussquelle abgegeben.

Während die Handhabung an der Materialflussquelle in den Referenzsystemen unterschiedlich ist, folgen die Fahrt zu den Senken und die Tätigkeiten an den Senken systemübergreifend dem gleichen Prozess. Sowohl die Bedienung des Fahrzeugs als auch die Handhabung der Transporteinheiten werden durch einen Routenzugfahrer durchgeführt. Nach dem Stopp an einem Haltepunkt entlädt der Fahrer einzeln die erforderlichen Vollgut-Transporteinheiten vom Routenzug und stellt diese umgehend

am Klienten bereit. Dort nimmt er im Austausch eine Leergut-Transporteinheit mit und lädt diese am Haltepunkt auf den Routenzug.

Der Routenzug selbst besteht aus einem Schlepper und einem Anhängerverband mit einheitlichem technischem Konzept.

Variierende Merkmalsausprägungen

Die Varianten der in dieser Arbeit betrachteten Routenzugreferenzsysteme entstehen zum einen durch unterschiedliche Organisationsprinzipien der Fertigungen, die mit dem Routenzugsystem versorgt werden. Um diese zu berücksichtigen, werden in dieser Arbeit drei verschiedene Transportlayouts verwendet. Erstens wird ein einfacher *Rundkurs* als Transportnetzwerk zugrunde gelegt, bei dem keine alternativen Wege gefahren werden können. Derartige Layouts werden häufig in der Routenzugliteratur verwendet. Zweitens wird die Versorgung mehrerer paralleler Montagelinien durch das Layout *Montage* untersucht. Drittens bildet das Layout *Werkstatt* ein flexibleres Transportnetzwerk ab.

Zum anderen entstehen Systemvarianten durch verschiedene Ladungsträger, die im Routenzugsystem bereitgestellt werden. Durch die Unterscheidung von GLT und KLT werden sowohl Transportkapazitäten als auch technische und prozessuale Gestaltung der Referenzsysteme beeinflusst. Ein Referenzsystem ist jedoch stets ladungsträgerhomogen.

Des Weiteren unterscheiden sich die Referenzsysteme in den Handhabungsprozessen, die an der Materialflussquelle durchgeführt werden. Während der Vorbereitung der Vollgut-Transporteinheiten werden diese noch einheitlich von einem Logistikmitarbeiter entkoppelt von der Tour im Routenzugbahnhof bereitgestellt. Je nach Prozess werden die Transporteinheiten einerseits ebenfalls von einem weiteren Logistikmitarbeiter entkoppelt von der Tour zu einem Anhängerverband zusammengeführt, der beim Tourenstart vom Routenzugfahrer an den Routenzugschlepper angekoppelt wird. Andererseits belädt der Routenzugfahrer selbst den Routenzug einzeln mit den Vollgut-Transporteinheiten innerhalb der Zykluszeit einer Tour. Am Ende einer Tour werden die Leergut-Transporteinheiten ebenfalls entweder einzeln vom Routenzugfahrer entladen oder im Verbund abgekoppelt. Bei der Einzelentladung stellt der Routenzugfahrer das Leergut in einem Puffer in der Leergutsammelstelle bereit. Bei Abkoppeln im Verbund wird diese Tätigkeit von der Tour entkoppelt durch einen weiteren Logistikmitarbeiter durchgeführt. Nachbereitende Tätigkeiten, wie z. B. das Sortieren der Leergutbehälter, erfolgen in allen Referenzsystemen durch einen weiteren Logistikmitarbeiter von der Tour entkoppelt.

Schließlich variiert in Abhängigkeit der Ladungsträger und der Handhabungsprozesse die technische Gestaltung der Anhängerkonzepte. Während für KLT stets Transportwagen verwendet werden, können GLT auf einem Rolluntersetzer mittels Ein-/ Aufschubkonzept oder auf Transportwagen, die an- und abgekoppelt werden, transportiert werden.

Um Restriktionen bei der Kombination von Ladungsträgern, Prozess sowie technischem Anhängerkonzept zu berücksichtigen und repräsentative Kombinationen auszuwählen, werden die durch *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit erhobenen Daten hinsichtlich dieser drei Faktoren integriert ausgewertet. Die absoluten Häufigkeiten der in den beobachteten Routenzugsystemen in Kombination auftretenden Merkmalsausprägungen sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

Insgesamt entstehen zwölf mögliche Kombinationen aus Ladungsträgerart, Anhänger-technik und Prozess. Für jede Kombination aus Ladungsträger und Anhängerkonzept werden die beiden häufigsten Prozessvarianten für die Referenzsysteme ausgewählt.

Für GLT-Transporte werden insgesamt häufiger Anhänger mit Ein-/ Aufschubkonzept verwendet als Transportwagen. Des Weiteren werden für beide Technikvarianten jeweils am häufigsten eine in die Tour integrierte Vollgut-Aufnahme sowie Leergut-Abgabe durch den Routenzugfahrer (RZ) durchgeführt. Mit Abstand folgt beim GLT-Transportwagenkonzept die jeweilige entkoppelte Handhabung durch einen weiteren Logistikmitarbeiter (LM), indem ein Anhängerverband vorbeladen bzw. im Ganzen abgekoppelt wird. Da die Transportrahmen beim Ein-/ Aufschubkonzept permanent mit dem Schlepper verbunden sind, wird bei diesem technischen Konzept kein Anhängerverbund, sondern jede Transporteinheit einzeln gehandhabt. Der zweit häufigste Prozess ist dabei die in die Tour integrierte Be- und Entladung der Transporteinheiten durch einen weiteren Logistikmitarbeiter mit einem Stapler. Die in den Untersuchungen am häufigsten auftretende Kombination aus Ladungsträger, Technik und Prozess ist die in die Tour integrierte Be- und Entladung von einzelnen KLT auf einen Transportwagen. Als zweithäufigste KLT-Variante wurde die von der Tour entkoppelte Handhabung der Transporteinheiten in einem Anhängerverband beobachtet.

Ladungsträgerart	Anhängerkonzept	Prozesse an der Quelle			Absolute Häufigkeit	
		Vollgut-Aufnahme	Leergut-Abgabe	Prozessbeschreibung		
GLT	Ein-/ Aufschubkonzept	Integriert (LM)	Integriert (LM)	Einzelbeladung/-entladung	13	87
		Entkoppelt (LM)	Integriert (RZF)	Anhängerverbund anhängen/ Einzelne Anhänger abhängen	6	
		Integriert (RZF)	Entkoppelt (LM)	Einzelbeladung/ Anhängerverbund abhängen	5	
		Integriert (RZF)	Integriert (RZF)	Einzelbeladung/-entladung mit Stapler	63	
	Transportwagen	Integriert (RZF)	Integriert (RZF)	Einzelbeladung/-entladung	22	38
		Entkoppelt (LM)	Integriert (RZF)	Anhängerverbund anhängen/ Einzelne Anhänger abhängen	3	
		Integriert (RZF)	Entkoppelt (LM)	Einzelbeladung/ Anhängerverbund abhängen	4	
Entkoppelt (LM)		Entkoppelt (LM)	Anhängerverbund anhängen/ Anhängerverbund abhängen	9		
KLT	Transportwagen	Integriert (RZF)	Integriert (RZF)	Einzelbeladung/-entladung	96	149
		Entkoppelt (LM)	Integriert (RZF)	Anhängerverbund anhängen/ Einzelne Anhänger abhängen	14	
		Integriert (RZF)	Entkoppelt (LM)	Einzelbeladung/ Anhängerverbund abhängen	9	
		Entkoppelt (LM)	Entkoppelt (LM)	Anhängerverbund anhängen/ Anhängerverbund abhängen	30	

Abbildung 4-1: Auswertung der Merkmalsausprägungskombinationen von Ladungsträgerart, Anhängerkonzept und Handhabungsprozess

In Kombination mit den drei Layoutvarianten, die mit jedem dieser Konzepte kombiniert werden können, ergeben sich für die Untersuchungen der dynamischen Steuerungsstrategien in dieser Arbeit 18 Routenzugreferenzsysteme (siehe Abbildung 4-2). Darunter befinden sich zwölf GLT- und sechs KLT-Systeme.

Die Steuerungsrelevanz der verwendeten Merkmale wurde in Abschnitt 4.2 logisch begründet. Des Weiteren wurden die Praxisnähe und Repräsentativität der Routenzugreferenzsysteme durch die methodische Auswertung einer umfangreichen Datenerhebung mit 241 validen Teilnehmern aus der Industrie (vgl. [Lie-2017a]) sichergestellt. Die erste Forschungsunterfrage, welche steuerungsrelevanten Merkmale und Merkmalsausprägungen für Routenzugsysteme repräsentativ sind, wird damit als beantwortet erachtet.

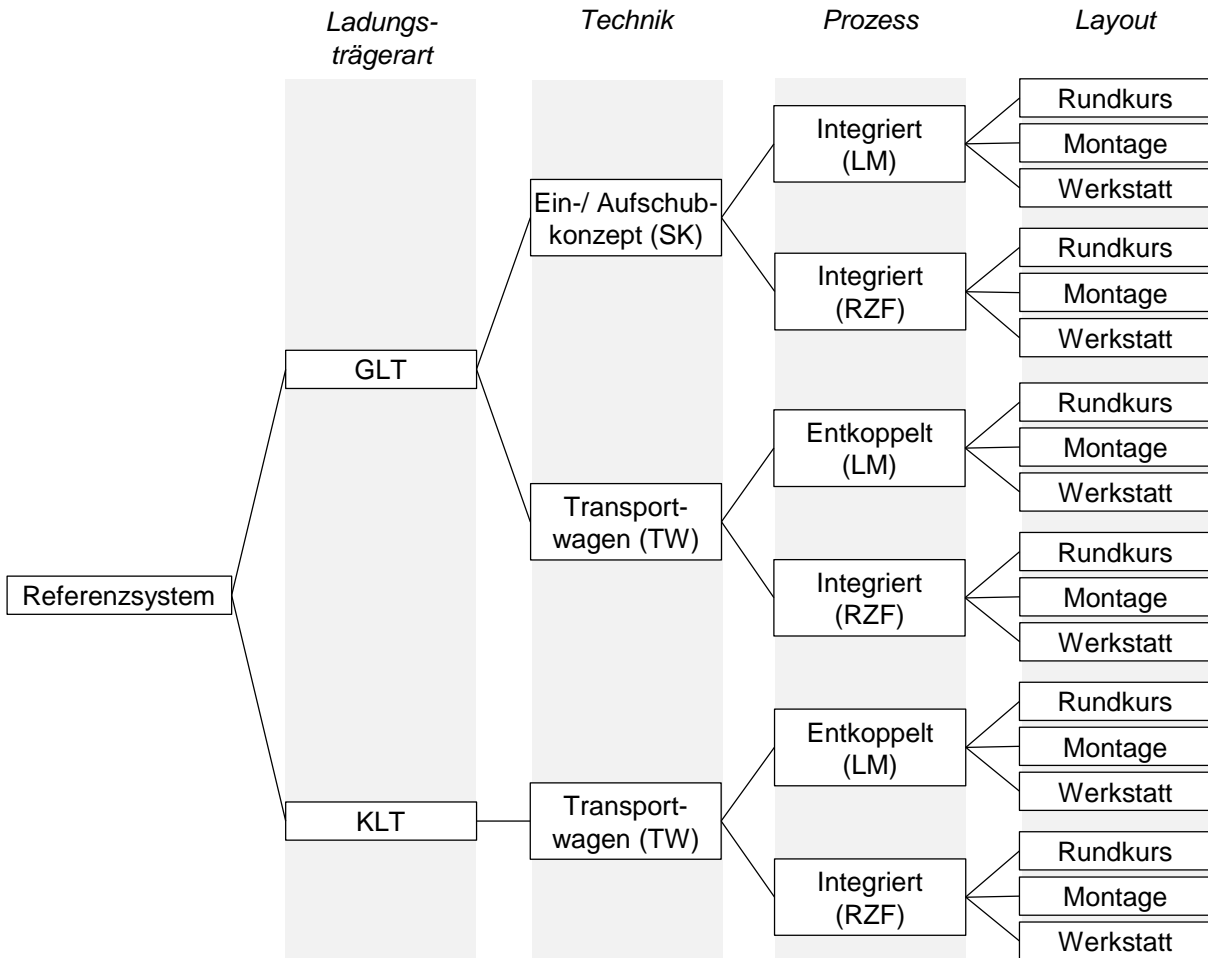


Abbildung 4-2: Übersicht der repräsentativen Routenzugreferenzsysteme

5 Formalisierung von Routenzugsystemen

In diesem Kapitel wird die formale Beschreibung der Routenzugsysteme behandelt. Diese ist sowohl Grundlage für die algorithmische Umsetzung der Steuerungsstrategien als auch für deren simulative Evaluation im Hinblick auf die identifizierten repräsentativen Routenzugreferenzsysteme. Zunächst werden in Abschnitt 5.1 Anforderungen an die Formalisierung aufgestellt. Anschließend erfolgt die Modellierung der Systemelemente als Grundlage für die Simulation (Abschnitt 5.2) Dazu wird in Abschnitt 5.2.1 die Modellierung des Transportnetzwerks als verbindendes Element des Materialflusses im Routenzugsystem vorgestellt. Anschließend werden die Entstehung von Transportbedarfen als ein Initiator der Tourenbildung (Abschnitt 5.2.2) sowie die Modellierung der Transportressourcen (Abschnitt 5.2.3) erläutert. Im Anschluss werden die Zykluszeitanteile im Routenzugsystem formal beschrieben (Abschnitt 5.2.4).

5.1 Anforderungen an die Formalisierung

Um die Auswirkungen der in dieser Arbeit zu entwickelnden Steuerungsstrategien auf die robuste und effiziente Produktionsversorgung der Routenzugreferenzsysteme zu untersuchen, muss die formale Beschreibung der Systeme verschiedene Anforderungen erfüllen. Die Definition der folgenden fünf Anforderungen an die Formalisierung der Routenzugsysteme erfolgt in Anlehnung an *Klenk* (vgl. [Kle-2017, S. 61 ff.]).

Anforderung 1: Abbildung der verschiedenen Ausprägungen der Routenzugreferenzsysteme

Damit das Verhalten der identifizierten Routenzugreferenzsysteme (siehe Abschnitt 4.3) untersucht werden kann, müssen alle Merkmalsausprägungen der Gestaltungsbereiche Randbedingungen, Organisation, Handhabungsprozesse sowie Technik der Referenzsysteme durch die Modellierung abbildbar sein.

Anforderung 2: Darstellung der Grundlage für Optimierungsalgorithmen der Steuerungsstrategien

Ebenfalls muss die Modellierung die Routenzugsysteme in einer Form beschreiben, auf deren Basis die Algorithmik der Steuerungsstrategien ausgeführt werden kann. Grundlage für die in Abschnitt 3.2 erläuterten mathematischen Problemstellungen der Routenzugsystemsteuerung sind mathematische Graphen mit Knoten, Kanten und Kantengewichten (vgl. [Gyu-2013a]).

Anforderung 3: Berücksichtigung konkreter, stochastischer Transportbedarfe

In der routenzugspezifischen Literatur werden häufig durchschnittliche bzw. deterministische Plan-Transportbedarfe zur Planung und Steuerung von Routenzugsystemen verwendet (siehe Abschnitt 3.4). Im realen Betrieb entstehen durch zufällige Transportbedarfsschwankungen jedoch kurzfristige Bedarfsspitzen, die eine Auswirkung auf die Tourenbildung haben können. Um die Eignung der zu entwickelnden Steuerungsstrategien unter kurzfristigen Transportbedarfsschwankungen zu analysieren, müssen konkrete Transportaufträge räumlich und zeitlich verteilt auf Basis stochastischer Verteilungen in den Routenzugsystemen berücksichtigt werden.

Anforderung 4: Abbildung des Zeitverhaltens der Routenzugsysteme

Neben dem Auftreten der Transportaufträge im Zeitverlauf sind weitere zeitliche Aspekte eines Routenzugsystems abzubilden. Dazu gehören die Zykluszeitanteile einer Tour in Abhängigkeit der Systemausprägungen sowie die eingeschränkte Verfügbarkeit der Transportressourcen während der Tour.

Anforderung 5: Abbildung des Verkehrsverhaltens der Routenzugsysteme

Hauptbestandteil eines Routenzugsystems ist das Transportnetzwerk, in dem sich die Routenzüge bewegen. Zum einen werden dadurch die individuellen Fahrwege eines Zugs beeinflusst. Zum anderen entstehen, falls mehrere Züge unterwegs sind, Abhängigkeiten zwischen den Transportressourcen. Daher müssen Vorfahrtsregeln, Staus, Überholvorgänge und Hindernisse, die durch andere Routenzüge und deren Aktivitäten entstehen, abbildbar sein.

Die Berücksichtigung dieser Anforderungen erfordert die Untersuchung des Systemverhaltens durch Simulation (vgl. [Kan-2020]). Diese ist das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“ [VDI-3633b, S. 3]. Im Folgenden wird die der Simulation zugrundeliegende Modellierung der Elemente eines Routenzugsystems erläutert.

5.2 Modellierung der Systemelemente

5.2.1 Transportnetzwerk

Durch das Transportnetzwerk werden die Materialflussknoten des Routenzugsystems miteinander verbunden. Die Klienten repräsentieren die Materialflusssenken, die über Haltepunkte an das Transportnetzwerk angebunden sind. Auf Basis der Netzwerkstruktur können die Fahrwege von der Materialflussquelle zu den Senken sowie

zwischen den Senken bestimmt werden. Um einen realen Materialfluss mit gegenseitiger Beeinflussung der Transportmittel zu simulieren, wird das Transportnetzwerk analog zu *Gyulai et al.* (vgl. [Gyu-2013a]) in Fahrwege und Kreuzungen unterteilt. Die Haltepunkte der Klienten befinden sich auf Fahrwegen. Prinzipiell können die Fahrwege ein- oder mehrspurig sein. Um die Flexibilität der Wegfindung nicht vorab einzuschränken, werden im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit mit Ausnahme des Layouts *Rundkurs* zweispurige Fahrwege mit Rechtsverkehr verwendet. Daraus folgt gleichzeitig, dass die Haltepunkte der Klienten von zwei Richtungen aus erreicht werden können (siehe Abbildung 5-1).

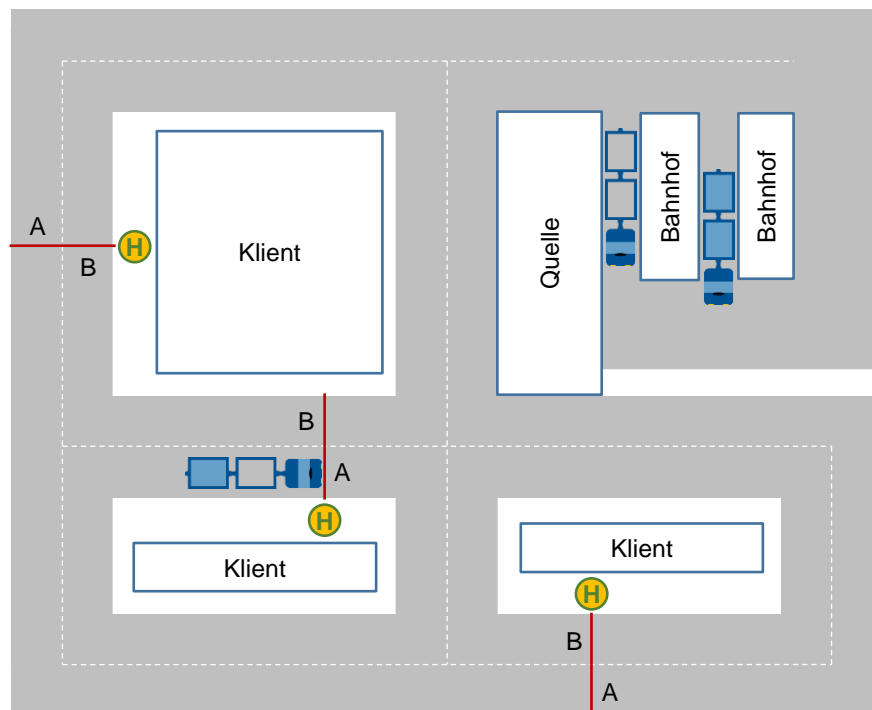


Abbildung 5-1: Basiselemente eines Transportnetzwerks im Routenzugsystem

Durch die zweispurigen Fahrwege sind zudem die Wegbreiten ausreichend, damit Routenzüge, die an einem Haltepunkt stehen, von anderen Routenzügen überholt werden können, sofern kein Gegenverkehr herrscht und der Überholvorgang vor einer Kreuzung abgeschlossen werden kann. Die Modellierung der Überholvorgänge wird in Anlehnung an *Staab et al.* (vgl. [Sta-2015]) durchgeführt und hier nicht weiter beschrieben. Die Wegbreite reicht allerdings nicht aus, damit ein Routenzug auf dem Fahrweg wenden kann (vgl. [Gyu-2013a]).

Um den Verkehrsfluss im Transportnetzwerk aufrecht zu erhalten, werden zudem Vorfahrtsregeln an Kreuzungen in der Modellierung berücksichtigt (vgl. [Sta-2016]). Dies bedeutet zum einen, dass Routenzüge nur in einen Kreuzungsbereich einfahren dürfen, wenn zum Eintrittszeitpunkt ein vollständiges Verlassen des Kreuzungsbereichs

ohne Blockaden sichergestellt ist. Dadurch wird eine vollständige Blockade der Kreuzung vermieden. Zum anderen wird eine Rechts-vor-Links-Vorfahrtsregel eingesetzt, bei der von rechts kommende Fahrzeuge zuerst in die Kreuzung einfahren dürfen. Analog dem Verkehrsfluss im Straßenbetrieb können mehrere Fahrzeuge gleichzeitig einen Kreuzungsbereich befahren, solange sich ihre Fahrwege nicht überschneiden (vgl. [Sta-2015]). Möchten zwei Routenzüge hintereinander eine Kreuzung in die gleiche Richtung durchfahren, muss der hintere Routenzug vor dem Eintritt in den Kreuzungsbereich warten, bis der voranfahrende Zug die Kreuzung vollständig verlassen hat.

Zur Lösung der in Abschnitt 3.2 erläuterten mathematischen Problemstellungen ist eine Modellierung des Transportnetzwerks als gerichteter Graph mit Knoten, Kanten und Kantengewichten erforderlich (vgl. [Gyu-2013a]) (Anforderung 2). Je nach Problemstellung sind jedoch unterschiedliche Informationen notwendig. Um die Komplexität der Modellierung zu reduzieren und gleichzeitig redundante Berechnungen bei der Lösung der Probleme zu vermeiden, wird das Transportnetzwerk in zwei Ebenen modelliert. Die Tiefebene ist die formale Beschreibung der Netzwerkstruktur und deren Elemente im Detail. Die Hochebene fasst Informationen zu einem abstrakteren Modell zusammen (siehe Abbildung 5-2).

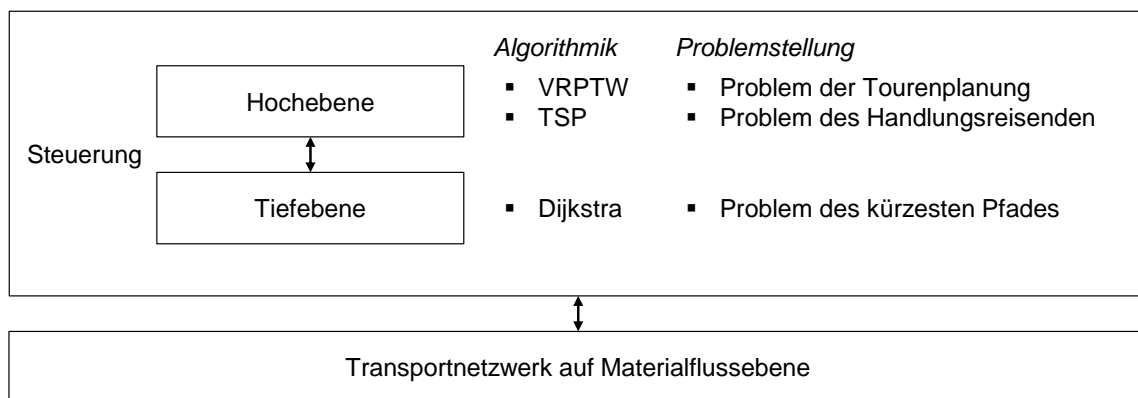


Abbildung 5-2: Schematische Unterteilung des Transportnetzwerks in Hoch- und Tiefebene

Tiefebene

Die Tiefebene des Transportnetzwerks modelliert die Beziehungen zwischen den kleinsten Einheiten der Netzwerkobjekte. Wie in Abbildung 5-3 dargestellt, sind folgende Elemente Knoten der Tiefebene:

- Materialflussquelle,
- Haltepunkt auf Spur A eines Fahrwegs,
- Haltepunkt auf Spur B eines Fahrwegs,
- Ende der Spur eines Fahrwegs und

- Ende eines Kreuzungselements.

Jeder Knoten der Tiefebene hat mindestens einen Vorgänger- und einen Nachfolgerknoten. Die Knoten sind in der Modellierung durch Kanten verbunden. Die Kosten $c_{(i,j)}$, um von einem Knoten i zu einem anderen Knoten j zu gelangen, stellen die Kantengewichte dar. Diese repräsentieren die geschätzte Fahrtzeit zwischen den Knoten. Je nach Schätzfunktion (siehe Abschnitt 6.2.6) basieren die Kosten auf der Distanz der Knoten, der Geschwindigkeit der Transportmittel, vorhandenen Hindernissen oder historischen sowie zukünftigen Verkehrsdaten. Durch die Modellierungsstruktur unter der Berücksichtigung praxisrelevanter Restriktionen entsteht als Beziehung zwischen den Knoten eine asymmetrische Kostenmatrix (vgl. [Gyu-2013a]), d. h. die Kosten, um von Knoten i zu Knoten j zu gelangen, entsprechen im Normalfall nicht den Kosten, um von Knoten j zu Knoten i zu fahren.

Die Tiefebene dient als Basis für die Lösung des *Problems des kürzesten Pfades* mit dem Dijkstra-Algorithmus (siehe Abschnitt 3.2.1). Als Lösung der Problemstellung werden die Kantengewichte der Hochebene bestimmt.

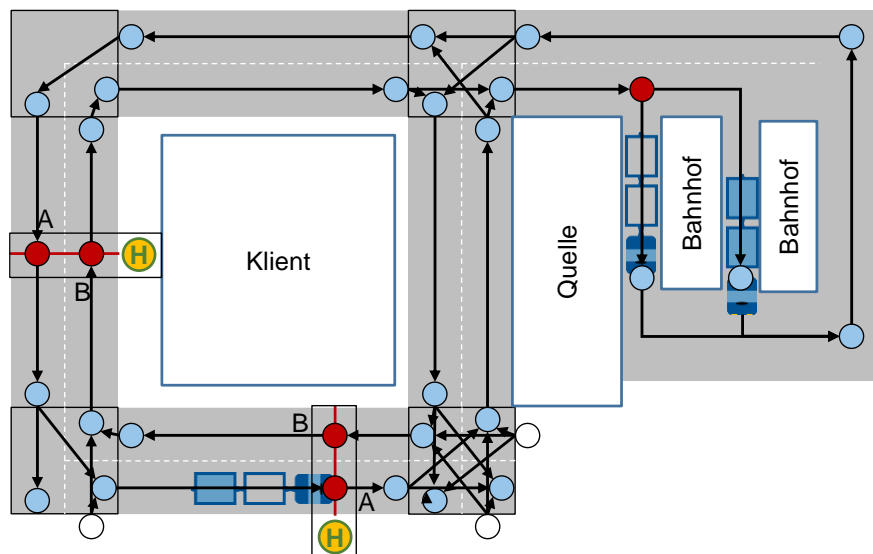


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Tiefebene des Transportnetzwerks

Hochebene

Die Hochebene ist eine abstrakte Modellierung der Materialflussbeziehung der Quellen und Senken des Transportnetzwerks. Die Knoten der Hochebene sind (siehe Abbildung 5-4):

- Materialflussquelle,
- Haltpunkt auf Spur A eines Fahrwegs und

- Haltepunkt auf Spur B eines Fahrwegs.

Jeder Haltepunkt eines Klienten ist über zwei Spuren erreichbar und wird dementsprechend mit zwei Knoten modelliert. Die Kanten stellen die Verbindungen zwischen der Quelle und einer Haltepunktspur bzw. zwischen zwei Haltepunktspuren dar. Dadurch ergeben sich analog Formel (3-10) in Abschnitt 3.2.3 bereits acht Möglichkeiten, um eine Tour mit zwei Haltepunkten bzw. Klienten zu bilden. Mit zunehmender Klientenanzahl steigen die Möglichkeiten überproportional (siehe Abbildung 3-4, S. 50). Im Gegensatz zur Tiefebene ist jeder Knoten in der Hochebene der Vorgänger und Nachfolger jedes anderen Knoten. Die Kostenmatrix ist ebenso asymmetrisch, wobei die Kosten auf den Ergebnissen des Dijkstra-Algorithmus, angewandt auf die Tiefebene, basieren.

Ausgehend von der Hochebene des Transportnetzwerks werden die Lösungsalgorithmen zur *Tourenplanung* (siehe Abschnitt 3.2.2) und Lösung des *Problems des Handlungsreisenden* (siehe Abschnitt 3.2.3) angewandt.

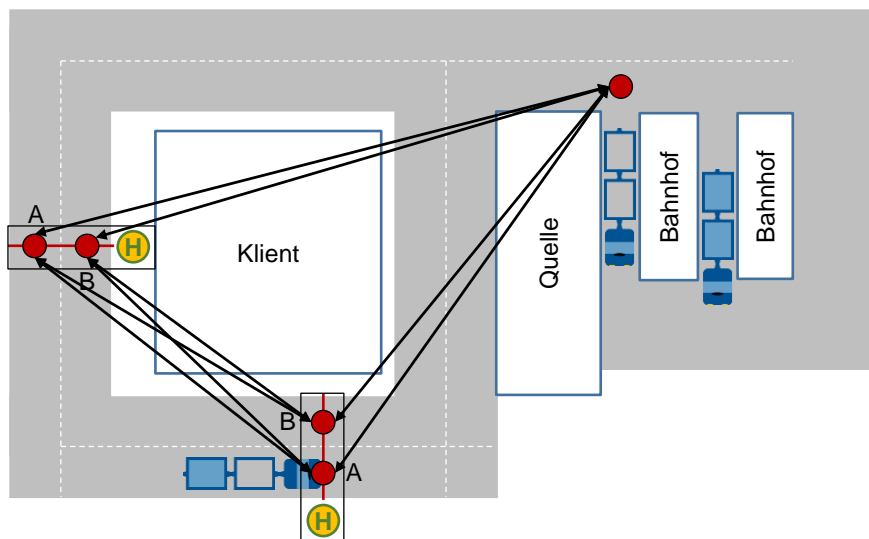


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der Hochebene des Transportnetzwerks

Die Routenzugreferenzsysteme berücksichtigen drei Layouts des Transportnetzwerks mit unterschiedlichem Flexibilisierungsgrad. Zum einen wird ein einfacher *Rundkurs* nach dem Beispiel der *VDI-Richtlinie 5586* (vgl. [VDI-5586b]) untersucht. Die Flexibilität der Wegfindung ist hierbei gering, da Touren entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn fahren. Zum anderen werden zwei komplexere Layouts berücksichtigt. Dazu wird im Layout *Montage* die Versorgung einer Montagelinie mit langen Fahrwegen nachempfunden. Das Layout *Werkstatt* weist die gleichen Ausmaße auf, enthält jedoch mehr Querverbinder zwischen den Fahrspuren. Vereinfachend werden für alle Layouts

nur horizontale und vertikale Fahrspuren, die durch Kreuzungen verbunden sind, modelliert. Die Abmaße und Darstellung der Layouts befinden sich in Anhang B.

Durch die Modellierung der Transportnetzwerke können folglich verschiedene Ausprägungen der Routenzugreferenzsysteme abgebildet werden (Anforderung 1). Des Weiteren dient die Beschreibung als mathematischer Graph als Basis für die Optimierungsalgorithmen der Steuerungsstrategien (Anforderung 2) sowie zur Abbildung des Verkehrsverhaltens der Routenzüge (Anforderung 5).

5.2.2 Transportbedarf

Der Transportbedarf in den betrachteten Routenzugsystemen entsteht durch eine verbrauchsorientierte Nachschubsteuerung nach dem Kanban-Prinzip, bei dem die Bedarfe automatisch durch einen Sensor erfasst und übermittelt werden (siehe Abschnitt 4.3). Die Modellierung dieser Nachschubsteuerung wurde im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit bereits von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2018a]) veröffentlicht und stellt eine Erweiterung der Transportbedarfsmodellierung von *Klenk* (vgl. [Kle-2017]) dar. Im Folgenden werden die für die Untersuchungen dieser Arbeit erforderlichen Zusammenhänge erläutert.

In den Routenzugreferenzsystemen entstehen die Transportbedarfe an den Klienten durch den Verbrauch von Material. Sobald ein Ladungsträger leer ist, wird der Nachschubbedarf vom Sensor erkannt und ohne Zeitverzögerung an die Routenzugsystemsteuerung übertragen. Würden die Transportbedarfe zu deterministischen Zeitpunkten entstehen, könnte ein globales Optimum für die Produktionsversorgung statisch geplant werden. Die tatsächlichen Zeitpunkte für das Auftreten eines Nachschubbedarfs unterliegen allerdings stochastischen Einflüssen, so dass auch kurzfristig Transportaufträge entstehen können. Einflussfaktoren wie Produktvarianten, Produktionsprogramm, Ladungsträgerfüllmengen, Ausschuss sowie Produktionsstillstände führen zu schwankenden Nachschubbedarfen [Lie-2018a].

Analog zu *Klenk* (vgl. [Kle-2017]) werden die Schwankungen der Transportbedarfe durch die Verteilung der Zwischenabrufzeit (ZAZ) je Material i und Klient j modelliert. Die ZAZ_{ij} zwischen zwei Abrufen eines Materials i für den Klienten j definiert sich nach den Formeln (5-1) bis (5-3):

$$ZAZ_{ij,n,n-1} = t_{ij,n} - t_{ij,n-1} \quad (5-1)$$

mit

$$t_{ij,n} \geq t_{ij,n-1} \quad (5-2)$$

$$n > 1 \quad (5-3)$$

wobei $t_{ij,n}$ den Zeitpunkt des n -ten Abrufs des Materials i am Klienten j darstellt.

Nachdem durch die sensorische Wahrnehmung und elektronische Übermittlung des Transportbedarfs keine Zeitverzögerung entsteht, entspricht die Schwankung der Zwischenabrufzeiten in dieser Arbeit den Schwankungen der Zwischennachschubbedarfszeiten. Da Routenzugsysteme besonders häufig für die Versorgung getakteter Variantenproduktionen eingesetzt werden [Lie-2017a, S. 25 f.], werden diese als Grundlage für die Modellierung der Transportbedarfe verwendet. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Verbrauchs einer Materialnummer i an einem Klienten j ergibt sich durch ein Bernoulli-Experiment mit der Wahrscheinlichkeit p_{ij} für einen Verbrauch des Materials i am Klienten j zu einem Produktionstakt. Wird dieses Bernoulli-Experiment unendlich oft wiederholt, entspricht die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Binomialverteilung mit dem Erwartungswert p_{ij} (vgl. [Kle-2017, S. 134 ff.] [Kle-2017]). Diese Wahrscheinlichkeit p_{ij} unterliegt in Variantenproduktionen verschiedenen Einflussfaktoren. Durch die Produktvarianz wird nicht jedes Material i an jedem Klienten j zu jedem Produktionstakt verbaut. Bei einem Verbrauch wird entschieden, welche Materialnummer mit welcher Verbrauchzahl verbaut wird. Dazu wird für den Klienten durch die Modellierung eine diskrete empirische Verteilung erzeugt (vgl. [Lie-2018a]). Die Verbrauchrate $r_{v,ij}$ beschreibt in der Modellierung dieser Arbeit die relative Häufigkeit, dass eine Materialnummer i an einem Klienten j zu einem Produktionstakt in der vorgegebenen Verbrauchzahl $z_{v,ij}$ verbaut wird. Ist das Verbrauchsereignis eines Produktionstakts unabhängig vom Verbrauch eines anderen Produktionstakts, bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit eines Verbrauchs p_{ij} nach Formel (5-4) (vgl. [Kle-2017, S. 134 ff.]):

$$p_{ij} = r_{v,ij} \quad (5-4)$$

Im Allgemeinen gilt, dass die Summe der Verbrauchraten aller Verbrauchsereignisse eines Klienten stets gleich eins ist (vgl. [Lie-2018a]):

$$\sum_i r_{v,ij} = 1; \forall j \quad (5-5)$$

Gelten für Produktvarianten im Produktionsprogramm jedoch Sequenzrestriktionen, ist die Wahrscheinlichkeit abhängig von anderen Verbrauchsereignissen. Eine Blockrestriktion, bei der festgelegt ist, dass eine bestimmte Anzahl b_{ij} einer Produktvariante

im Produktionsprogramm direkt aufeinanderfolgt, ändert die Wahrscheinlichkeit eines unabhängigen Verbaueignisses im Block zu (vgl. [Lie-2018a]):

$$p_{ij} = \frac{1}{1 - b_{ij} + \frac{b_{ij}}{r_{V,ij}}} \quad (5-6)$$

Zu den $b - 1$ folgenden Produktionstakten ist die Verbauwahrscheinlichkeit zudem eins.

Eine Distanzrestriktion verhindert, dass zwei ressourcenintensive Produktvarianten in der Produktionsreihenfolge direkt hintereinander gereiht sind. Eine Restriktion d_{ij} bedeutet, dass der Abstand im Produktionsprogramm mindestens d_{ij} Produktionstakte betragen muss. Für die Verbaurrate $r_{V,ij}$ gilt stets, dass sie nicht größer als der Kehrwert der Distanzrestriktion sein darf. Die unabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit eines Verbaus bestimmt sich dann zu (vgl. [Lie-2018a]):

$$p_{ij} = \frac{1}{1 - d_{ij} + \frac{1}{r_{V,ij}}} \quad (5-7)$$

Für die nachfolgenden Produktionstakte innerhalb der Distanzrestriktion ist die Verbauwahrscheinlichkeit dann null.

Die Reihenfolgerestriktionen führen dazu, dass die tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten der anderen Verbaueignisse eines Klienten beeinflusst werden. Für alle Ereignisse entstehen damit bedingte Wahrscheinlichkeiten. Die Abweichung der unabhängigen Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses von dessen Verbaurrate muss deshalb gewichtet mit den relativen Verbauraten der restlichen Einzelereignisse auf alle anderen Möglichkeiten verteilt werden. Dies geschieht so, dass für die zusätzliche bedingte Wahrscheinlichkeit $\Delta p_{kl,j}$ eines Verbrauchs des Materials k aufgrund des Verbrauchs des Materials l unter der Bedingung $k \neq l$ am Klienten j gilt (vgl. [Lie-2018a]):

$$\Delta p_{kl,j} = (r_{V,lj} - p_{lj}) \frac{r_{V,kj}}{1 - r_{V,lj}} \quad (5-8)$$

In Tabelle 5-1 wird die Bestimmung der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Verbaueignisse zu einem Produktionstakt anhand eines Beispiels verdeutlicht. Nur ein Ereignis kann pro Produktionstakt eintreten. Gleiche Materialien können für unterschiedliche Produktvarianten mit abweichenden Restriktionen verwendet

werden. Beim ersten Ereignis wird das Material M1 verbaut. Hierfür gelten keine Sequenzrestriktionen. Das zweite Ereignis ist der Verbau von Material M2, für das in der zugehörigen Produktvariante eine Blockrestriktion von drei gilt. Beim dritten Ereignis wird wiederum das Material M2 verbaut, für das in der zugeordneten Produktvariante eine Distanzrestriktion von zwei gilt. Beim vierten Ereignis findet zuletzt kein Verbau von Material statt. Für jedes der vier Ereignisse k müssen die eigene unabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit sowie der Einfluss anderer Ereignisse l betrachtet werden. Durch die Summe aller Einflüsse ergibt sich schließlich die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Verbaueignisses k am Klienten j . Aus der erzeugten empirischen Verteilung wird eines der vier Ereignisse zum Produktionstakt bestimmt. Unter der Annahme, dass das dritte Ereignis mit der Wahrscheinlichkeit 50,5 % gezogen wurde, tritt dieses Ereignis beim nachfolgenden Produktionstakt aufgrund der Distanzrestriktion mit Sicherheit nicht ein. Die Wahrscheinlichkeiten der anderen Ereignisse verändern sich dann dementsprechend (vgl. [Lie-2018a]).

Tabelle 5-1: *Schrittweise Entstehung der diskreten empirischen Verteilung der Verbaueignisse eines Klienten an einem Beispiel (vgl. [Lie-2018a])*

Ereignis k	Material i	$r_{V,kj}$	$p_{unabhängig}$	$p_{bedingt}$				Gesamt
				Ereignis l				
				1	2	3	4	
1	M1	0,3	0,3	0,3	0,075	-0,056	0	0,319
2	M2	0,3	0,125	0	0,125	-0,056	0	0,069
3	M2	0,3	0,43	0	0,075	0,43	0	0,505
4	∅	0,1	0,1	0	0,025	-0,019	0,1	0,106

Neben den Einflussfaktoren aus dem Produktionsprogramm hängt der modellierte Nachschubbedarf von der Ladungsträgerkapazität, den Füllmengenabweichungen sowie dem Ausschuss ab (vgl. [Dew-2015; Lie-2018a]).

Die Ladungsträgerkapazität bestimmt die geplante initiale Ladungsträgerfüllmenge. Durch die kontinuierlichen, zeitdiskreten Entnahmen von Materialeinheiten aus den Ladungsträgern sinkt diese. Sobald ein Ladungsträger leer ist, entsteht in den betrachteten Referenzsystemen ein Transportbedarf. Die initial geplante Ladungsträgerfüllmenge kann innerhalb eines Toleranzbereichs, der Füllmengenabweichung, nach oben oder nach unten von der Ladungsträgerkapazität abweichen. Die tatsächliche initiale Ladung eines Behälters ist dann für jeden Ladungsträger individuell. Zusätzlich können die Materialeinheiten in einem Ladungsträger nicht die notwendige Qualität aufweisen oder falsch zugeordnet sein (vgl. [Cap-2017]). In diesem Fall muss beim Verbrauch so lange eine weitere Einheit aus dem Ladungsträger entnommen werden, bis ausreichend gute Materialeinheiten verbaut wurden. Diese Form des

Materialausschusses ist durch die Berücksichtigung einer Qualitätsrate modelliert (vgl. [Lie-2018a]).

Im Folgenden wird der Einfluss der modellierten Faktoren auf die Transportbedarfe erläutert. Auf Basis von beispielhaften Referenzwerten (siehe Tabelle 5-2) wird eine Sensitivitätsanalyse der Faktoren durchgeführt, indem jeweils 100.000 Produktionstakte für ein Material eines Klienten simuliert werden.

Tabelle 5-2: Referenzwerte für die Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren auf die Transportbedarfe

Einflussfaktor	Formelzeichen	Wert	Einheit
Produktionstaktzeit	T	60	s
Verbaurrate	r	0,25	-
Abstandsrestriktion	d	1	Produktionstakte (PT)
Blockrestriktion	b	1	Produktionstakte (PT)
Verbauzahl	z	1	Materialeinheiten (ME)
Ladungsträgerkapazität	k	8	Materialeinheiten (ME)
Füllmengenabweichung	Δk	0	-
Qualitätsrate	q	1	-

Durch eine Variation der Produktionstaktzeit T werden sowohl die Verteilung der Zwischenverbrauchszeit als auch der Zwischenabrufzeit beeinflusst. Eine Verlängerung der Taktzeit führt zu einer Dehnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie zu einer Verschiebung zu größeren Abrufzwischenzeiten. Deren Varianz und damit die Transportbedarfsschwankungen des Klienten im Routenzugsystem steigen (siehe Abbildung 5-5).

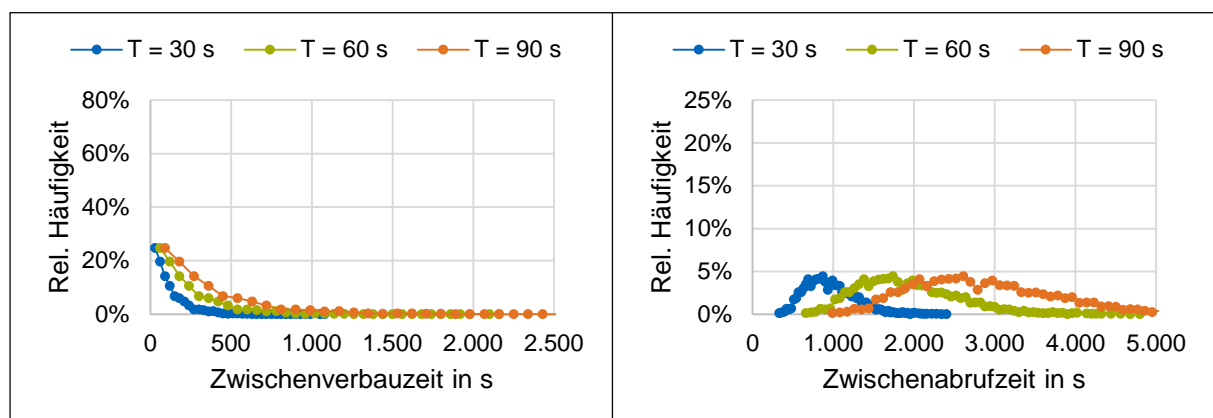


Abbildung 5-5: Sensitivitätsanalyse des Einflussfaktors Produktionstaktzeit T auf die Verteilungen der Zwischenverbrauchs- und Zwischenabrufzeit

Da die Zwischenzeiten diskrete Vielfache der Produktionstaktzeit sind, werden die Effekte der weiteren Einflussfaktoren im Folgenden auf den Produktionstakt (PT) normiert ausgewertet. Die Aussagen gelten somit unabhängig von der Produktionstaktzeit.

Ebenso wie der Produktionstakt beeinflussen die Verbraurate r , der Distanzabstand d sowie die Blockgröße b der Sequenzrestriktionen sowohl die Verteilung der Zwischenverbrauchszeit als auch die der Zwischenabruflzeit (siehe Abbildung 5-6).

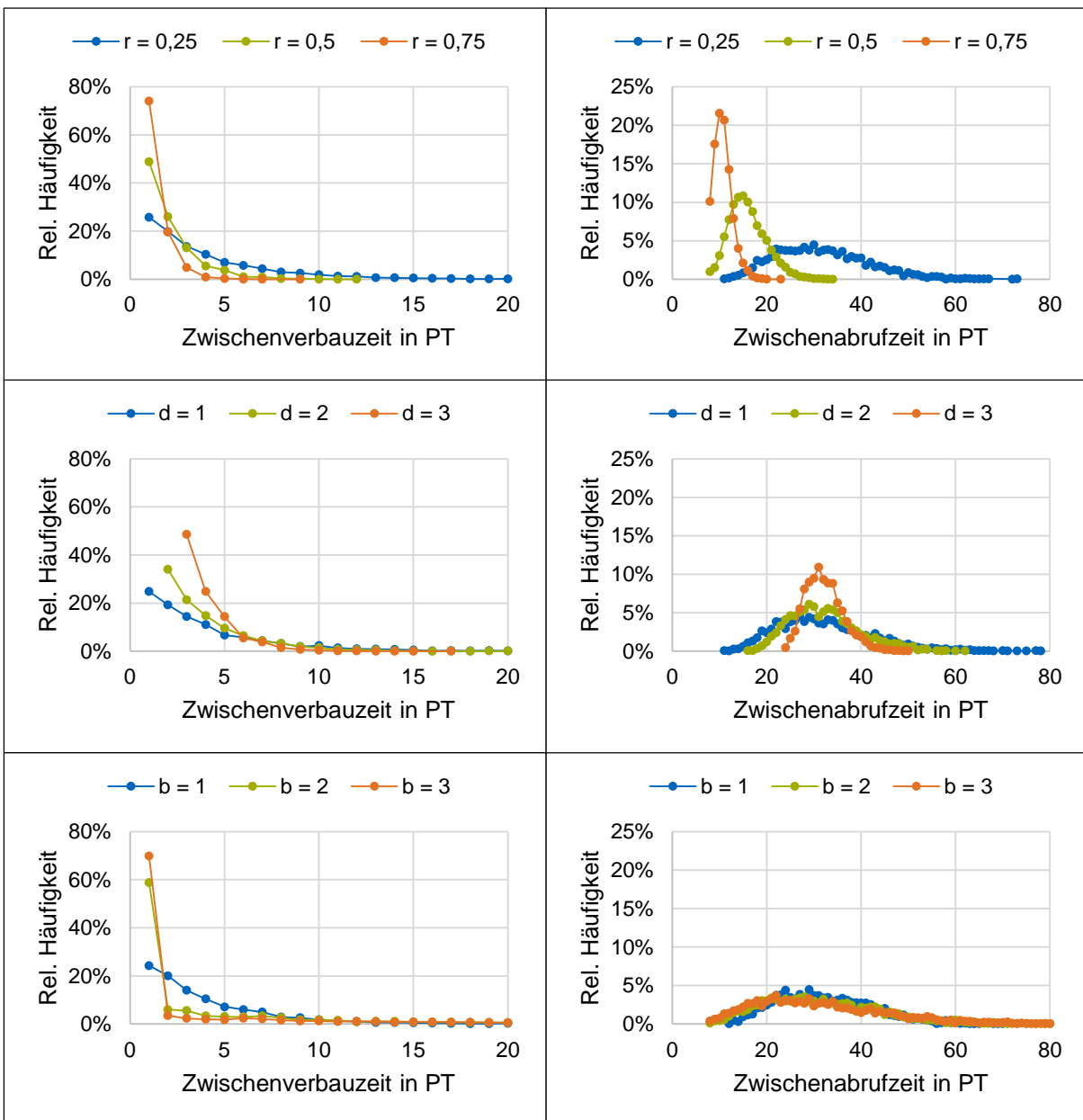


Abbildung 5-6: Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren Verbraurate r , Distanzrestriktion d und Blockrestriktion b auf die Verteilungen der Zwischenverbrauchs- und Zwischenabruflzeit

Je höher die Verbraurate r eines Materials an einem Klienten ist, desto häufiger sind kurze und besser prognostizierbare Zwischenverbrauchszeiten. Die gleiche Tendenz gilt für die Zwischenabrufzeiten. Eine Verringerung der Verbraurate r führt zu einer stark abgeflachten Kurve mit höheren mittleren Zwischenabrufzeiten und einer massiven Erhöhung der Streubreite.

Die Distanzrestriktionen beeinflussen die Zwischenverbrauchszeiten hauptsächlich im Bereich des Distanzabstands d , da kleinere Produktionstaktabstände nicht auftreten dürfen. Die Verteilung wird, bildlich gesprochen, in diesem Bereich nach oben gebogen. Auf die Zwischenabrufzeiten wirken sich die Distanzrestriktionen so aus, dass mit höherem Distanzabstand d besser prognostizierbare Abstände möglich sind. Die Verteilung wird dann zum Mittelwert hin gestaucht.

Durch die Blockrestriktionen wird die Zwischenverbrauchszeit von einem Produktionstakt stark erhöht. Dies gilt umso mehr, je höher die Blocklänge b ist. Die Auswirkungen auf die Zwischenabrufzeiten sind gering. Dennoch wird die Verteilung bei einer größeren Blocklänge b leicht zu kleineren Zwischenabrufzeiten geneigt. Ebenso wird die Kurve in diesem Fall leicht abgeflacht.

Die weiteren Einflussfaktoren beeinflussen die Schwankungen der Transportbedarfe erst nachdem die Entscheidung für den Verbrauch eines Materials getroffen wurde. Die Verteilungen der Zwischenverbrauchszeiten werden durch eine Variation dieser Faktoren daher nicht verändert (siehe Abbildung 5-7).

Im Anschluss an die Entscheidung eines Materialverbaus zu einem Produktionstakt bestimmt die zugeordnete Verbauzahl z die Geschwindigkeit, mit der die Materialeinheiten eines Ladungsträgers verbraucht werden. Je höher die Verbauzahl z ist, desto schneller ist der Verbrauch und desto niedriger sind die Zwischenabrufzeiten.

Im Gegensatz dazu kann die Materialreichweite eines Ladungsträgers durch eine größere Kapazität k erhöht werden. Gleichzeitig werden die Zwischenabrufzeiten durch höhere Ladungsträgerkapazitäten jedoch zu höheren Werten verschoben und deren Verteilung leicht abgeflacht, so dass eine höhere Schwankungsbreite entsteht.

Des Weiteren ergeben leichte Abweichungen in den Ladungsträgerfüllmengen Δk in positiver wie in negativer Richtung keine ersichtliche Auswirkung auf die Verteilung der Zwischenabrufzeit.

Zuletzt zeigt die Sensitivitätsanalyse der Qualitätsrate q , dass ein erhöhter Ausschuss durch Fehlteile in den Ladungsträgern zu einer Verschiebung der Verteilung zu

kleineren Zwischenabrufrzeiten führt, und folglich öfter Transportbedarfe entstehen. Die Form der Verteilung ändert sich jedoch kaum.

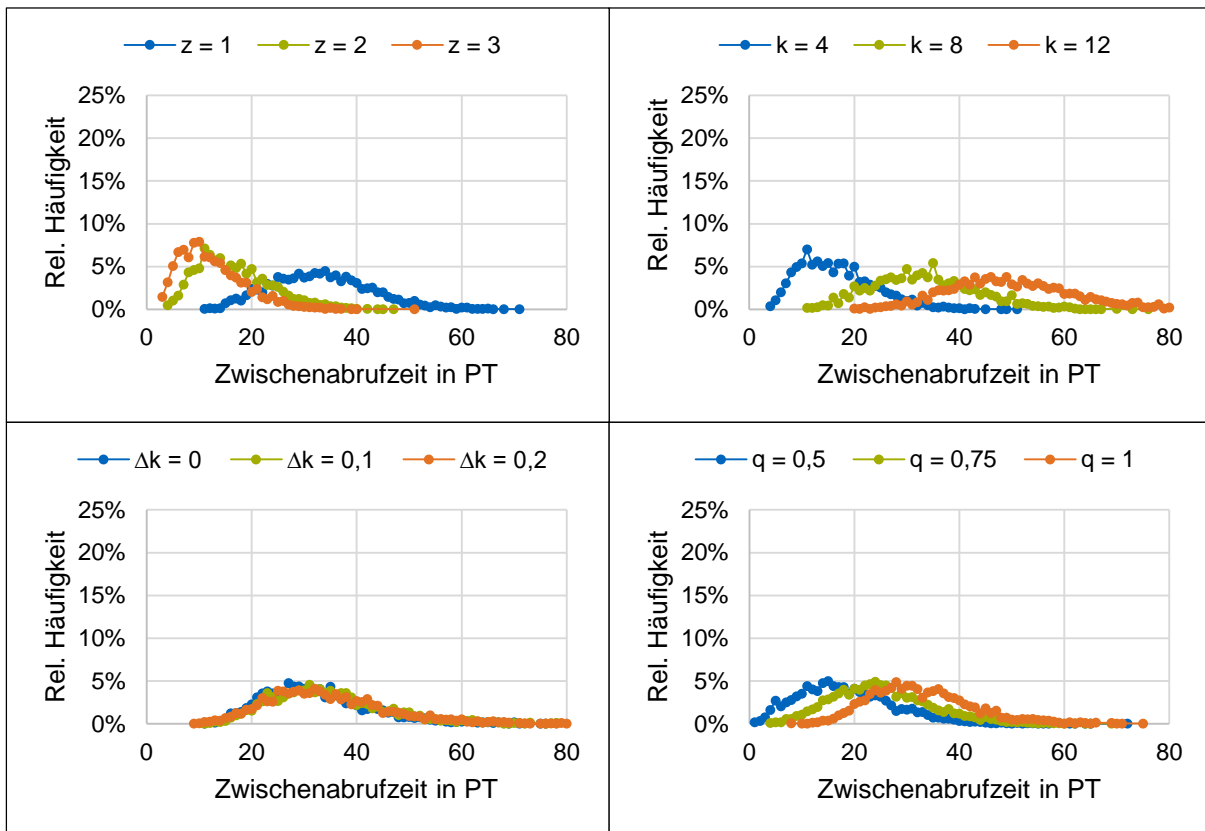


Abbildung 5-7: Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren Verbauzahl z , Ladungsträgerkapazität k , Füllmengenabweichung Δk und Qualitätsrate q auf die Verteilung der Zwischenabrufrzeit

Um die Schwankungen einer Verteilung der Zwischenabrufrzeit zu quantifizieren, wird der Variationskoeffizient c_{ZAZ} der Verteilung verwendet. Dieser ist definiert als das Verhältnis von der Standardabweichung σ_{ZAZ} zum Mittelwert μ_{ZAZ} der Zwischenabrufrzeitverteilung:

$$c_{ZAZ} = \frac{\sigma_{ZAZ}}{\mu_{ZAZ}} \quad (5-9)$$

Der Mittelwert μ_{ZAZ} der Zwischenabrufrzeit berechnet sich dabei nach Formel (5-10) aus der Produktionstaktzeit T , der Ladungsträgerkapazität k , der Qualitätsrate q sowie der Verbauzahl z und der Verbaurrate r :

$$\mu_{ZAZ} = \frac{T \cdot k \cdot q}{r \cdot z} \quad (5-10)$$

Distanzabstand d und Blocklänge b der Sequenzrestriktionen sowie die Füllmengenabweichung Δk haben keinen Einfluss auf den Mittelwert (siehe auch Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7). Zumindest die Sequenzrestriktionen scheinen jedoch die Standardabweichung der Zwischenabrufzeitverteilung σ_{ZAZ} zu beeinträchtigen. Eine analytische Beziehung zu deren Berechnung unter Berücksichtigung der Sequenzrestriktionen oder ein Beweis deren Existenz wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden. *Klenk* leitet jedoch eine analytische Beziehung zwischen der Standardabweichung und den weiteren Einflussfaktoren her. Die Standardabweichung der Zwischenabrufzeitverteilung σ_{ZAZ} berechnet sich demnach zu (vgl. [Kle-2017, S. C-1]):

$$\sigma_{ZAZ} = \frac{T}{r} \sqrt{1-r} \quad (5-11)$$

Die Qualitätsrate q hat zudem keinen Einfluss auf die Standardabweichung σ_{ZAZ} .

Schwankungen der Transportbedarfe lassen sich durch eine XYZ-Klassifikation des Variationskoeffizienten c_{ZAZ} kategorisieren. Je höher der Variationskoeffizient ist, desto höher sind die Schwankungen. Im Rahmen einer Variantenproduktion sind bereits Transportbedarfe mit Variationskoeffizienten ab 0,5 stark schwankend und somit der Kategorie Z zuzuteilen. Transportbedarfe, deren Abrufzwischenzeitverteilung einen Variationskoeffizienten unter 0,25 aufweisen, werden als wenig schwankend beurteilt und gehören zu Kategorie X. In der Kategorie Y befinden sich dann die Transportbedarfe im mittleren Schwankungsbereich.

Durch die Modellierung des Transportbedarfs wird der verbrauchsorientierte Nachschubbedarf der Routenzugreferenzsysteme abgebildet (Anforderung 1). Des Weiteren werden konkrete Transportbedarfe auf der Basis einer stochastischen Verteilung in Abhängigkeit des Produktionsfortschritts erzeugt (Anforderung 3).

5.2.3 Transportressourcen

Als Transportressourcen dienen in den Referenzsystemen dieser Arbeit Routenzüge mit Schlepper und Anhänger. Je nach zu transportierendem Ladungsträger sowie Handhabungsprozess kommen unterschiedliche Technikvarianten der Anhängerkonzepte zum Einsatz (siehe Abschnitt 4.3). In Abbildung 5-8 sind die Varianten schematisch dargestellt.

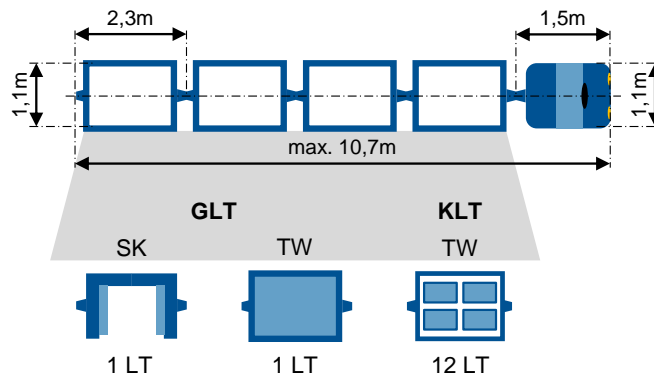


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Transportressource Routenzug mit Technikvarianten

In allen Referenzsystemen wird der Schlepper des Routenzugs durch einen stehenden Routenzugfahrer bedient. Beim Stopp eines Fahrzeugs wird zudem die Feststellbremse automatisch ausgelöst. Als durchschnittliche Abmaße gängiger Schleppfahrzeuge¹⁴ wird eine Gesamtlänge des Schleppers von 1,5 m und eine Breite von 1,1 m modelliert. Durch die Fahrerposition, notwendige Schritte beim Stopp des Fahrzeugs sowie die Abmaße des Schleppers werden die Zykluszeit an Quelle und Senken des Routenzugsystems beeinflusst (siehe Abschnitt 5.2.4).

Je schneller ein Routenzug fahren kann, desto geringer sind die Kosten des Gesamtsystems [Mar-2018]. Allerdings wird die maximale Geschwindigkeit meist durch das Transportnetzwerk sowie Sicherheitsvorschriften begrenzt. In dieser Arbeit wird die Geschwindigkeit eines Routenzugs mit durchschnittlich 1,67 m/s angenommen. Eine Variation der Fahrgeschwindigkeit im technisch möglichen sowie zulässigen Bereich hat im Gegensatz zur Transportkapazität und Handhabungszeit nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtleistung eines Routenzugsystems [Wan-2012]. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ebenso auf eine Modellierung von Beschleunigungsvorgängen verzichtet.

Die Abmaße eines Anhängers werden unabhängig vom technischen Konzept mit einer Länge von 2,3 m und einer Breite von 1,1 m modelliert. Diese haben einen Einfluss auf die Laufwege bei der Ladungsträgeraufnahme und -abgabe. Während bei den GLT-Anhängern Transportwagen sowie Transportrahmen mit Ein-/ Aufschubkonzept unterschieden werden, verwenden KLT-Routenzüge nur Transportwagen. Der Transportwagen beim GLT-Transport wird durch eine Bolzenkupplung an den Routenzug an- bzw. abgekoppelt. Die Be- und Entladeseite ist daher beim Transportwagenprinzip nicht prozessrelevant. Anhänger mit Ein-/ Aufschubkonzept bleiben mit dem

¹⁴ Im Rahmen des Projekts IntegRoute (vgl. [Gün-2016]) entstand am Lehrstuhl fml eine Datenbank zu gängigen Technikvarianten. Die Modellierung der Transportressourcen basiert auf dieser Datenbank. Für die Ladungsträgermassen wurden folgenden Annahmen getroffen: GLT (voll und leer) 300 kg und 50 kg, KLT (voll und leer) 10 kg und 1 kg

Routenzug verbunden und haben vorbestimmte Be- und Entladeseiten. In dieser Arbeit wird dazu ein C-Frame modelliert, der nur von rechts be- und entladen werden kann. Zusätzlich verfügen die Transportrahmen über eine Hubfunktion. Die Beladestationen in der Materialflussquelle befinden sich in den Routenzugsystemen mit dieser Technikvariante ebenfalls auf der rechten Seite. Die Transportwagen für den KLT-Transport bleiben ebenso mit dem Routenzug verbunden und haben in dieser Arbeit auch vorbestimmte Be- und Entladeseiten. Dazu werden Transportwagen mit Durchlaufregalen modelliert, die von links beladen und von rechts entladen werden. Die Beladestationen in der Materialflussquelle befinden sich in diesen Systemen auf der linken Seite des Routenzugs.

Die logistische Systemleistung wird durch die Transportkapazität einer Transportressource beeinflusst (siehe Abschnitt 2.3). Auf einem GLT-Anhänger kann durch die Modellierung ein Ladungsträger transportiert werden. KLT-Anhänger haben eine Kapazität von zwölf Ladungsträgern. Die gesamte Transportkapazität eines Routenzugs hängt zudem von der Anzahl der Anhänger ab. *Bortolini et al.* zeigen, dass die Systemkosten ab sechs Anhängern mit zunehmender Anzahl deutlich steigen [Bor-2015]. Generell wird die maximale Anzahl von Anhängern eines Routenzugs oft durch die maximal zulässige Länge eines Fahrzeugs im Betrieb sowie durch technische Restriktionen bestimmt. Ein Richtwert für die maximale Routenzuglänge ist 10 m [Gün-2012, S. 48]. Zudem wurden durch *Günthner et al.* im Rahmen einer Praxisstudie erfasst, dass in 75 % der Routenzugsysteme maximal vier Anhänger pro Schlepper verwendet werden [Gün-2012, S. 54]. Daher werden in dieser Arbeit maximal vier Anhänger pro Routenzug eingesetzt, wodurch sich eine maximale Länge von 10,7 m für einen Routenzug ergibt. Die tatsächliche Ladungsträgerkapazität eines Routenzuganhängers ist in der Praxis vielfältig. Daher wird in dieser Arbeit ausgehend von den modellierten Werten der Effekt von unterschiedlichen Transportkapazitäten untersucht. Pro Referenzsystem wird die Auswirkung von kurzen Zügen mit einem Anhänger und langen Zügen mit vier Anhängern analysiert. Es werden jedoch jeweils homogene Routenzugflotten verwendet. Für GLT-Routenzüge ergeben sich dadurch Transportkapazitäten von einem Ladungsträger bei kurzen Zügen und vier Ladungsträgern bei langen Zügen. Kurze KLT-Routenzüge können zwölf Ladungsträger transportieren, lange Züge 48 KLT.

Die Modellierung der Transportressourcen ermöglicht folglich die Abbildung verschiedener Ausprägungen der Routenzugreferenzsysteme (Anforderung 1).

5.2.4 Zykluszeit

Die Modellierung der Zykluszeit wurde im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit bereits von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2019]) veröffentlicht und basiert auf dem Zeitbausteinsystem von *Günthner und Keuntje* (vgl. [Gün-2016]) sowie *Keuntje et al.* (vgl. [Keu-2016]). Im Folgenden werden die für die Untersuchungen dieser Arbeit erforderlichen Zusammenhänge erläutert.

Die Effizienz von innerbetrieblichen Routenzugsystemen hängt stark von der Zykluszeit und insbesondere der darin enthaltenen Handhabungszeiten an Materialflussquelle und -senken ab (vgl. [Wan-2012]). Diese Abläufe werden von der Prozessorganisation, der technischen Gestaltung und der Infrastruktur beeinflusst [Lie-2019].

Nach der *VDI-Richtlinie 5586* setzt sich die Zykluszeit t_{Zyklus} einer Tour eines Routenzugs aus der Fahrtzeit t_F , der Beladezeit t_B , der Entladezeit t_E und der Haltepunktzeit t_H zusammen [VDI-5586a]:

$$t_{Zyklus} = t_F + t_B + t_E + t_H \quad (5-12)$$

Während die Fahrtzeit t_F sowohl die eigentliche Fahrt als auch Staus berücksichtigt, werden Be- und Entladezeit t_B und t_E berechnet, indem die Anzahl der be- und entladenen Ladungsträger mit dem jeweiligen Zeitaufwand zur Durchführung der Tätigkeit multipliziert wird (vgl. [Kle-2012]). Des Weiteren werden durch die Haltepunktzeit t_H Nebenzeiten, wie das Auf- und Absteigen vom Schlepper, am Haltepunkt berücksichtigt [VDI-5586a].

Im Folgenden wird ein generischer Modellierungsansatz, mit dem die Zykluszeitanteile der unterschiedlichen Referenzsysteme einheitlich beschrieben werden, vorgestellt. Insbesondere können durch die Modellierung dynamische Einflüsse auf die Zykluszeit in den Untersuchungen berücksichtigt werden (vgl. [Lie-2019]).

Die Fahrtzeit t_F einer Tour ergibt sich in dieser Arbeit zum einen aus der Kombination der Geschwindigkeit eines Routenzugs (siehe Abschnitt 5.2.3) und der im Transportnetzwerk zurückgelegten Strecke (siehe Abschnitt 5.2.1). Zum anderen werden dynamische Einflüsse wie Blockaden durch andere Routenzüge, die evtl. überholt werden können, oder die Vorfahrtsregelung an Kreuzungsbereichen im Rahmen einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation (siehe Abschnitt 7.1) berücksichtigt.

Die weiteren Anteile der Zykluszeit entstehen durch die Abläufe an Materialflussquelle und -senken (vgl. [Fir-2013]). In Abbildung 5-9 ist beispielhaft die Wechselwirkung zwischen der Anhängertechnik und der Infrastruktur im Routenzugsystem dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Anfahrtrichtung bei der Verwendung von Transportrahmen einen deutlichen Einfluss auf die zurückzulegenden modellierten Wege hat.

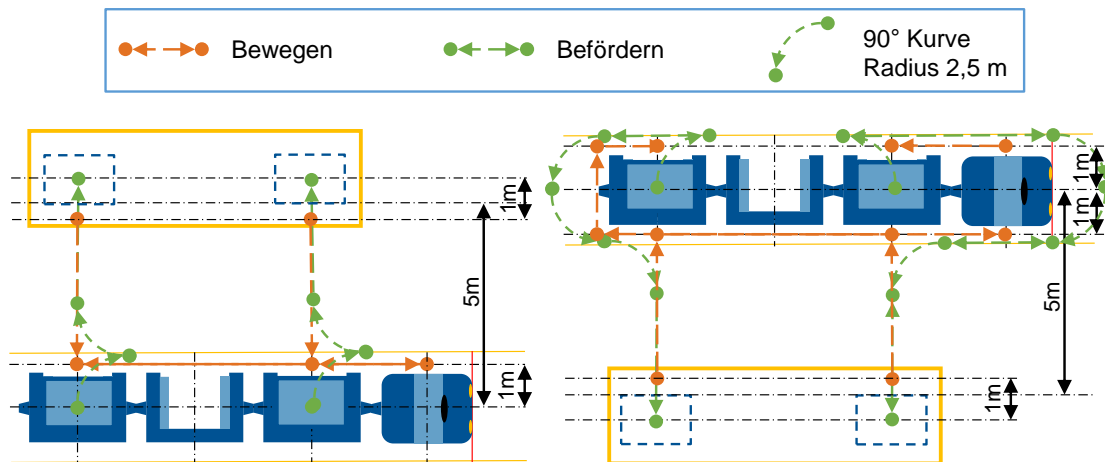


Abbildung 5-9: Bereitstellwege an der Senke in Abhängigkeit der Infrastruktur und Anfahrtrichtung

Auf Basis einer Musteranalyse der Referenzprozesse und der von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) erhobenen Daten werden folgende Standardmodule für die Abläufe identifiziert (vgl. [Lie-2019]):

- *Vorverarbeiten*: Aktivitäten, die zum Start der Abläufe erforderlich sind, z. B. das Absteigen vom Routenzugschlepper,
- *Bewegen*: Bewegung einer Person oder eines Objekts, z. B. Routenzugfahrer oder Gabelstapler, ohne Ladungsträgertransport,
- *Handhaben*: Aufnahme oder Abgabe von Ladungsträgern am Routenzug,
- *Befördern*: Bewegung einer Person oder eines Objekts, z. B. Routenzugfahrer oder Gabelstapler, mit Ladungsträgertransport,
- *Umsetzen*: Aufnahme oder Abgabe von Ladungsträgern an der Systemgrenze, z. B. am Bereitstellregal und
- *Nachverarbeiten*: Aktivitäten, die zur Fertigstellung der Abläufe erforderlich sind, z. B. das Aufsteigen auf den Routenzugschlepper.

Durch die Standardmodule wird die einheitliche Modellierung der Referenzsysteme erleichtert. Zudem lassen sich darüber hinaus einfach weitere Szenarien, z. B. im Hinblick auf automatisierte Prozesse (siehe Abschnitt 9.3), integrieren. Um einen konkreten Prozess eines Referenzszenarios abzubilden, müssen die Standardmodule in eine Ablaufreihenfolge gebracht und jeweils mit prozess- und technikabhängigen Zeitdauern versehen werden (vgl. [Lie-2019]).

Der Ablauf eines Prozesses wird durch Zustände und deren Übergänge beschrieben. Die Beziehungen der Zustände können durch ein Zustandsdiagramm (siehe Abbildung 5-10) verdeutlicht werden. Nach dem Vorverarbeiten werden mehrere Zustände iterativ durchlaufen, bis alle Handhabungsschritte aller am Haltepunkt zu bearbeitenden Transporteinheiten durchgeführt wurden. Der Ablauf wird durch das Nachverarbeiten beendet (vgl. [Lie-2019]).

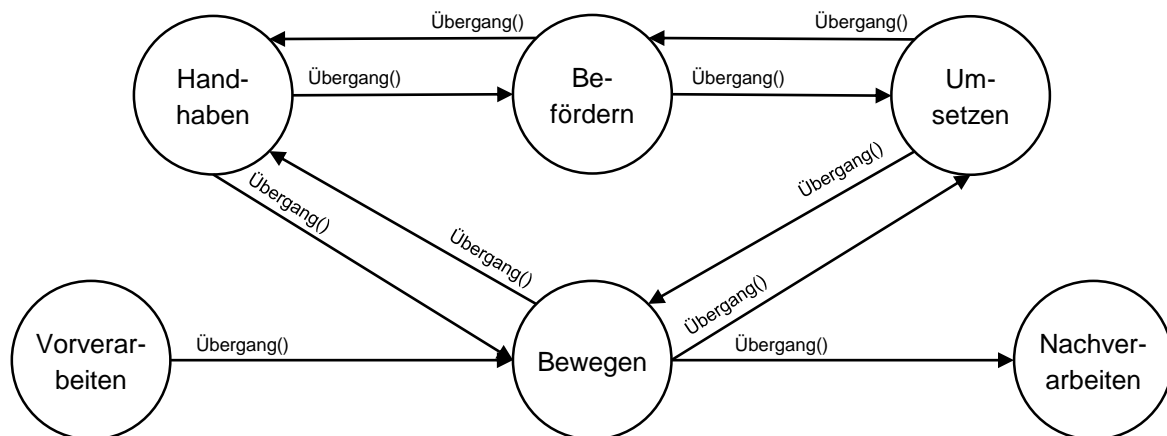


Abbildung 5-10: Zustandsdiagramm des generischen Modellierungsansatzes der Handhabungsprozesse (vgl. [Lie-2019])

Dadurch haben alle Transporteinheiten den gleichen Ablauf der Zustände. Die Systemablaufbeschreibung ist in Abbildung 5-11 als UML-Diagramm dargestellt. Durch die Übergangsfunktion (*Übergang()*) von einem vorangehenden Zustand (*vorZustand*) zum aktuellen Zustand (*aktZustand*) wird sichergestellt, dass die Zeitdauer des aktuellen Zustands für jeden Ladungsträger individuell in Abhängigkeit des vorangehenden Zustands und der Systemparameter dimensioniert wird.

Diese individuelle Zeitdauer basiert auf dem statischen Zeitbausteinsystem von *Günthner und Keuntje* (vgl. [Gün-2016]) sowie *Keuntje et al.* ([Keu-2016]). Dort werden Prozesse am Routenzugbahnhof und an den Bereitstellorten mittels MTM modelliert. Die entwickelten Zeitbausteinsysteme verwenden die beiden Systeme *Universelles Analysiersystem* (UAS) (vgl. [MTM-2004]) und *Standardvorgänge Logistik* (vgl. [MTM-2007]) [Gün-2016].

Um die Dynamik eines realen Routenzugsystems zu berücksichtigen, wird die Dauer eines Zustands aus einer stochastischen Dreiecksverteilung von 80 % bis 120 % der aus dem Zeitbausteinsystem ermittelten Zustandsdauer berechnet. Diese Spannweite entspricht dem beurteilbaren Bereich bei der Erstellung der MTM-Normwerte. Je nach Prozess können Zustände eine Dauer von Null haben (vgl. [Lie-2019]). Die gesamte Zykluszeit einer Tour ist folglich von zahlreichen Parametern abhängig, die in

Wechselwirkung zueinander stehen. Dies muss insbesondere bei der Tourenbildung beachtet werden, um Zeitfenster einhalten zu können.

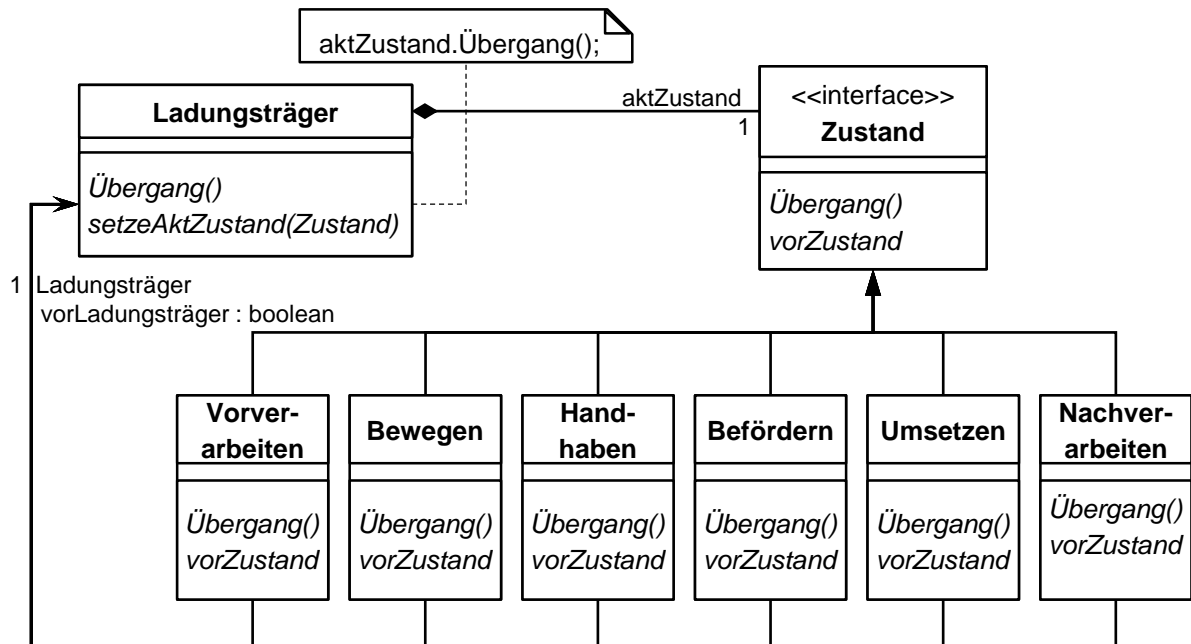


Abbildung 5-11: UML-Diagramm des generischen Modellierungsansatzes der Handhabungsprozesse (vgl. [Lie-2019])

Durch die Modellierung der Zykluszeit können verschiedene Technik- und Prozessvarianten der Routenzugreferenzsysteme abgebildet werden (Anforderung 1). Des Weiteren dienen die mittleren Planwerte der Zykluszeiten als Basis für die Kostenermittlung der Optimierungsalgorithmen (Anforderung 2). Zudem werden die Anteile der Zykluszeit bzgl. Fahrt und Handhabung der Ladungsträger detailliert modelliert. Dadurch wird die Verfügbarkeit der Routenzüge für die Tourenzuteilung während der Zykluszeit eingeschränkt (Anforderung 4). Außerdem wird die Stauzeit während einer Tour erfasst (Anforderung 5).

Insgesamt berücksichtigt die beschriebene Modellierung damit alle Anforderungen, die an die Formalisierung der Routenzugsysteme im Rahmen dieser Arbeit gestellt wurden.

6 Entwicklung der Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme

In diesem Kapitel wird eine modulare Struktur für die Routenzugsystemsteuerung konzipiert. Durch die Kombination verschiedener Ausgestaltungen der Module lassen sich Strategien zur Routenzugsystemsteuerung mit unterschiedlichem Dynamisierungsgrad ableiten. Die Ableitung der Module aus den Steuerungsentscheidungen und deren Systemzusammenhang im Rahmen einer Steuerungsstrategie werden in Abschnitt 6.1 dargestellt. Anschließend werden die einzelnen Module sowie deren Ausprägungen und algorithmische Ausgestaltung in Abschnitt 6.2 erläutert. In Abschnitt 6.3 werden die Modulausprägungen schließlich zu Steuerungsstrategien mit unterschiedlichem Dynamisierungsgrad als Grundlage zur Beantwortung der Forschungsfrage kombiniert.

6.1 Modulare Struktur der Steuerungsstrategien

Eine Steuerungsstrategie für Routenzugsysteme umfasst die Dimensionen *Auftrag*, *Weg*, *Zeit* und *Ressourcen* [Hor-2017]. Daraus wurden in Abschnitt 3.1.2 folgende steuerungsrelevante Entscheidungsprobleme abgeleitet:

- Clusterbildung,
- Reihenfolgebildung,
- Wegfindung,
- Tourenbildung,
- Abfahrtszeitbestimmung und
- Ressourcenzuteilung.

Durch die Kombination dieser Entscheidungsprobleme werden in diesem Kapitel Steuerungsstrategien mit unterschiedlichem Dynamisierungsgrad entwickelt, mit denen kurzfristig bekannte Transportbedarfe so zu Touren gebündelt werden können, dass eine robuste und effiziente Produktionsversorgung erfolgt (siehe Abschnitt 1.3). Im Gegensatz zu Strategien, die auf deterministisch bekannten Transportbedarfen basieren, ist keine zeitlich globale Optimierung aller Entscheidungen möglich. Ein Optimum kann jeweils nur für den aktuell betrachteten Systemzustand gebildet werden. Durch das Auftreten neuer Transportbedarfe oder anderer Ereignisse im Routenzugsystem kann sich kontinuierlich ein neues lokales Optimum ergeben.

Klenk et al. präsentieren für eine solche dynamische Steuerungsstrategie eine Abfolge ähnlicher Entscheidungen. Ausgehend von der Überwachung der spätesten Bereitstellzeitpunkte der bekannten Transportaufträge werden, sobald ein Auftrag kritisch wird, die Abfahrtszeit und das ausführende Fahrzeug einer Tour unter der Beachtung der Prozesszeiten bestimmt. Anschließend werden weitere Aufträge zugeordnet und die Routenführung festgelegt, woraus sich letztlich die Reihenfolge der Bereitstellorte ergibt [Kle-2015b]. Dadurch wird jedoch nicht beachtet, dass die Hinzunahme weiterer Aufträge die Kritikalität eines Transportauftrags beeinflusst. Eine kritische Abfahrtszeit muss daher für eine Tour und nicht für einen Transportauftrag kalkuliert werden. Zudem wird der prinzipielle Ablauf der dynamischen Strategie zwar von *Klenk et al.* beschrieben, aber nicht weiter untersucht.

Um die Entscheidungsprobleme steuerungstechnisch miteinander zu verbinden, wird in dieser Arbeit eine modulare Struktur für eine Steuerungsstrategie verwendet (vgl. [Gal-2015]). Durch die Variation der Ausprägung einzelner Module können ohne große Anpassungen neue Strategiekonfigurationen realisiert werden. Das entwickelte Konzept zur Steuerung von Routenzugsystemen weist dadurch eine hohe Wandelbarkeit auf (vgl. [Lie-2017b, S. 452]).

Die Einordnung der steuerungsrelevanten Entscheidungen in die modulare Struktur der Routenzugsystemsteuerung ist in Abbildung 6-1 verdeutlicht. Die Entscheidungsprobleme treten dabei wiederholt in unterschiedlichen Steuerungsebenen auf und können sich gegenseitig beeinflussen. Zum einen wird zwischen dynamischen und statischen Entscheidungen unterschieden, zum anderen werden Probleme global, unter der Berücksichtigung aller verfügbaren Systeminformationen, oder lokal, mit einem eingeschränkten Betrachtungsraum, gelöst. Durch die unterschiedlichen Betrachtungsebenen folgt, dass die Ergebnisse einzelner Modulausprägungen mittel- bis langfristig im Rahmen der Planung des Routenzugsystems getroffen werden. Da dadurch jedoch mögliche Ausprägungen der weiter folgenden Steuerungsentscheidungen stark beeinflusst werden, sind diese planerischen Entscheidungen dennoch Bestandteil der Steuerungsstrategie.

Die statischen Entscheidungen der Steuerungsstrategien basieren einerseits auf einem fest definierten Transportnetzwerk und andererseits auf Planwerten, wie z. B. durchschnittlichen Transportbedarfen je Klienten. Auf Grundlage dieser statischen Informationen können die Cluster- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung integriert gelöst werden, indem feste Routen für das gesamte Routenzugsystem global definiert werden. Jedoch besteht ebenso die Möglichkeit, dass keines dieser drei Entscheidungsprobleme statisch betrachtet wird.

Für den Fall, dass statisch global definierte Routen gebildet wurden, kann für jede dieser Routen eine lokale Taktzeit in der Abfahrtszeitbestimmung berechnet werden, sofern eine getaktete Tourenstartlogik verwendet wird.

Des Weiteren kann die Ressourcenzuteilung von Routenzügen zu Touren statisch eingeschränkt werden, falls bestimmte Ressourcen nur für bestimmte Routen verwendet werden.

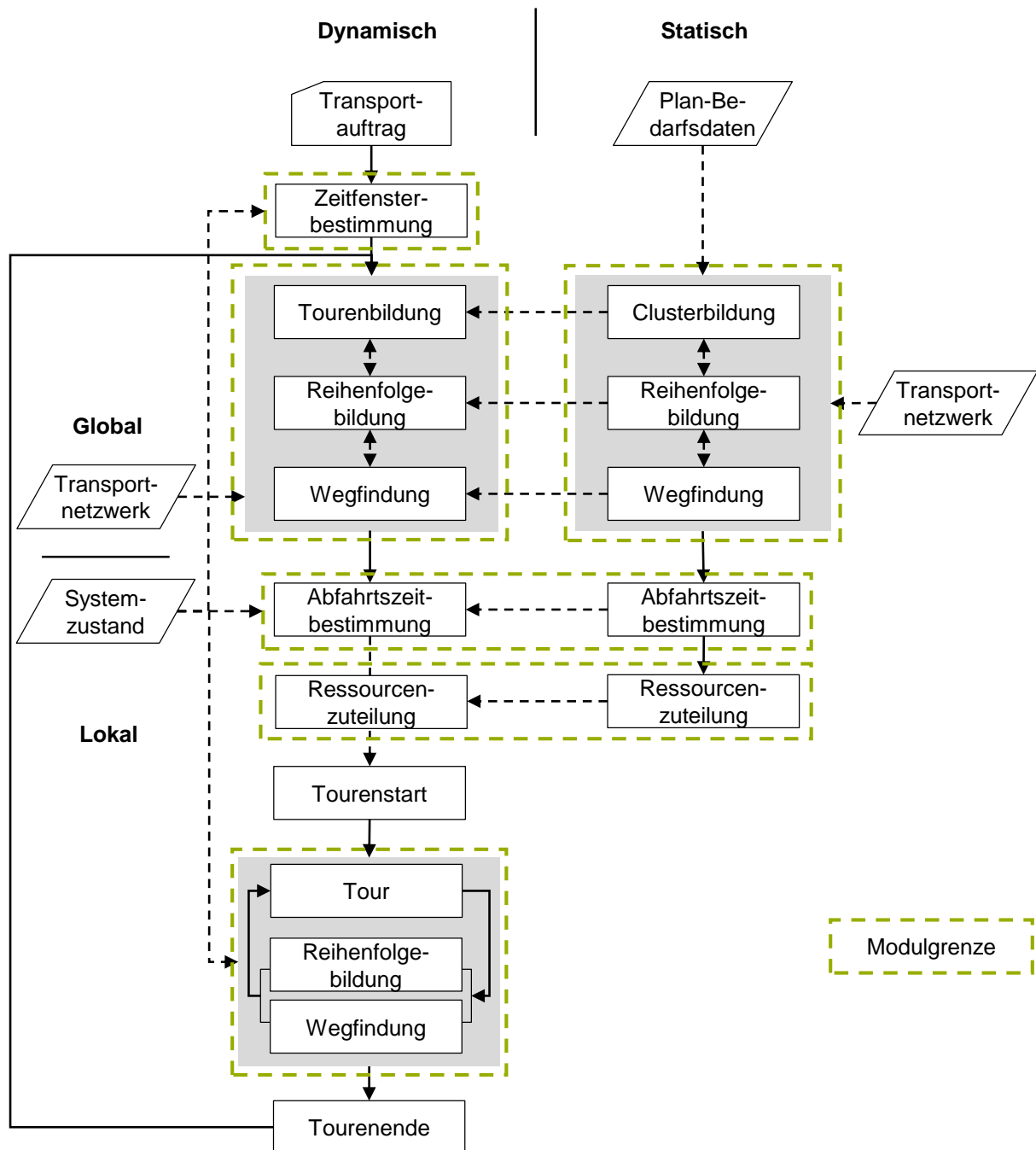


Abbildung 6-1: Integration der Entscheidungsprobleme in eine Routenzugsystemsteuerung

Entscheidungen, die in der statischen Betrachtungsebene der Steuerungsstrategie getroffen werden, beeinträchtigen den Lösungsraum der dynamischen Steuerungsentscheidungen. Des Weiteren werden Informationen aus dem Transportnetzwerk und dem aktuellen Systemzustand berücksichtigt. Der Auslöser der dynamischen Steuerungsentscheidungen auf globaler Ebene ist entweder das Eintreffen eines neuen Transportauftrags oder das Ende einer Tour, wodurch Transportressourcen wieder verfügbar werden. Um die rechtzeitige Bereitstellung des Transportauftrags in der Produktion zu ermöglichen, wird dieser mit einem Zeitfenster für eine früheste und späteste Bereitstellung versehen. Da die betrachteten Routenzugsysteme auf einer elektronischen Kanban-Logik basieren, entsteht ein Transportauftrag, sobald das Material einer Bereitstellereinheit verbraucht wurde. Die Nachversorgung kann im Tausch gegen den leeren Ladungsträger sofort beim Auftreten des Transportauftrags erfolgen. Die früheste Bereitstellungszeit entspricht folglich dem Zeitstempel der Nachfrage des Transportbedarfs. Die späteste Bereitstellungszeit ist hingegen vom Umlaufbestand und dem zu erwartenden Verbrauch des Materials am Klienten abhängig.

Vom konkreten Transportauftrag oder der Rückkehr einer Transportressource ausgelöst, beginnt die Tourenbildung. Je nach Strategie erfolgt die dynamische Tourenbildung optimiert mit einer integrierten Reihenfolgebildung und Wegfindung oder nach Prioritätsregeln unter Berücksichtigung getroffener statischer Entscheidungen. Wurden z. B. Routen statisch definiert, folgt die Bedienreihenfolge der dynamisch gebündelten Transportaufträge der statischen Routenreihenfolge. Bei der Wegfindung können dennoch, sofern sinnvoll möglich, Abweichungen vom statischen Fahrweg erfolgen.

Nachdem die Tour gebündelt und die Bedienreihenfolge sowie der geplante Fahrweg festgelegt wurden, wird die Abfahrtszeit einer Tour berechnet. Wurde ein statischer Takt definiert, startet die am höchsten priorisierte Tour zu dieser Taktzeit. Andernfalls werden individuelle Abfahrtszeiten für jede Tour nach definierten Logiken lokal bestimmt.

Sofern eine verfügbare Transportressource der Tour zugeteilt werden kann, erfolgt der Tourenstart schließlich zur berechneten Zeit unter der Annahme, dass alle Transporteinheiten rechtzeitig ausgelagert und zur Beladung auf den Routenzug bereitgestellt sind. Mit jedem neu eintreffenden Transportauftrag werden alle geplanten, noch nicht gestarteten Touren und deren Abfahrtszeiten rollierend übersteuert. Zum Tourenstart sowie während der Tour können je nach Strategie die Reihenfolge und der Fahrweg einer Tour angepasst werden, falls sich der Systemzustand geändert hat, indem z. B. Störungen im Verkehrsfluss aufgetreten sind. Die Auftragszusammensetzung einer Tour bleibt jedoch bis zum Tourenende unverändert.

Aus dem Ablauf und Zusammenhang der Entscheidungsprobleme innerhalb einer Steuerungsstrategie werden im Rahmen dieser Arbeit sechs Module für eine Routenzugsystemsteuerung abgeleitet (siehe Abbildung 6-1):

- Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg,
- Zeitfenster,
- Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg,
- Abfahrtszeit,
- Ressourcen und
- Intratour: Reihenfolge, Weg.

Jedes dieser Steuerungsstrategiemodule kann unterschiedliche Modulusprägungen und jede Ausprägung unterschiedliche Lösungsalgorithmen aufweisen. Im Folgenden werden je Modul Ausprägungen beschrieben sowie deren Abhängigkeiten zu anderen Modulen aufgezeigt. Ebenso werden Lösungsalgorithmen für die beschriebenen Modulusprägungen ausgewählt, angepasst bzw. neu entwickelt. Dazu werden die Abläufe durch Pseudocodes und Flussdiagramme verdeutlicht und wichtige Parameter der Algorithmen herausgestellt.

6.2 Steuerungsmodule

6.2.1 Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg

Durch eine integrierte Cluster- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung können mittel- bis langfristig statische Routen im Rahmen einer Steuerungsstrategie festgelegt werden. Eine Route ist der „definiert[e] Fahrweg eines Routenzugs im Layout entlang der zugeordneten Haltepunkte“ [VDI-5586a, S. 2]. Demnach wird in diesem Modul im Rahmen der Planung entschieden, welche Klienten und zugehörigen Haltepunkte zu einer organisatorischen Einheit zusammengefasst werden (Clusterbildung), in welcher Reihenfolge diese angefahren werden (Reihenfolgebildung) und welcher konkrete Weg dafür im Transportnetzwerk zu wählen ist (Wegfindung). Da diese Planungsentscheidungen die Steuerung maßgeblich beeinflussen, werden sie in dieser Arbeit als Modul einer Steuerungsstrategie aufgeführt.

Zum Zeitpunkt der Routenbildung stehen zumeist keine deterministischen Informationen zu Transportbedarfen für den Gültigkeitszeitraum der Routen zur Verfügung. Daher erfolgt entweder eine rein layoutbasierte Definition der Routen oder es werden, sofern vorhanden, durchschnittliche Plan-Transportbedarfe für eine gleichmäßige Routenauslastung herangezogen. Die rein layoutbasierte Routenbildung wird angewandt, wenn das Fabriklayout sehr restriktiv und der Fahrweg dadurch ohnehin

vorbestimmt sind (vgl. [Gün-2013, S. 116]). Des Weiteren wird dabei versucht, hochfrequentierte Bereiche und ungünstige Wegstrecken, wie z. B. Sackgassen, zu meiden bzw. nicht mit mehreren Routen gleichzeitig zu befahren (vgl. [Sta-2013a; Sta-2015]). Sind zumindest durchschnittliche Plan-Transportbedarfe für die zu versorgenden Klienten vorhanden, wird versucht, eine effiziente Ressourcenauslastung im Routenzugsystem zu erreichen, ohne die Reaktionsfähigkeit und Flexibilität in der Produktionsversorgung zu sehr einzuschränken. Dies kann erreicht werden, indem die maximale Fahrtzeit oder der maximale durchschnittliche Transportbedarf einer Route begrenzt werden (vgl. [Kle-2015a]). Im Rahmen der festgelegten Grenzwerte werden die zu definierenden Routen dann dahin optimiert, möglichst wenig Ressourcen für eine robuste Produktionsversorgung zu erfordern.

Der Systemzusammenhang des Moduls ist in Abbildung 6-2 schematisch dargestellt.

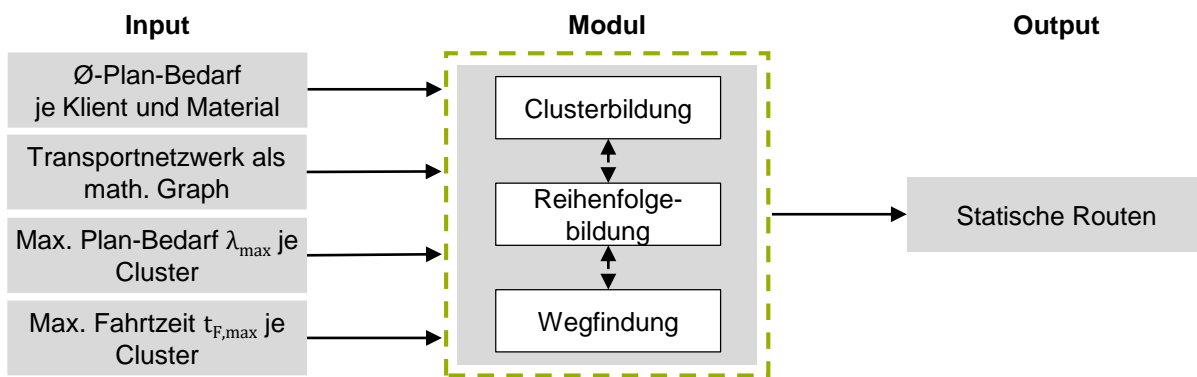


Abbildung 6-2: Systemzusammenhang des Moduls „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“

Für die Routenzugreferenzsysteme werden im Rahmen dieser Arbeit durchschnittliche Plan-Bedarfsdaten je Klienten und das Transportnetzwerk, beschrieben als mathematischer Graph, als Systemeingangsparameter verwendet. Des Weiteren sind Vorgaben zu den zwei Modulparametern maximaler Plan-Bedarf λ_{max} je Cluster und maximale Fahrtzeit $t_{F,max}$ je Route erforderlich. Mit diesen Parametern werden die Routenlängen begrenzt, damit Transportressourcen nicht zu lange auf einer Tour gebunden sind. Zudem wird sichergestellt, dass keine übermäßigen Transportbedarfsspitzen auf einzelnen Routen entstehen. Als Ergebnis des Moduls wird jeder Materialbedarf eines Klienten einer statischen Route zugeordnet, für die die Bedienreihenfolge und der Fahrweg festgelegt sind. Hat ein Klient mehrere Materialbedarfe, kann der zugehörige Haltepunkt auch von mehreren Routen angefahren werden.

Die Zielstellung innerhalb des Moduls ist es, ein Set von statischen Routen S_{route} im Transportnetzwerk unter der Berücksichtigung der Nebenbedingungen λ_{max} und $t_{F,max}$ so zu bilden, dass zum einen möglichst wenig Transportressourcen erforderlich

sind und zum anderen eine möglichst geringe Gesamtlänge aller Routen in Summe entstehen. Je mehr Routen geplant werden, desto mehr Transportressourcen sind tendenziell erforderlich. Bei einer statischen Ressourcenzuteilung muss z. B. jeder Route mindestens ein Fahrzeug zugeteilt werden. Daher wird im Rahmen des Moduls versucht, die Anzahl der gebildeten Routen in Abhängigkeit der Restriktionen zu minimieren. Der prinzipielle Ablauf, um eine mögliche Lösung für die Problemstellung zu finden, ist im Pseudocode in Abbildung 6-3 dargestellt.

```

1  BEGIN
2      H ← Dijkstra(T)
3      WHILE demand ≠ ∅ DO
4          λ ← demand.extract(rnd)
5          λ(route) ← λ
6          u ← getClient(λ)
7          route ← route + u
8          tF(route) ← tF(route) + cH(route,u)
9          FOR ALL λ ∈ demand DO
10             u ← getClient(λ)
11             IF tF(route) + c(route,u) ≤ tF,max AND λ(route) + λ ≤ λmax DO
12                 demand.extract(λ)
13                 route ← route + u
14                 λ(route) ← λ(route) + λ
15                 tF(route) ← tF(route) + cH(route,u)
16             Sroute ← Sroute + route
17             route ← route + 1
18  END

```

Abbildung 6-3: Pseudocode für den Ablauf der Routenbildung im Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“

Ausgehend vom gewichteten Graphen des Transportnetzwerks auf der modellierten Tiefebene wird der mathematische Graph der Hochebene (siehe Abschnitt 5.2.1) mittels des Dijkstra-Algorithmus (siehe Abschnitt 3.2.1) bestimmt. Dadurch sind bereits die kürzesten Wege sowie die minimalen Kosten zwischen den Spuren der den Klienten zugeordneten Haltepunkte bekannt. Anschließend werden die Routen solange mit zusätzlichen vollständigen Transportbedarfen der Klienten aufgefüllt, bis entweder die maximale Transportbedarfsmenge je Route oder die maximale Fahrtzeit einer Route

überschritten werden. Ist keine weitere Disposition eines Transportbedarfs zur aktuellen Route innerhalb der Restriktionen möglich, aber es sind noch nicht zu Routen zugeordnete Transportbedarfe im System vorhanden, wird eine neue Route eröffnet, und die Zuteilung beginnt für die restlichen Bedarfe erneut. Damit alle Plan-Bedarfe auf Routen verteilt werden können, darf einerseits der Transportbedarf eines einzelnen Klienten nicht größer sein als λ_{max} und andererseits die Fahrtzeit der Rundtour, von der Quelle zum Haltepunkt des Transportauftrags und zurück, nicht $t_{F,max}$ überschreiten.

Anschließend werden die Mächtigkeit sowie die Gesamtkosten des gebildeten Routensets S_{route} bestimmt, um das Ergebnis im weiteren Verlauf mit alternativen Lösungen zu vergleichen. Alternativlösungen werden einerseits generiert, indem die Reihenfolge der Transportbedarfsauswahl variiert wird und andererseits, indem bereits zu einer Route geclusterte Transportbedarfe in ihrer Abfahrreihenfolge getauscht werden. Durch diesen heuristischen Vergleich wird ein lokales Optimum für das Problem der Routenbildung unter den vorgegebenen Restriktionen gefunden. Als Verfahren zur Generierung der Lösungsalternativen wird in dieser Arbeit das naturanaloge MACS verwendet. Das Prinzip dieser Metaheuristik für die Lösungssuche wird ebenfalls im nächsten Modul in Abschnitt 6.2.3 verwendet und deshalb dort detailliert erläutert.

Durch eine Veränderung der vorgegebenen Parameterwerte für λ_{max} und $t_{F,max}$ wird die lokal optimale Lösung bei der Bildung von Routensets beeinflusst. Um optimale Parameterwerte zu verwenden, wird eine Multi-Szenario Simulation durchgeführt, bei der in Abhängigkeit des Transportlayouts und der den Klienten zugeordneten Transportbedarfen die Parameter so kalibriert werden, dass möglichst wenig Routenzüge und Umlaufbestand (WIP) für eine robuste Produktionsversorgung notwendig sind (siehe Evaluationsmethodik in Abschnitt 7.1).

In Abbildung 6-4 sind die Haupteffekte der Parametrisierung für das Layout *Montage* mit zehn Klienten für einen mittleren Transportbedarf beispielhaft dargestellt. Der Gesamttransportbedarf im Routenzugsystem λ_{system} verteilt sich gleichmäßig auf die Klienten. Der Parameter λ_{max} wird im Intervall $0,2 \cdot \lambda_{system}$ bis $1,0 \cdot \lambda_{system}$ in Schritten von 0,2 variiert. Die maximale Fahrtzeit auf einer Route wird in zehnminütigen Stufen von 600 s bis hin zu 3.600 s erhöht. Durch einen vollständigen Versuchsplan der Parameterkombinationen und einer Variation der Anzahl der eingesetzten Routenzüge von eins bis zehn zeigt sich in den Haupteffektdiagrammen, dass für eine maximale Routenfahrtzeit von $t_{F,max} = 600 \text{ s}$ sowohl der geringste mittlere WIP als auch die geringste mittlere Anzahl an Routenzügen erreicht werden. Für den Parameter λ_{max} ist im Rahmen der Haupteffekte lediglich eine starke Abhängigkeit der Zielgrößen vom Parameter, jedoch kein Trend erkennbar.

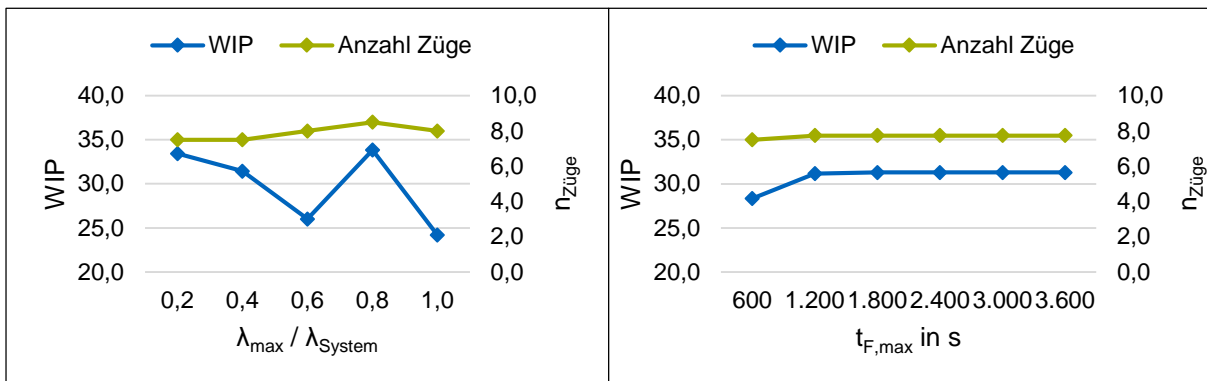


Abbildung 6-4: Haupteffektdiagramme der Parametereinstellungen bei der Routenbildung für das Layout Montage bei mittlerem Transportbedarf

In Abbildung 6-5 sind daher die detaillierten Simulationsergebnisse für einen festen Parameterwert von $t_{F,max} = 600$ s aufgeführt. In Abhängigkeit der eingesetzten Routenzüge ist das 90 % Konfidenzintervall für den WIP auf der Basis von fünf Beobachtungen dargestellt.

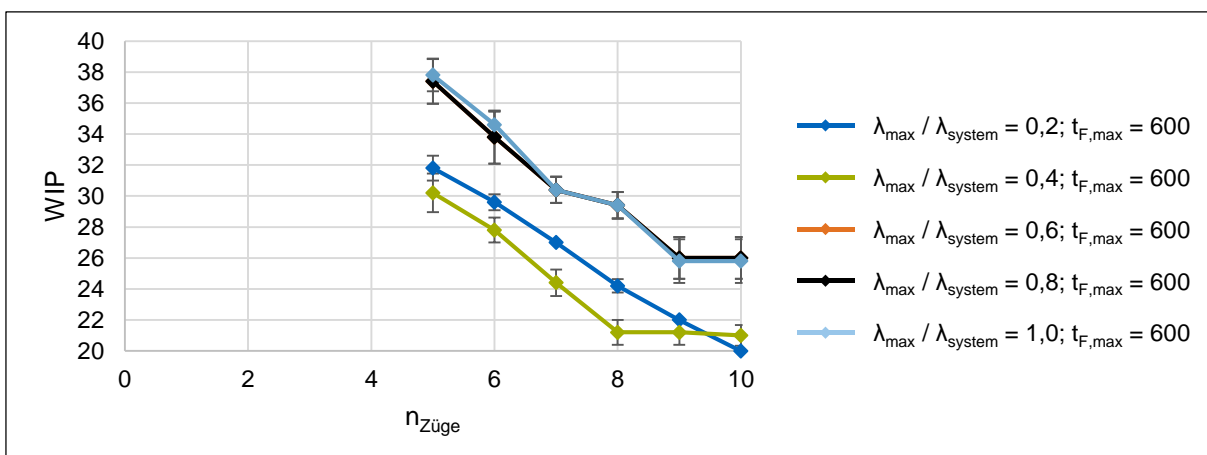


Abbildung 6-5: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl Routenzüge in Abhängigkeit des Parameters $\lambda_{max} / \lambda_{system}$ für $t_{F,max} = 600$ s

Die Ergebnisse zeigen, dass zunächst mindestens fünf Routenzüge für das untersuchte Szenario erforderlich sind, um eine robuste Produktionsversorgung zu garantieren. Des Weiteren liegt der notwendige WIP für $\lambda_{max} = 0,4 \cdot \lambda_{system}$ im Mittel der Stichprobe stets unter den Ergebnissen der anderen Parameterwerte für eine sinnvolle Anzahl an Routenzügen. Da für $\lambda_{max} = 0,4 \cdot \lambda_{system}$ der gleiche Umlaufbestand bei acht oder mehr Zügen erforderlich ist, ist der Einsatz von mehr als acht Zügen nicht effizient. Abgesehen von den Ergebnissen für fünf Routenzüge sind die Unterschiede auf dem betrachteten Konfidenzniveau zudem signifikant, weil sich die Konfidenzintervalle nicht überschneiden. Da die Haupteffekte aufgrund der vollständigen Simulation der eingesetzten zehn Routenzüge für jedes Szenario und der Möglichkeit, dass bestimmte Experimente zu keiner robusten Produktionsversorgung führen können,

verfälscht werden, ist in jedem Fall eine vollständige Detailbetrachtung aller Experimente zur optimalen Parametrisierung erforderlich. Resultieren mehrere Parameterkombinationen in optimalen Ergebnissen, werden die geringeren Grenzwerte gewählt, um die Reaktionsfähigkeit im Routenzugsystem zu erhöhen. Für das erläuterte Beispiel ergeben sich letztlich $\lambda_{max} = 0,4 \cdot \lambda_{system}$ und $t_{F,max} = 600 \text{ s}$ als optimale Parameterkombination. Die Parametrisierung der Grenzwerte für alle Routenzugreferenzsysteme in Abhängigkeit des Layouts, der Anzahl an Klienten und der Systemlast sind in Anhang D aufgeführt.

Sofern dieses statische Steuerungsmodul im Rahmen einer Steuerungsstrategie angewandt wird, ist als Ergebnis ein Set von statischen Routen definiert. Je nachdem welche Ausprägungen der weiteren Steuerungsmodule verwendet werden, kann auf die statische Routenbildung jedoch verzichtet oder die gebildete Reihenfolge der Route bzw. der festgelegte Fahrweg für eine Tour individuell übersteuert werden.

6.2.2 Zeitfenster

Die dynamischen Elemente der Routenzugsystemsteuerung werden durch das Auftreten eines Transportauftrags ausgelöst. Um die rechtzeitige Bereitstellung des Transportauftrags in der Produktion zu ermöglichen, werden früheste und späteste Bereitstellzeitpunkte für jeden Transportauftrag bestimmt.

Wie eingangs erläutert, entstehen die Transportaufträge in den Referenzszenarien dieser Arbeit durch den vollständigen Verbrauch des Materials von Bereitstellereinheiten. Beim Auftreten eines Transportbedarfs kann folglich bereits die nachzuversorgende Transporteinheit im Austausch gegen den Leergutladungsträger bereitgestellt werden. Der früheste Bereitstellzeitpunkt entspricht deshalb dem Nachfragezeitstempel des Transportauftrags.

Bei einer verspäteten Bereitstellung von Transporteinheiten droht hingegen die Gefahr eines Materialengpasses. Im Sinne einer robusten Produktionsversorgung dürfen Transportaufträge nicht so spät bereitgestellt werden, dass ein Engpass in der Produktion entsteht. Durch die Bestimmung einer spätesten Bereitstellzeit werden die Transportaufträge daher terminiert.

Eine Möglichkeit, Materialengpässe im Rahmen einer Steuerungsstrategie der Produktionsversorgung zu vermeiden, ist die Festlegung von maximalen Plan-Wiederbeschaffungszeiten für Transportbedarfe. Die Wiederbeschaffungszeit misst dabei den Zeitraum zwischen dem Auftreten des Transportbedarfs j zum Zeitpunkt OT_j und der vollständigen Bereitstellung der zugehörigen Transporteinheiten am Bedarfsort. Diese

Plan-Wiederbeschaffungszeit wird ebenso zur Auslegung der Kanban-Kreisläufe verwendet (vgl. [Kle-2015a]). Der späteste Bereitstellzeitpunkt LTA_j eines Transportauftrags j ergibt sich dann zu:

$$LTA_j = OT_j + WBZ_{j,max} \quad (6-1)$$

Die Schwierigkeit liegt in der Bestimmung der maximalen Soll-Wiederbeschaffungszeit $WBZ_{j,max}$. Durch eine Abwägung zwischen Versorgungsfrequenz und Bestand am Bereitstellort werden oft Planwerte für die Soll-Wiederbeschaffungszeit eines Transportauftrags angenommen. Um die Steuerung zu vereinfachen, werden des Weiteren häufig einheitliche maximale Wiederbeschaffungszeiten für alle Transportbedarfe verwendet. Da der maximale Linienbestand für die Materialien zur Produktionsversorgung bereits durch Planungsentscheidungen dimensioniert ist, gilt es im Rahmen einer robusten Steuerung mit den vorhandenen Ressourcen Materialengpässe zu vermeiden. Eine maximale Soll-Wiederbeschaffungszeit verwendet statische, oft mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagte Informationen. Dabei bleiben Effizienzpotentiale zur Reduktion des gesamten Umlaufbestands ungenutzt. Da die Transportbedarfe in den betrachteten Referenzsystemen jedoch durch Sensoren wahrgenommen und elektronisch verarbeitet werden, können in den Steuerungsstrategien dieser Arbeit späteste Bereitstellzeitpunkte verwendet werden, die den aktuellen Systemzustand berücksichtigen.

Im Sinne des JIT-Prinzips soll eine Transporteinheit möglichst zeitnah zu ihrem Verbrauch bereitgestellt werden. Der späteste Bereitstellzeitpunkt eines Transportauftrags hängt letztlich von der Bestandsreichweite des Materials in der Produktion ab. Diese wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Zum einen verlängert ein erhöhter Bestand am Bereitstellort und in der Zuführung die Bestandsreichweite des Materials in der Produktion, zum anderen führt der Verbrauch von Material am Klienten zu einer kontinuierlichen Abnahme der Bestandsreichweite.

Der Systemzusammenhang des Moduls zur Zeitfensterbestimmung in den Steuerungsstrategien dieser Arbeit ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Da der Steuerung keine deterministischen Transportaufträge für die Zukunft zur Verfügung stehen, können der Verbrauch der letzten Materialeinheit sowie der Zeitpunkt des nächsten Bedarfs nicht exakt im Voraus bestimmt werden. Deshalb werden die Zeitfenster in diesem Modul durch eine einseitige Worst-Case-Schätzheuristik bestimmt und beim Vorliegen neuer Informationen zum Systemzustand aktualisiert. Es genügt in diesem Zusammenhang die Zeitfenster anzupassen, bevor eine erneute Tourenbildung nach dem Auftreten eines neuen Transportauftrags erfolgt. Denn durch die Schätzheuristik werden die

spätesten Bereitstellzeitpunkte immer so geschätzt, dass kein Materialengpass eintritt, sofern die Zeitfenster eingehalten werden.

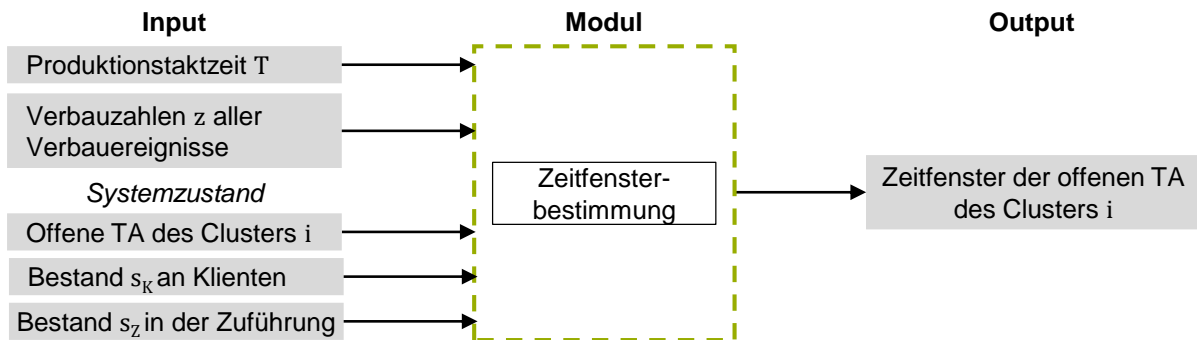


Abbildung 6-6: Systemzusammenhang des Moduls „Zeitfenster“

Neben dem Produktionstakt T und der Verbauzahl z der den Transportaufträgen am Klienten zugeordneten Materialnummern sind für die Zeitfensterbestimmung Informationen zum Systemzustand erforderlich. Diese sind zum einen die Materialbestände s_K an den Klienten und zum anderen die Bestände s_Z der Transporteinheiten, die sich aus den offenen Transportaufträgen derselben Materialnummer des Klienten ergeben. Dabei ist davon auszugehen, dass die Transportaufträge eines Materials für einen Klienten nach dem FIFO-Prinzip bereitgestellt werden.

Der Ablauf der Zeitfensterbestimmung für alle Transportaufträge (TA) eines Clusters i ist als Pseudocode in Abbildung 6-7 verdeutlicht.

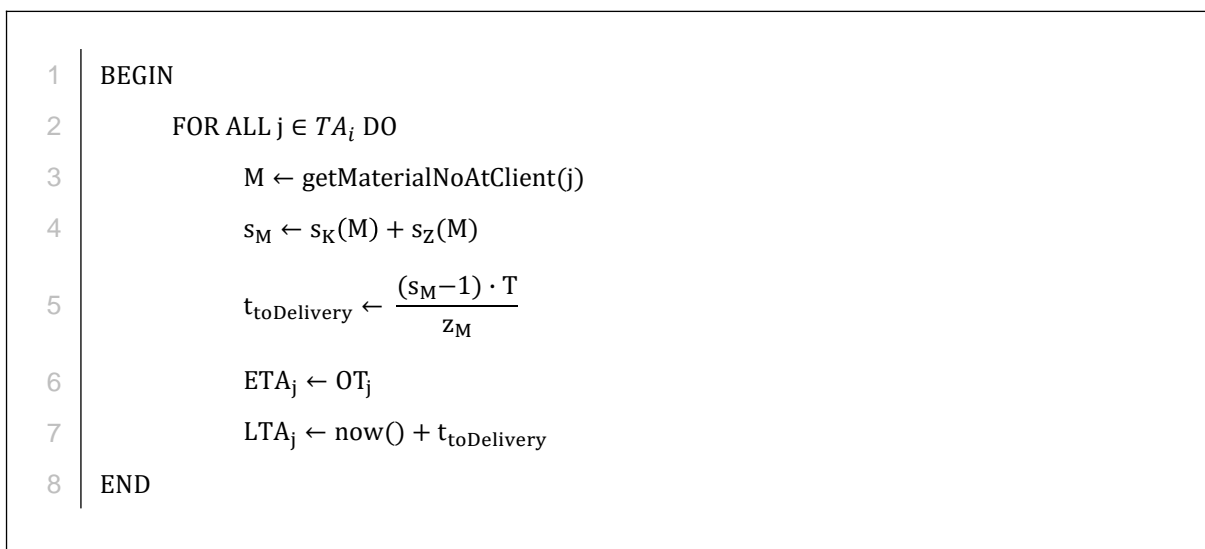


Abbildung 6-7: Pseudocode für den Ablauf der Zeitfensterbestimmung aller Transportaufträge eines Clusters

Nach dem Eingang eines neuen Transportauftrags werden die aktualisierten Zeitfenster für alle offenen Transportaufträge des zugehörigen Clusters aktualisiert. Dazu muss zunächst die einem Transportauftrag zugehörige Kombination M aus Materialnummer und Klienten gelesen werden. Aufgrund der durchgehenden elektronischen Erfassung der Materialverbräuche am Klienten sowie der Transportaufträge kann anschließend der für die Bestandsreichweite zu berücksichtigende Bestand s_M an Materialeinheiten ermittelt werden. Unter der Worst-Case Annahme, dass in jedem Produktionstakt die volle Verbauzahl z_M verbraucht wird, kann eine theoretische Bestandsreichweite ermittelt werden. Sofern M tatsächlich in jedem Takt verbaut wird ($r_V = 1$), entspricht die theoretische Bestandsreichweite der realen unter der Vernachlässigung von Ausschuss. Da am Klienten auch für einen spontanen Verbrauch jederzeit Material zur Verfügung stehen soll, wird in der Berechnung der spätesten Bereitstellzeit eine Materialeinheit vom zu berücksichtigenden Bestand abgezogen. Das Bereitstellzeitfenster eines Transportauftrags j ergibt sich dann aus der frühesten Bereitstellzeit ETA_j , die dem Zeitpunkt der Nachfrage des Transportauftrags OT_j entspricht, und der berechneten spätesten Bereitstellzeit LTA_j ausgehend vom Berechnungszeitpunkt.

Da bei jeder Aktualisierung der Zeitfenster genauere Informationen über den Restbestand vorhanden sind, wird die späteste Bereitstellzeit womöglich mit fortschreitender Wartezeit des Transportauftrags nach hinten, näher an die tatsächliche späteste Bereitstellzeit, geschoben. Auf diese Weise wird versucht, den Umlaufbestand im Routenzugsystem möglichst gering zu halten.

6.2.3 Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg

Beim Auftreten eines neuen Transportauftrags im Routenzugsystem oder der Rückkehr einer Transportressource nach dem Tourenende wird das Steuerungsmodul der dynamischen Touren- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung aktiviert. Es können zwei Ausprägungen dieses Moduls unterschieden werden. Einerseits werden die drei Steuerungsentscheidungen des Moduls auf Basis von Prioritätsregeln beinahe separat betrachtet. Andererseits wird eine integrierte Optimierung der Entscheidungsprobleme angestrebt.

Ausprägung: Prioritätsregeln

Eine sinnvolle Lösung der Entscheidungsprobleme dieses Moduls durch Prioritätsregeln erfordert, dass bereits statische Vorgaben für die Cluster- und Reihenfolgebildung getroffen wurden. *Meinhardt et al.* zeigen dies, indem vollkommen dynamische Touren auf Basis einer FIFO-Prioritätsregel gebildet werden. Die zusammengefassten Transportaufträge werden dann ebenfalls nach dem FIFO-Prinzip innerhalb der Tour bereitgestellt. Die Wegfindung erfolgt separat durch die Suche des kürzesten Weges

zwischen zwei Stopps. Durch die Analyse von Simulationsexperimenten, bei denen diese dynamische Steuerungsvariante mit festen und getakteten Routen verglichen werden, wird nachgewiesen, dass statische Strategien dieser dynamischen überlegen sind [Mei-2018]. Da die gebildeten Touren durch die alleinige zeitabhängige Prioritätsregel keinem optimierten Weg folgen, weshalb sehr ungünstige Touren entstehen können, erscheint die Schlussfolgerung von *Meinhardt et al.* logisch, und derartige Steuerungsvarianten werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Bei der Prioritätsregelsteuerung dieses Moduls gilt in dieser Arbeit deshalb der Systemzusammenhang nach Abbildung 6-8.

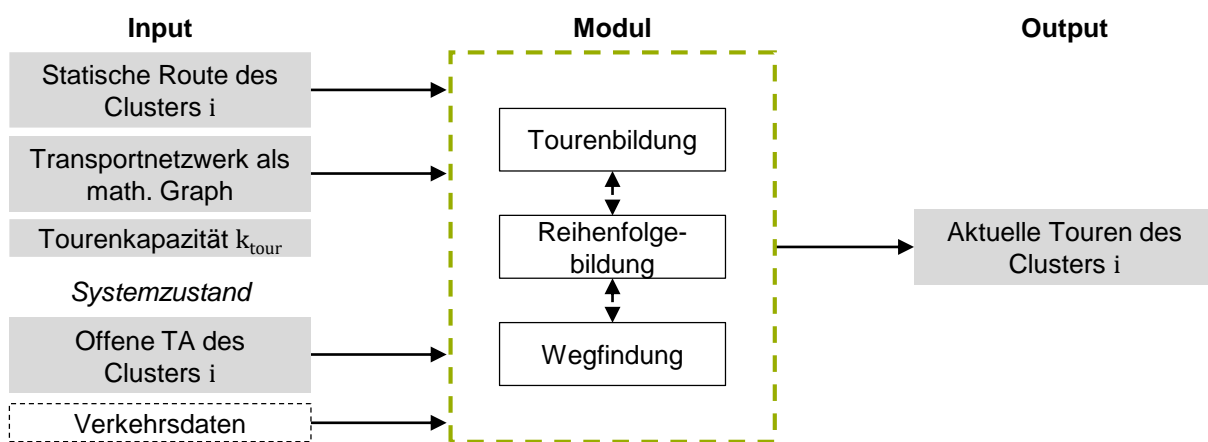


Abbildung 6-8: Systemzusammenhang der Modulausprägung „Prioritätsregeln“ des Moduls „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“

Wie erläutert, sind die statischen Routen als Eingangsparameter für diese Modulausprägung obligatorisch. Ausgehend vom Auftreten eines Transportauftrags werden alle offenen Transportaufträge desselben Clusters zu Touren zusammengefasst. Sofern das Modul durch einen wiederkehrenden Routenzug aktiviert wird, werden alle offenen Transportaufträge, die durch diesen Routenzug bearbeitet werden können, neu zu Touren zusammengefasst. Dies ist erforderlich, da die geplante Abfahrtszeit von zuvor bestimmten Touren möglicherweise überschritten wurde, sofern keine Transportressourcen verfügbar waren. Die Tourenbildung erfolgt nach einer Priorisierung der Transportaufträge unter der Berücksichtigung der Transportkapazität eines Routenzugs und den Zeitfenstern der Transportaufträge.

Klenk und Galka stellen für die Tourenbildung verschiedene Prioritätsregeln vor. Neben dem einfachsten Zuteilungsprinzip FIFO werden das Prinzip der spätesten Fälligkeit oder eines definierten Zeitfensters für die Fälligkeit der Bereitstellung aufgezählt [Kle-2019]. Daneben können weitere Prioritätsregeln, wie z. B. die Auswahl des Transportauftrags mit der frühestens Fälligkeit (EDLF), angewandt werden.

Da in der analysierten Literatur und den untersuchten Routenzugsystemen meist eine FIFO-Priorisierung vorgenommen wird (vgl. z. B. [Kle-2017]), werden die Transportaufträge bei der Tourenbildung im Rahmen dieser Merkmalsausprägung ebenfalls nach dem Auftragseingangszeitstempel OT priorisiert und nach Möglichkeit in Touren der Größe der Transportkapazität eines Routenzugs zusammengefasst. Die Abarbeitungsreihenfolge der Transportaufträge innerhalb einer Tour erfolgt jedoch nach der optimierten Reihenfolge der statisch gebildeten Routen. Hinsichtlich der Wegfindung können eine statische Variante, bei der exakt der durch die Route definierte Fahrweg zurückgelegt wird, und eine dynamische Variante unterschieden werden. Die dynamische Wegfindung ist dann sinnvoll, wenn der vordefinierte Routenpfad in der aktuellen Tour abgekürzt werden kann, da z. B. bestimmte statisch geplante Haltepunkte nicht in der Tour enthalten sind oder die aktuelle Verkehrssituation zu Blockaden auf der ursprünglichen Route führt. Soll die aktuelle Verkehrssituation berücksichtigt werden, sind Verkehrsdaten aus dem aktuellen Systemzustand erforderlich. Die Ausgestaltung der Wegfindung erfolgt analog der Algorithmik des Moduls *Intratour: Reihenfolge, Weg* in Abschnitt 6.2.6 und wird dort erläutert.

Trotz der statischen Vorgaben müssen die Ausgestaltung der Wegfindung und auch der Reihenfolgebildung innerhalb dieser Modulausprägung berücksichtigt werden, da beide Entscheidungsprobleme Einfluss darauf haben, ob die nach dem FIFO-Prinzip gebildeten Touren alle Zeitfenster der zugeordneten Transportaufträge einhalten können. Der Zusammenhang der Entscheidungen beim Modulablauf, ausgelöst durch einen Transportauftrag, ist im Flussdiagramm in Abbildung 6-9 verdeutlicht.

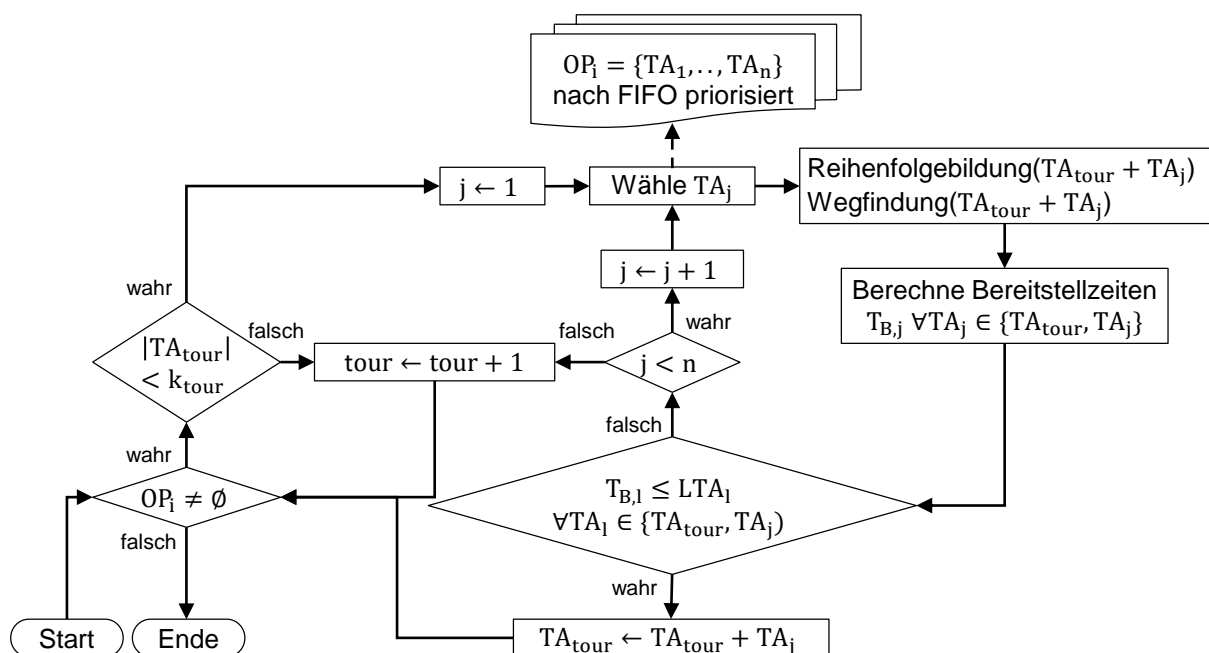


Abbildung 6-9: Zusammenhang der Touren- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung bei der Modulausprägung „Prioritätsregeln“

Der Ablauf startet durch das Eintreffen eines neuen Transportauftrags im Auftragspool OP_i des zugehörigen Clusters i . Solange sich Transportaufträge im Auftragspool befinden, wiederholt sich der Ablauf. Zunächst wird für die aktuelle Tour geprüft, ob noch Transportkapazität verfügbar ist. In dieser Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass ein Transportauftrag eine Transportkapazität von eins beansprucht (siehe Abschnitt 5.2.3). Ist die Anzahl der Transportaufträge auf einer Tour kleiner als deren Transportkapazität k_{Tour} , wird überprüft, ob weitere Transportaufträge unter Einhaltung der Restriktionen zur Tour hinzugefügt werden können. Falls nicht, wird eine neue Tour gebildet. Für das Hinzufügen von Transportaufträgen zu einer Tour werden diese im Auftragspool OP_i nach dem FIFO-Prinzip priorisiert. Der Reihe nach wird für jeden darin noch enthaltenen Transportauftrag TA_j geprüft, ob sich durch das Hinzufügen zur Tour und die anschließende Reihenfolgebildung und Wegfindung der erweiterten Tour die geplanten Bereitstellzeitpunkte der Transportaufträge TA_l der erweiterten Tour innerhalb der zugehörigen Zeitfenster befinden. Falls ja, wird TA_j zur Tour hinzugefügt, und der Ablauf beginnt von vorne. Falls nein, wird der nächste TA_j im OP_i ausgewählt und überprüft. Gibt es keine TA_j im OP_i , die der aktuellen Tour hinzugefügt werden können, wird eine neue Tour eröffnet.

Die Problematik beim Hinzufügen von Transportaufträgen zu bestehenden Touren ist in Abbildung 6-10 veranschaulicht. In der bestehenden Tour wird ein Transportauftrag TA_1 an der Materialflussquelle Q in der Zeit t_{Q1} auf den Routenzug geladen. Die anschließende Fahrtzeit zum Haltepunkt des dem Transportauftrag TA_1 zugehörigen Klienten beträgt $t_{F,Q \rightarrow 1}$. Für die Bereitstellung zwischen Haltepunkt und Klienten benötigt der Routenzugfahrer eine Zeitspanne von t_{E1} . Damit wird der Transportauftrag TA_1 durch die bestehende Tour innerhalb seines Bereitstellzeitfensters abgeschlossen.

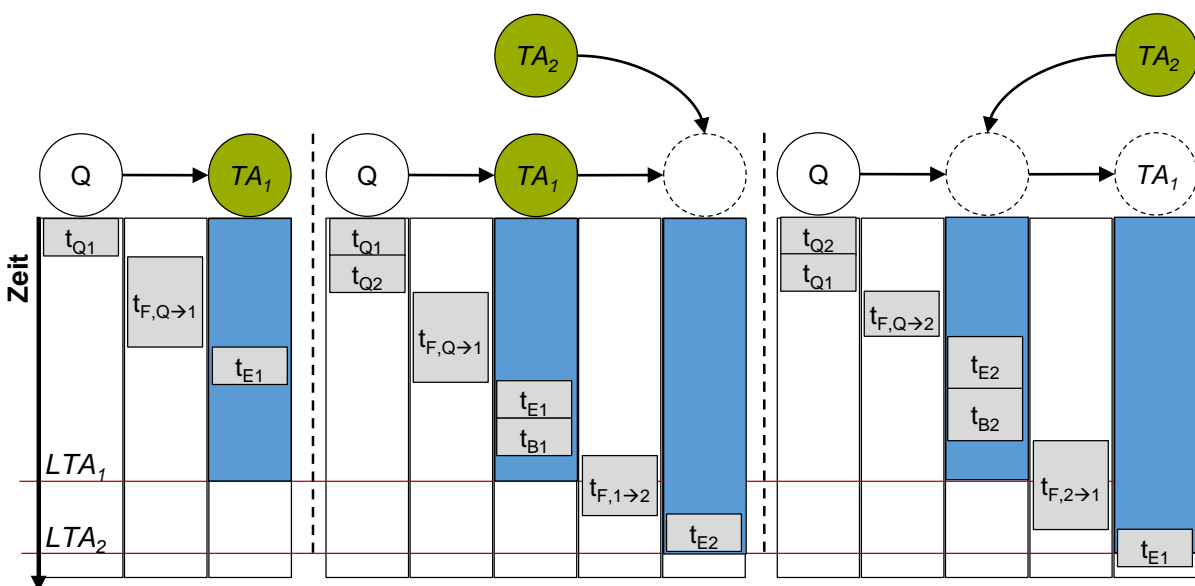


Abbildung 6-10: Einfluss eines zusätzlichen Transportauftrags auf die Bereitstellungszeiten der Tour

Durch das Hinzufügen eines weiteren Transportauftrags TA_2 zur bestehenden Tour verlängert sich zunächst die Beladezeit des Routenzugs an der Quelle um t_{Q2} . Dadurch verschiebt sich die Bereitstellzeit von TA_1 um eben diese Zeitspanne.

Wird TA_2 nach TA_1 ausgeliefert, müssen zur Berechnung dessen Bereitstellzeit noch die Aufnahme des Leerguts am ersten Klienten sowie die Fahrtzeit zwischen Klienten eins und zwei berücksichtigt werden. Zudem wäre es möglich, dass sich die Fahrtzeit von der Quelle zum ersten Klienten sowie die Entladezeit am Klienten ändern, falls die Gesamtkosten der neuen Tour geringer wären. Dies gilt, sofern der zugehörige Haltepunkt auf der anderen Fahrspur angefahren wird. Im Beispiel erfolgt die Bereitstellung der beiden Transportaufträge innerhalb der jeweiligen Zeitfenster, und das Hinzufügen von TA_2 zur bestehenden Tour ist möglich.

Soll jedoch zuerst TA_2 abgeliefert werden, ändern sich die Fahrwege der Tour und damit auch die Fahrtzeiten. Ebenso ändern sich im Beispiel die Ent- und Beladezeiten am Klienten, da der Haltepunkt an der weiter entfernten Fahrspur angefahren wird. Während TA_2 innerhalb seines Zeitfensters bereitgestellt wird, erfolgt die Auslieferung von TA_1 zu spät. Ein Hinzufügen von TA_2 an dieser Stelle der Tour ist nicht erlaubt.

Ausprägung: Integrierte Optimierung

Neben der Tourenbildung nach Prioritätsregeln auf der Basis statisch geplanter Routen können die Entscheidungsprobleme dieses Moduls als integriertes Optimierungsproblem betrachtet werden. Die Problemstellung entspricht dann dem VRPTW (siehe Abschnitt 3.2.2). Der Systemzusammenhang des Moduls ist in Abbildung 6-11 verdeutlicht.

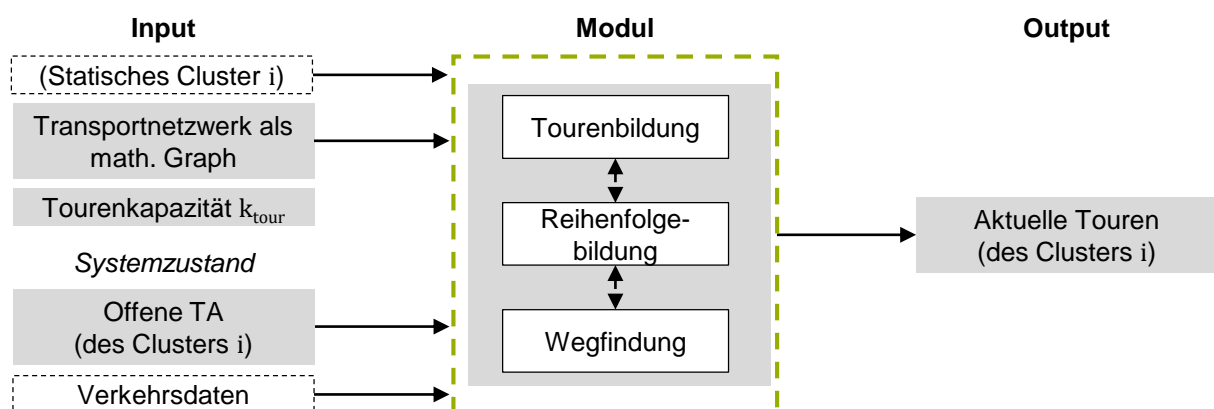


Abbildung 6-11: Systemzusammenhang der Modulausprägung „Integrierte Optimierung“ des Moduls „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“

Diese Modulausprägung ist sowohl mit als auch ohne eine zuvor erfolgte statische Clusterbildung im Rahmen einer Steuerungsstrategie anwendbar. Die Optimierung

erfolgt entweder global mit allen offenen Transportaufträgen im System oder lokal auf ein Cluster beschränkt. Als weitere Eingangsinformationen sind neben dem optionalen Cluster und den zugehörigen Transportaufträgen sowie der Tourenkapazität, das Transportnetzwerk und je nach Wegfindungsstrategie Verkehrsdaten erforderlich. Die Möglichkeiten der Gestaltung der Wegfindung werden im Detail in Abschnitt 6.2.6 erläutert.

Falls ein statisches Cluster als Grundlage für dieses Modul verwendet wird, schränkt sich zwar der Betrachtungsraum für die Optimierung ein, der Ablauf zur Lösungsfindung ändert sich jedoch nicht. Wie in Abschnitt 3.2.2 aufgezeigt, gibt es unterschiedliche Verfahren zur Lösung des VRPTW. Aufgrund der Lösungskomplexität der Problemstellung sowie der Anforderung nach im dynamischen Systembetrieb akzeptablen Rechenzeiten wird in dieser Arbeit ein Näherungsverfahren verwendet. Der Stand der Wissenschaft zeigt, dass für das Lösen eines VRPTW unter den Rahmenbedingungen eines Routenzugsystems die Metaheuristik des Ameisenalgorithmus sowohl hinsichtlich Lösungsqualität als auch Rechenzeit die besten Ergebnisse im Vergleich zu anderen Metaheuristiken erzielt (siehe Abbildung 3-3, S. 49). Analog zu *Teschemacher* (vgl. [Tes-2019]) wird in dieser Arbeit zur Lösung des VRPTW im Rahmen der dynamischen Touren- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung eines Routenzugsystems ein MACS nach *Gambardella et al.* verwendet. Dadurch sind eine gleichzeitige heuristische Minimierung der notwendigen Touren und der gesamten Fahrtkosten aller Touren mit mehreren Ameisenkolonien möglich (vgl. [Gam-1999]).

Das MACS für die Lösung des VRPTW basiert auf dem Ameisenalgorithmus von *Coloni et al.* und *Dorigo et al.*. Das naturanaloge Verfahren bildet die Pheromonspuren von Ameisenkolonien bei der Futtersuche nach. Erfolgreiche Wege werden mit einer Duftspur versehen und zukünftig mit einer höheren Wahrscheinlichkeit gewählt. Je öfter ein erfolgreicher Weg gewählt wird, desto höher wird dessen Wahrscheinlichkeit, erneut gewählt zu werden. Mit fortschreitender Zeit verdunsten jedoch die Pheromone auf einem Weg. Durch die Verdunstung wird vermieden, dass die Lösungssuche nach dem globalen Optimum in lokalen Optima hängen bleibt (vgl. [Col-1991; Dor-1991]).

Im Folgenden werden der grundsätzliche Algorithmus sowie die durchgeführten Abwandlungen und Erweiterungen erläutert. Insbesondere wird auf die Unterschiede zum Algorithmus von *Teschemacher* (vgl. [Tes-2019]) eingegangen.

Eine Übersicht des schematischen Ablaufs der integrierten Optimierung mittels MACS angelehnt an *Gambardella et al.* (vgl. [Gam-1999]) ist im Flussdiagramm in Abbildung 6-12 dargestellt.

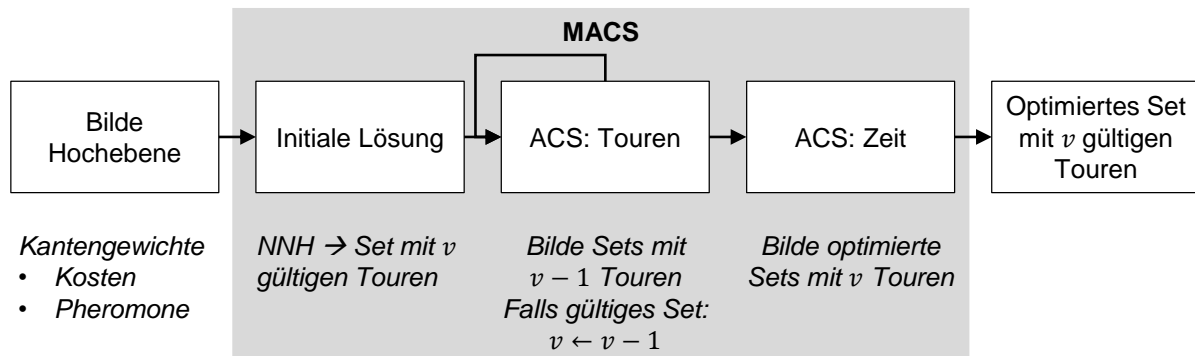


Abbildung 6-12: Schematischer Ablauf der Modulausprägung „Integrierte Optimierung“ mittels MACS

Nach der Aktivierung des Moduls wird auf der Grundlage der offenen Transportaufträge die Hochebene des Transportnetzwerks (siehe Abschnitt 5.2.1) durch Anwendung des Dijkstra-Algorithmus (siehe Abschnitt 3.2.1) gebildet. Im Gegensatz zu den bisherigen Hochebenen werden die Kantengewichte jedoch nicht nur mit den Kosten, die sich aus Fahrtzeiten und Verkehrsdaten zusammensetzen, sondern zusätzlich mit den Pheromonspuren der Ameisenkolonien, die die Wahrscheinlichkeit einer Kantewahl beeinflussen, versehen. Diese Pheromonspuren entwickeln sich durch Verstärkung und Verdunstung während einer Lösungssuche. Die Fahrtzeiten werden im Gegensatz zur Arbeit von *Teschmacher* (vgl. [Tes-2019, S. 71]) über das Verhältnis von Fahrtstrecke zur Routenzuggeschwindigkeit bestimmt (siehe Abschnitt 5.2.1).

Anschließend wird eine initiale Lösung für ein Set von v Touren unter Einhaltung der Kapazitäts- und Zeitfensterrestriktionen mittels eines NNH-Algorithmus gefunden. Auf dieser Basis beginnen in den Algorithmen von *Gambardella et al.* (vgl. [Gam-1999]) und *Teschmacher* (vgl. [Tes-2019]) zwei Ameisenkolonien mit der parallelen Lösungssuche. Aufgrund der Eigenschaften des ereignisdiskreten Simulationsprogramms, das zur Evaluation der Strategien im Zusammenhang mit den Referenzszenarien (siehe Abschnitt 7.1) eingesetzt wird, werden die beiden Ameisenkolonien in dieser Arbeit in sequentieller Folge betrachtet. Dadurch verlängert sich die Rechenzeit im Vergleich zu einer parallelen Lösungssuche. Eine Beeinträchtigung der Lösungsqualität wird dadurch jedoch nicht erwartet. Die erste Ameisenkolonie *ACS: Touren* sucht unter Einhaltung der Restriktionen so lange nach einer neuen optimalen Lösung mit $v - 1$ Touren, bis keine gültige Lösung gefunden wird oder bestimmte Grenzwerte erreicht werden. Im Anschluss sucht die zweite Ameisenkolonie *ACS: Zeit* nach einer optimierten Lösung mit dem von *ACS: Touren* gefundenen minimalen v , indem die gesamten Kosten des Tourensets minimiert werden. Die Optimierung läuft bis zum Erreichen von Grenzwerten hinsichtlich einer maximalen Wiederholungszahl bzw. Rechenzeit.

Als Ergebnis der integrierten Optimierung ergibt sich ein lokal optimiertes Set von ν gültigen Touren für den aktuellen Systemzustand. Da ein heuristisches Lösungsverfahren angewandt wird, kann kein globales Optimum garantiert werden.

Im Folgenden wird die konkrete Ausgestaltung der Algorithmen des MACS in dieser Arbeit, angelehnt an *Gambardella et al.* (vgl. [Gam-1999]), erläutert. Die initiale Lösung für das MACS wird durch einen NNH-Algorithmus erzeugt. Dieser ist in Abbildung 6-13 als Pseudocode beschrieben. Zur Erstellung des Tourensets S_{tour} werden alle Transportaufträge TA des aktuellen Betrachtungsumfangs auf gültige Touren verteilt.

```

1  BEGIN
2      WHILE TA ≠ ∅ DO
3          TAtour ← TA.extract (rnd)
4          j ← 0
5          WHILE j ≤ |TA| AND |TAtour| ≤ kTour DO
6              j ← j + 1
7              currentOrder ← TA.findNearestNeighbor(tour,H,j)
8              FOR ALL TAl ∈ {TATour, currentOrder} DO
9                  calculate TB,l
10                 IF TB,l > LTAl GOTO line 5
11                 TAtour ← TAtour + TA.extract (currentOrder)
12             Stour ← Stour + tour
13             tour ← tour + 1
14  END

```

Abbildung 6-13: Pseudocode des NNH-Algorithmus zur Bildung einer initialen Lösung für das MACS

Beim Start einer neuen Tour wird zunächst ein zufälliger Transportauftrag ausgewählt und zugeteilt. Solange die Tourenkapazität k_{tour} nicht erreicht wurde und noch nicht alle offenen TA überprüft wurden, werden der Reihe nach die nächsten Nachbarn der aktuellen Tour auf der Hochebene ausgewählt. Damit der ausgewählte TA der Tour hinzugefügt werden kann, dürfen durch das Hinzufügen am Ende der Tour keine Zeitfensterrestriktionen aller TA_l auf der Tour verletzt werden. Dazu werden die jeweiligen Bereitstellzeitpunkte $T_{B,l}$ mit den spätesten Bereitstellzeiten LTA_l abgeglichen. Wird ein Zeitfenster eines Transportauftrags auf der Tour verletzt, darf der neue Transportauftrag nicht an die Tour angehängt werden, und es wird der folgende nächste Nachbar gesucht und überprüft. Falls möglich, wird ein Transportauftrag an eine Tour

angehängt. Dadurch ergeben sich wiederum neue nächste Nachbarn der Tour. Ist die maximale Transportkapazität einer Tour erreicht oder es existiert kein weiterer Transportauftrag, der der Tour hinzugefügt werden darf, wird eine neue Tour eröffnet, falls noch weitere Transportaufträge zuzuteilen sind.

Die NNH-Lösung S_{tour} mit v gültigen Touren wird als initiale Lösung der ACS: *Touren* verwendet. Im Rahmen der Ameisenkolonien wird zwischen globalen und lokalen Lösungen unterschieden. Eine globale Lösung stellt jedoch nur ein lokales und kein globales Optimum der VRPTW-Lösung dar. In dieser Ameisenkolonie wird eine gültige Lösung des VRPTW mit $v - 1$ Touren gesucht (siehe Pseudocode in Abbildung 6-14). Wird eine solche Lösung gefunden, wird die Kolonie erneut mit dem optimierten Set mit $v - 1$ Touren als Initiallösung aufgerufen (vgl. [Gam-1999]).

Die Anzahl der Touren einer gültigen Lösung kann maximal auf das aufgerundete Verhältnis von Anzahl der Transportaufträge $|TA|$ zu Tourenkapazität k_{tour} reduziert werden. Beträgt z. B. $k_{tour} = 4$ und es sollen sieben Transportaufträge zu Touren zusammengefasst werden, können nicht weniger als zwei gültige Touren gebildet werden. Zudem wird für die Optimierung der Tourenanzahl innerhalb einer Lösung eine maximale Rechenzeit CT_{max} vorgegeben. Beim Start eines Durchlaufs darf diese nicht überschritten sein.

Sind beide Kriterien erfüllt, wird zunächst eine initiale, lokale NNH-Lösung $S_{tour,local}$ mit dem reduzierten v erzeugt. Im Gegensatz zum in Abbildung 6-13 auf S. 128 beschriebenen Algorithmus müssen hierbei nicht alle Transportaufträge der lokalen Lösung zugeteilt werden. Die Kapazitäts- und Zeitfensterrestriktionen sind jedoch einzuhalten. Diese Lösung dient der Initialisierung der Pheromonspuren der Hochebene. Dazu wird jede Kante der Hochebene mit der Pheromonspur τ_0 nach Formel (6-2) initialisiert (vgl. [Gam-1999]):

$$\tau_0 = \frac{1}{|TA(S_{tour,local})| \cdot c(S_{tour,local})} \quad (6-2)$$

Die initialen Pheromonspuren werden folglich von der Anzahl der in der lokalen Lösung zugeteilten Transportaufträge sowie der Gesamtkosten der lokalen Lösung beeinflusst. Je mehr Transportaufträge initial zugeteilt wurden und je kostenintensiver die Lösung, desto geringer sind die anfänglichen Pheromonspuren. Beide Einflussfaktoren bedingen sich jedoch auch wechselseitig (vgl. [Gam-1999]).

```

1 BEGIN
2    $S_{tour,global} \leftarrow S_{tour}$  /*initiale globale Lösung*/
3    $v \leftarrow v - 1$ 
4   WHILE  $v \geq \left\lceil \frac{|TA|}{k_{tour}} \right\rceil$  AND  $CT \leq CT_{max}$  DO
5      $S_{tour,local} \leftarrow NNH(v)$  /*Bilde eine NNH Lösung mit v Touren. Nicht alle TA müssen
6       zugeteilt werden.*/
7     initPheromons( $S_{tour,local}$ )
8     IF  $|TA(S_{tour,local})| = |TA(S_{tour,global})|$  DO /*gültige lokale Lösung*/
9        $S_{tour,global} \leftarrow S_{tour,local}$  /*neue globale Lösung*/
10      updatePheromons( $S_{tour,local}$ ,  $S_{tour,global}$ )
11      GOTO line 3
12    RESET bonus
13    FOR  $n \leftarrow 1$  TO  $p\_iterations$  DO
14      FOR  $m \leftarrow 1$  TO  $p\_ants$  DO
15         $S_{ant,m} \leftarrow activateAnt(k_{tour}, v)$ 
16        IF  $|TA(S_{ant,m})| > |TA(S_{tour,local})|$  DO
17           $S_{tour,local} \leftarrow S_{ant,m}$ 
18        ELSEIF  $|TA(S_{ant,m})| = |TA(S_{tour,local})|$  DO
19          IF  $c(S_{ant,m}) < c(S_{tour,local})$  DO
20             $S_{tour,local} \leftarrow S_{ant,m}$ 
21          RESET bonus
22          IF  $|TA(S_{tour,local})| = |TA(S_{tour,global})|$  DO /*gültige lokale Lösung*/
23             $S_{tour,global} \leftarrow S_{tour,local}$  /*neues globale Lösung*/
24            updatePheromons( $S_{tour,local}$ ,  $S_{tour,global}$ )
25            GOTO line 3
26          updatePheromons( $S_{tour,local}$ ,  $S_{tour,global}$ )
27  END

```

Abbildung 6-14: Pseudocode der ACS: Touren zur Minimierung der notwendigen Touren

Enthält $S_{tour,local}$ alle zuzuteilenden Transportaufträge, ist also eine gültige Lösung, wird die globale Lösung $S_{tour,global}$ mit der lokalen Lösung überschrieben, und die Pheromonspuren werden sowohl mit $S_{tour,global}$ als auch $S_{tour,local}$ aktualisiert (vgl. [Gam-1999]). Diese Aktualisierung bildet die natürliche Entwicklung der Pheromonspuren nach, indem einerseits die Verminderung der Duftstoffe mit dem Verdunstungsfaktor $f_{Verdunstung} = \rho$ und andererseits eine Verstärkung der Spur aufgrund der Wegwahl der Ameisen durch zusätzliche Pheromone τ berücksichtigt werden. Die

Verstärkung der Pheromonspur ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtkosten des aktuellen Tourensets S_{tour} nach Formel (6-3) (vgl. [Dor-1997]):

$$\tau = \frac{1}{c(S_{tour})} \quad (6-3)$$

Der Verdunstungsfaktor ρ ist ein vorzugebender Parameter. Die Pheromonspuren $\tau_{(i,j)}$ aller Kanten (i,j) , die im Tourenset S_{tour} enthalten sind, werden schließlich nach Formel (6-4) aktualisiert (vgl. [Dor-1997]):

$$\tau_{(i,j)} = (1 - f_{Verdunstung}) \cdot \tau_{(i,j)} + f_{Verdunstung} \cdot \tau \quad (6-4)$$

Nach der Aktualisierung der Pheromonspuren wird die Ameisenkolonie mit reduziertem v erneut gestartet. Liefert der NNH-Algorithmus mit reduzierter Tourenanzahl keine gültige Lösung, erfolgt eine iterative Lösungssuche für das reduzierte v durch mehrere Ameisen. Die Anzahl der Ameisen p_ants sowie der Iterationen $p_iterations$ sind Eingabeparameter für das MACS. Jede Ameise erzeugt nach ihrer Aktivierung ein Set von v Touren $S_{ant,m}$ unter der Berücksichtigung der Kapazitäts- und Zeitfensterrestriktionen. Analog zur initialen NNH-Lösung innerhalb der Ameisenkolonie können in einer Lösung $S_{ant,m}$ nicht alle zu verplanenden Transportaufträge enthalten sein. $S_{ant,m}$ ersetzt die aktuelle lokale Lösung $S_{tour,local}$, falls sie mehr Transportaufträge enthält. Sind in beiden Lösungen gleich viele Transportaufträge integriert, werden die Gesamtkosten der jeweils enthaltenen Touren bestimmt und miteinander verglichen. Die günstigere Lösung wird als aktuelle lokale Lösung $S_{tour,local}$ gespeichert. Ist diese lokale Lösung zudem gültig, indem alle Transportaufträge darin enthalten sind, wird die globale Lösung überschrieben, die Pheromonspuren aktualisiert und die Ameisenkolonie mit reduziertem v erneut gestartet. Sollte innerhalb einer Iteration keine Ameise eine globale Lösung finden, werden die Pheromonspuren am Ende der Iteration dennoch mit den bestehenden besten Lösungen aktualisiert (vgl. [Gam-1999]).

Der Pseudocode in Abbildung 6-14 auf S. 130 enthält in den Zeilen 11 und 20 des Weiteren ein Zurücksetzen des Bonus, der für Transportaufträge vergeben wird, die nicht in Ameisenlösungen berücksichtigt wurden. Durch den Bonus wird bei der nächsten Lösungsfindung die Wahrscheinlichkeit erhöht, diesen Transportauftrag im Tourenset zu integrieren. Dieser Prozess wird bei der Aktivierung der Ameisen beschrieben.

Nachdem die Anzahl der Touren innerhalb der gültigen Lösung $S_{tour,global}$ iterativ reduziert und entweder keine Verbesserung erzielt oder die maximale Rechenzeit überschritten wurde, folgt die zweite Ameisenkolonie *ACS: Zeit*. Diese Kolonie versucht die Gesamtkosten der globalen Lösung $S_{tour,global}$ unter Beibehaltung der Tourenanzahl v iterativ zu reduzieren (vgl. [Gam-1999]). Der Ablauf des Algorithmus ist im Pseudocode in Abbildung 6-15 beschrieben.

```

1  BEGIN
2       $S_{tour,local} \leftarrow S_{tour,global}$ 
3       $v \leftarrow |S_{tour,global}|$ 
4      initPheromons( $S_{tour,local}$ )
5      RESET bonus
6      FOR n  $\leftarrow$  1 TO p_iterations AND WHILE  $CT \leq CT_{max}$  DO
7          FOR m  $\leftarrow$  1 TO p_ants DO
8              activateAnt( $k_{tour}$ , false, v)
9              IF  $|TA(S_{ant,m})| = |TA(S_{tour,local})|$  AND  $c(S_{ant,m}) < c(S_{tour,local})$  DO
10                  $S_{tour,local} \leftarrow S_{ant,m}$ 
11                  $S_{tour,global} \leftarrow S_{ant,m}$ 
12             updatePheromons( $S_{tour,global}$ )
13  END

```

Abbildung 6-15: Pseudocode der ACS: Zeit zur Minimierung der Gesamtkosten des Tourensets

Auch in dieser Ameisenkolonie werden die Pheromonspuren analog dem oben beschriebenen Verfahren initialisiert. Anschließend wird der Bonus für nicht berücksichtigte Transportaufträge zurückgesetzt und die iterative Lösungssuche gestartet, bis entweder die maximale Anzahl an Iteration $p_iterations$ oder die maximale Rechenzeit CT_{max} überschritten ist. In jeder Iteration wird für jede der p_ants Ameisen eine Lösung für ein Tourenset $S_{ant,m}$ erzeugt. Enthält die Lösung der Ameise m alle zuzuteilenden Transportaufträge und sind die Gesamtkosten geringer als die Gesamtkosten des bisherigen Optimums, werden die lokale Lösung $S_{tour,local}$ und die globale Lösung $S_{tour,global}$ mit der Ameisenlösung $S_{ant,m}$ überschrieben und die Pheromonspuren aktualisiert. Im Rahmen der zweiten Ameisenkolonie erfolgt nur eine einmalige Pheromonaktualisierung zum Ende einer Iteration (vgl. [Gam-1999]).

Bestandteil beider Ameisenkolonien ist die Aktivierung der Ameisen (siehe Pseudocode in Abbildung 6-16). Dabei wird zunächst eine Lösung des VRPTW $S_{ant,m}$ mit v

Touren unter der Berücksichtigung der Kapazitäts- und Zeitfensterrestriktionen erzeugt. Jedoch müssen nicht alle Transportaufträge im gebildeten Tourenset enthalten sein (vgl. [Gam-1999]).

```

1  BEGIN
2     $S_{ant,m} \leftarrow ACS\_VRPTW(v,m)$  /*Bilde eine Set mit v Touren für Ameise m. Nicht alle TA
      müssen enthalten sein.*/
      Falls von ACS: Touren aufgerufen
3a  FOR ALL  $TA_i \notin S_{ant,m}$  DO
4a     $bonus(TA_i) = bonus(TA_i) + 1$  /*Bonuspunkte für nicht verplante TA*/
      Falls von ACS: Zeit aufgerufen
3b  IF  $|TA(S_{ant,m})| = |TA(S_{tour,global})|$  DO
4b     $S_{ant,m} \leftarrow k-opt(S_{ant,m})$ 
5    updatePheromons( $S_{ant,m}$ ) /*lokales Update*/
6  END

```

Abbildung 6-16: Pseudocode der Aktivierung einer Ameise zur Bestimmung eines Sets mit v Touren

Wurde eine Ameise durch die erste Ameisenkolonie *ACS: Touren* aktiviert, wird für jeden Transportauftrag, der nicht in der Lösung $S_{ant,m}$ enthalten ist, ein Bonus vergeben. Damit wird die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Transportauftrag bei der nächsten Tourenbildung integriert ist, erhöht (vgl. [Gam-1999]).

Falls die Ameise von der zweiten Ameisenkolonie *ACS: Zeit* aktiviert wurde, findet, sofern $S_{ant,m}$ eine gültige Lösung darstellt, eine lokale Optimierung der im Tourenset enthaltenen Touren statt (vgl. [Gam-1999]). Dabei ändert sich die Zuordnung der Transportaufträge zu Touren nicht, die Reihenfolge der Transportaufträge innerhalb einer Tour wird jedoch variiert, um die Gesamtkosten einer Tour zu minimieren. Die lokale Optimierung erfolgt ebenfalls unter der Berücksichtigung der Kapazitäts- und Zeitfensterrestriktionen. In dieser Arbeit werden dazu lokale k-opt Austauschverfahren mit $k \in \{2,3\}$ (siehe Abschnitt 3.2.3) untersucht.

Nachdem die Lösung einer Ameise $S_{ant,m}$ bestimmt wurde, erfolgt eine Aktualisierung der Pheromonspuren. Das Aktualisierungsprinzip folgt dem beschriebenen Vorgehen. Jedoch werden als Verdunstungsfaktor ein vorzuzugewählter Parameter $f_{Verdunstung} = \xi$ und als zusätzliche Pheromonspur $\tau = \tau_0$ verwendet (vgl. [Dor-2005]).

Die Lösung des VRPTW einer Ameise folgt dem Ablauf im Pseudocode in Abbildung 6-17. Solange Transportaufträge zugeteilt werden können und solange nicht die maximale Tourenanzahl v überschritten wird, werden iterativ Transportaufträge zu Touren zusammengefasst. Dabei darf die maximale Transportkapazität einer Tour k_{tour} nicht übertroffen werden. Zudem müssen noch Transportaufträge verfügbar sein, die unter Einhaltung aller Zeitfensterrestriktionen der aktuellen Tour hinzugefügt werden können.

```

1 BEGIN
2   WHILE TA ≠ ∅ AND |Stour| ≤ v DO
3     WHILE |TAtour| < ktour AND TApossible ≠ ∅ DO
4       FOR ALL TAj ∈ TApossible
5          $\eta_{(i,j)} \leftarrow \frac{1}{(c_{(i,j)} + t_{E,j}) \cdot (LTA_j - T_{B,j}) - \text{bonus}(TA_j)}$  /*Attraktivität einer Kante*/
6          $p_{(i,j)} = \frac{|\tau_{(i,j)}^\alpha \cdot \eta_{(i,j)}^\beta|}{\sum_{TA_{\text{possible}}} |\tau_{(i,j)}^\alpha \cdot \eta_{(i,j)}^\beta|}$  /*Wahrscheinlichkeit einer Kante*/
7         p ← z_gleich(0,1)
8         IF p ≤ q0 DO /*Exploitation*/
9           nextOrder ← max(p(i,j))
10        ELSE /*Exploration*/
11          nextOrder ← z_demp(p(i,j))
12        TA.extract (nextOrder)
13        TAtour ← TAtour + nextOrder
14        Stour ← Stour + tour
15        tour ← tour + 1
16 END

```

Abbildung 6-17: Pseudocode zum Finden einer Ameisenlösung für das VRPTW (ACS_VRPTW)

Ist dies der Fall, wird für jede mögliche Kante auf der Hochebene zwischen dem Transportauftrag TA_j und dem letzten Transportauftrag der aktuellen Tour TA_i eine Attraktivität $\eta_{(i,j)}$, auch heuristische Information genannt, bestimmt (vgl. [Dor-2005]). Diese wird in dieser Arbeit in Anlehnung an *Tan et al.* und *Donati et al.* zum einen durch die zusätzlichen Kosten bis zur Bereitstellung des neuen Auftrags TA_j beeinflusst, die sich aus den Kantenkosten $c_{(i,j)}$ und der Bereitstellungszeit $t_{E,j}$ des Auftrags zusammensetzen. Diese zusätzlichen Kosten werden mit dem Puffer zwischen Bereitstellungszeitpunkt $T_{B,j}$ und spätester Bereitstellungszeit LTA_j von TA_j multipliziert. Je näher der Bereitstellungszeitpunkt $T_{B,j}$ an der spätesten Bereitstellungszeit LTA_j ist und je geringer die zusätzlichen

Kosten sind, desto höher ist die Attraktivität $\eta_{(i,j)}$ einer Kante (i,j) . Zum anderen wird der Bonus der Transportaufträge berücksichtigt, den diese erhalten, falls sie bei vorangehenden Lösungen nicht integriert wurden (vgl. [Tan-2006; Don-2008]). *Teschemacher* verwendet als heuristische Information dagegen eine Summe aus Fahrt-, Warte- und Servicezeit, die beim Bereitstellen des jeweiligen Transportauftrags benötigt wird. Zudem wird der Bonus für nicht berücksichtigte Transportaufträge zu dieser Summe addiert, wodurch deren Integration in folgende Touren unwahrscheinlicher wird (vgl. [Tes-2019, S. 92/ 104]).

Aus der Attraktivität $\eta_{(i,j)}$ und der Pheromonspur $\tau_{(i,j)}$ wird schließlich eine Wahrscheinlichkeit $p_{(i,j)}$ bestimmt, mit der die Kante (i,j) als Nachfolgekante in der aktuellen Tour gewählt werden kann. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit wird die Attraktivität $\eta_{(i,j)}$ mit dem Parameter α und die Pheromonspur $\tau_{(i,j)}$ mit dem Parameter β nach der Formel in Zeile 6 des Pseudocodes in Abbildung 6-17 gewichtet (vgl. [Col-1991; Dor-1991]). Beide Parameter müssen vorgegeben werden. Um die Lösungsvielfalt zu erhöhen und das Festfahren in lokalen Optima zu vermeiden, wird die Wahl einer Nachfolgekante von der Zufallszahl p abhängig gemacht. Ist diese kleiner gleich einem vorzugebenden Parameter q_0 , wird die Kante mit der höchsten Wahrscheinlichkeit $p_{(i,j)}$ als Nachfolger ausgewählt (Exploitation). Anderenfalls wird der Nachfolger durch eine zufällige Auswahl aus einer diskreten empirischen Verteilung auf Basis der Wahrscheinlichkeiten $p_{(i,j)}$ gewählt (Exploration) (vgl. [Dor-1997]).

Der zur ausgewählten Kante zugehörige Transportauftrag TA_j wird der Tour hinzugefügt und aus dem Auftragspool entnommen. Können einer Tour keine weiteren Aufträge zugeordnet werden, wird die Tour geschlossen und dem Lösungssatz S_{tour} hinzugefügt. Anschließend wird eine neue Tour eröffnet.

Wie erläutert, wird die Lösung des MACS von mehreren vorzugebenden Parametern beeinflusst (siehe Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Parameter zur Kalibrierung des MACS

Parameter	Bedeutung
p_iterations	Iterationen innerhalb einer Ameisenkolonie
p_ants	Anzahl der Ameisen je Ameisenkolonie
α	Gewichtungsfaktor der Attraktivität bei der Wahl eines Nachfolgers
β	Gewichtungsfaktor der Pheromonspur bei der Wahl eines Nachfolgers
q₀	Grenzwert zwischen Exploitation und Exploration
ρ	Verdunstungsfaktor der Pheromone bei einem globalen Pheromon-Update
ξ	Verdunstungsfaktor der Pheromone bei einem lokalen Pheromon-Update

Eine im Rahmen der Forschungstätigkeit dieser Arbeit erstellte Studienarbeit ergab, dass die Wahl dieser Parameter die Lösungsqualität des MACS beeinflusst. Zudem ist die optimale Kalibrierung aller Parameter vom Routenzugsystem abhängig. Ändern sich Merkmalsausprägungen des Routenzugsystems, führt eine andere Parametrisierung des MACS zu besseren Ergebnissen als zuvor. Somit kann keine einheitliche Parametrisierung für alle Referenzszenarien erfolgen (vgl. [fml-2019b]).

Daher wird im Folgenden ein Algorithmus zur lernenden Selbstkalibrierung des MACS je Referenzszenario entwickelt. Dieser führt vor dem eigentlichen MACS so lange ein Kalibrierungs-MACS aus, bis eine maximale Aufrufzahl n_{calls} erreicht wird (siehe Abbildung 6-18).

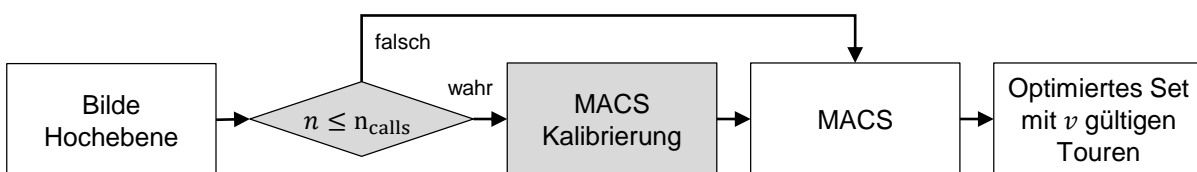


Abbildung 6-18: Schematische Einordnung der MACS Kalibrierung

Für die selbstlernende Kalibrierung müssen für jeden Parameter Intervalle sowie Stufen vorgegeben werden. Die in Tabelle 6-2 angegebenen Werte basieren auf Werten aus der MACS-Literatur (vgl. [Dor-1996; Dor-1997; Che-2016]). Dort werden ebenfalls je nach Anwendungsfall verschiedene Parameterwerte angewandt (vgl. [Dor-1996]). In der routenzugspezifischen Literatur wurden bisher keine Parameterwerte für einen MACS zur Tourenbildung angegeben.

Tabelle 6-2: Intervalle und Stufen der zu kalibrierenden Parameter des MACS

Parameter	Intervall	Stufen	Anzahl Werte
p_iterations	[2;5]	1	4
p_ants	[2;10]	1	9
α	[0;5]	0,5	11
β	[0;5]	0,5	11
q₀	[0;1]	0,1	11
ρ	[0;1]	0,1	11
ξ	[0;1]	0,1	11

Aus den Intervallen und Stufen ergeben sich für jeden Parameter unterschiedliche Werte. Um jede Parameterkombination der in Tabelle 6-2 aufgeführten Werte zu testen, müssten 5.797.836 Kalibrierungsläufe durchgeführt werden. Daher wird eine Lernheuristik eingesetzt, um die Anzahl der Kalibrierungsläufe zu reduzieren. Der Ablauf des MACS zur Kalibrierung des MACS ist im Pseudocode in Abbildung 6-19

beschrieben. Beim ersten Aufruf der Kalibrierung wird für jeden Wert v_p eines Parameters P eine Auswahlwahrscheinlichkeit von $w(v_p) = 1$ gesetzt.

Anschließend erfolgt eine Anpassung dieser Auswahlwahrscheinlichkeiten, indem in n_{runs} Wiederholungen unterschiedliche Parameterkombination zur Generierung einer MACS-Lösung verwendet werden. Bei jeder Wiederholung werden die Parameterwerte v_p für jeden Parameter P über eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung mit den aktuellen Wahrscheinlichkeiten $w(v_p)$ bestimmt. Um die Lösung eines MACS auf Basis einer Parameterkombination zu bewerten, werden die Gesamtkosten der Lösung S_{tour} mit der Anzahl darin enthaltenen Touren multipliziert. Eine Lösung mit mehr Touren oder höheren Kosten führt folglich zu einer höheren Bewertung der Parameterkombination.

```

1  BEGIN
2      n ← n + 1
3      IF n = 1 DO
4          FOR ALL p ∈ P DO
5              w(vp) ← 1 ∀ vp
6      FOR i ← 1 TO nruns DO
7          FOR ALL p ∈ P DO
8              vp ← z_demp(w(p))
9              Stour ← MACS(Vp)
10             ratingi ← |Stour| · c(Stour)
11         ratingmax ← max(rating1, ..., ratingnruns)
12         ratingmin ← min(rating1, ..., ratingnruns)
13         IF ratingmin ≠ ratingmax DO
14             FOR i ← 1 TO nruns DO
15                 FOR ALL p ∈ P DO
16                     w(vp) ← w(vp) · (1 -  $\frac{1}{|P|} \cdot \frac{rating_{max} - rating_i}{rating_{max} - rating_{min}}$ )
17             FOR ALL p ∈ P DO
18                 vp ← v(max(w(p)))
19     END

```

Abbildung 6-19: Pseudocode zur lernenden Selbstkalibrierung des MACS

Im Anschluss an die n_{runs} Wiederholungen mit zufälligen Parameterkombinationen werden die Wahrscheinlichkeiten für die Auswahl der Parameterwerte aktualisiert, falls sich die beste und schlechteste Bewertung der Wiederholungen voneinander unterscheiden. In diesem Fall erfolgt für jeden Parameter P für jede Wiederholung i eine Anpassung der Auswahlwahrscheinlichkeit $w(v_p)$, indem die bisherige Wahrscheinlichkeit anteilig zur Bewertung der Lösung der Wiederholung reduziert wird. Um die Wechselwirkungen zwischen den Parametern zu relativieren, wird jedem Parameter der $|P|$ -te Teil der interpolierten Bewertung zugeschrieben. Diese Aktualisierungsformel führt dazu, dass bisher noch nicht berücksichtigte Parameterwerte die höchste Auswahlwahrscheinlichkeit $w(v_p) = 1$ behalten. Zudem erhalten die Parameterwerte der Kombinationen, die zu guten Lösungen führen, eine hohe Wahrscheinlichkeit, die dennoch kleiner als eins ist.

Nach der Aktualisierung der Auswahlwahrscheinlichkeiten werden die Parameterwerte mit den höchsten Wahrscheinlichkeiten gewählt, um den eigentlichen MACS-Algorithmus zu starten. Weisen mehrere Werte die gleiche Wahrscheinlichkeit auf, wird einer dieser Werte zufällig gesetzt.

Der beschriebene Ablauf der Selbstkalibrierung des MACS wird die ersten n_{calls} Aufrufe des Moduls durchgeführt. Im Anschluss werden ohne eine weitere Kalibrierung die Parameterwerte mit den maximalen Auswahlwahrscheinlichkeiten gesetzt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurden $n_{calls} = 50$ und $n_{runs} = 10$ gewählt, um eine hohe Anzahl an Wiederholungen zu generieren. Insgesamt erfolgen durch die Lernheuristik 500 Kalibrierungsläufe für das MACS. In Anhang D sind die in den Referenzszenarien am häufigsten gewählten Parameterwerte angegeben.

Vorhergehend wurde eine umfangreiche Heuristik auf der Basis eines MACS für die integrierte Optimierung der dynamischen Touren- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung vorgestellt. Um die Lösungsqualität sowie Rechenzeit des vorgestellten Algorithmus einzuordnen, werden vergleichende Simulationsexperimente durchgeführt. Dazu werden auf dem Layout *Werkstatt* GLT-Transporte bei hohem Systemdurchsatz mit unterschiedlichen Heuristiken simuliert. Einerseits werden die Hauptalgorithmen NNH und MACS verglichen. Andererseits werden die Hauptalgorithmen entweder ohne lokale Optimierung oder mit 2-opt- bzw. 3-opt-Austauschverfahren verwendet. Die Experimente wurden mit jeweils fünf Beobachtungen für ein bis 20 Züge und mit unterschiedlichen Bedarfsschwankungen wiederholt.

Eine Betrachtung der Haupteffekte hinsichtlich WIP und notwendiger Züge für eine robuste Produktionsversorgung bei niedrigen Transportbedarfsschwankungen ergibt, dass die Anwendung des MACS im Vergleich zum NNH-Algorithmus weniger Züge für

eine robuste Materialbereitstellung bei geringem zulässigen WIP erfordert. Der durchschnittliche WIP variiert kaum. Des Weiteren werden die Haupteffekte durch eine Variation der lokalen Optimierungsheuristik sowohl hinsichtlich notwendiger Züge als auch WIP nicht beeinflusst (siehe Abbildung 6-20). Die anderen Schwankungskategorien erzielen vergleichbare Ergebnisse.

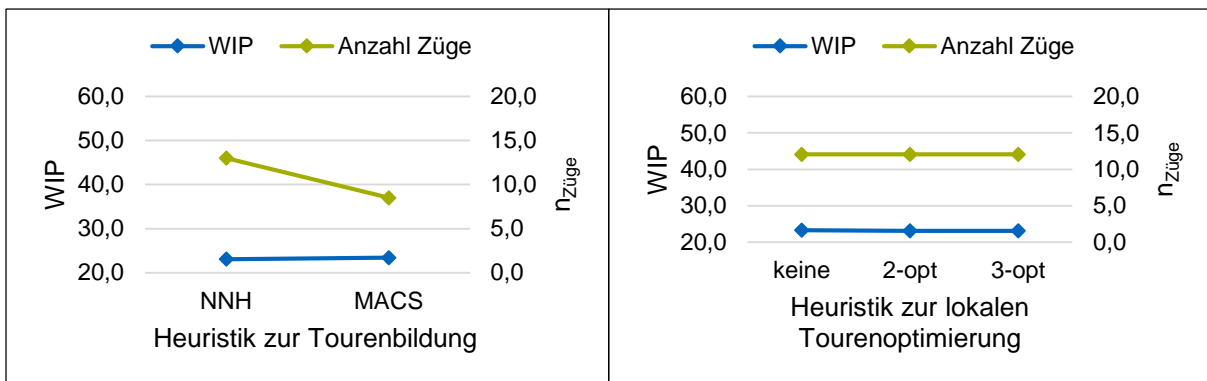


Abbildung 6-20: Haupteffektdiagramme der Vergleiche der Heuristiken zur Tourenbildung und der Heuristiken zur lokalen Optimierung

Da die Haupteffekte durch das Auftreten instabiler Szenarien verfälscht werden können, ist zudem eine Detailbetrachtung der Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenhangs von WIP und Anzahl der eingesetzten Züge erforderlich. In Abbildung 6-21 ist diese für die Szenarien mit niedrigen Schwankungen der Zwischenabrufzeiten dargestellt. Die Betrachtung ergibt, dass der Einsatz von MACS ohne eine lokale Optimierung zu deutlich schlechteren Ergebnissen führen kann. Die beiden MACS mit lokalem 2-opt bzw. 3-opt-Austauschverfahren liefern beinahe deckungsgleiche Ergebnisse, die für alle Experimente mindestens genauso gut sind wie die Werte der NNH-Algorithmen. Die Unterschiede sind auf einem 90 % Konfidenzniveau jedoch nur für die Ergebnisse mit sechs Routenzügen signifikant.

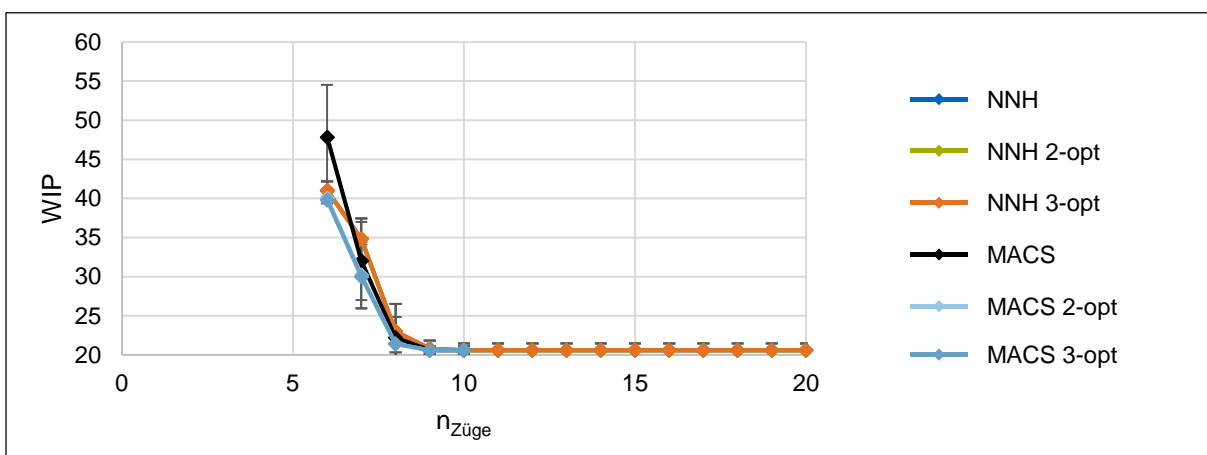


Abbildung 6-21: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl an Zügen in Abhängigkeit der Heuristiken

Der Laufzeitvergleich der verschiedenen Heuristiken ist in Abbildung 6-22 dargestellt. Die Ergebnisse sind ebenfalls auf einem Konfidenzniveau von 90 % bestimmt. Pro Heuristik wurden dazu mindestens 180.000 Aufrufe des jeweiligen Algorithmus mit unterschiedlichen Problemgrößen, d. h. zuzuteilenden Transportaufträgen, ausgewertet. Für jede Heuristik ist der Verlauf der Rechenzeit pro Aufruf in Abhängigkeit der Problemgröße aufgetragen. Besonders für kleine Instanzen weisen alle NNH-Algorithmen sowie das MACS ohne lokale Optimierung ähnliche Rechenzeiten auf. Für größere Probleme steigt die Rechenzeit des MACS hingegen überproportional an. Dies gilt insbesondere, falls zusätzlich eine lokale Optimierung eingesetzt wird. Dabei liegen die Rechenzeiten pro Aufruf jedoch auch bereits bei kleineren Problemen deutlich über den anderen Heuristiken, wobei das 3-opt-Austauschverfahren mehr Zeit beansprucht als das lokale 2-opt-Verfahren. Interessant ist zudem, dass die Rechenzeiten pro Aufruf zumeist leicht abfallen, wenn das Vielfache von vier, d. h. der Tourenkapazität, um eins in der Problemgröße überschritten wurde. Es wird vermutet, dass dies daran liegt, dass die Transportaufträge dann gleichmäßiger auf die Touren verteilt werden, um die Gesamtkosten zu reduzieren. Dies führt dazu, dass die rechenintensive lokale Optimierung nur mit kleineren Touren arbeiten muss.

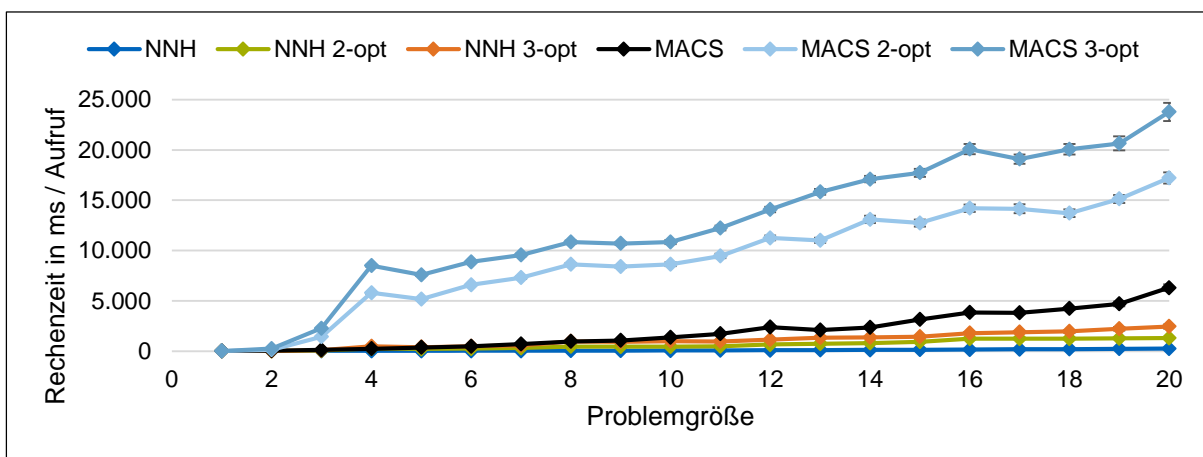


Abbildung 6-22: Rechenzeiten der Heuristiken in Abhängigkeit der Problemgröße¹⁵

Der Vergleich der verschiedenen Heuristiken zeigt, dass die Rechenzeiten beim MACS mit lokaler Optimierung deutlich erhöht sind. Dennoch kann beim MACS mit lokaler Optimierung, wenn auch evtl. in geringem Umfang, eine effizientere, robuste Produktionsversorgung ermöglicht werden. Unterschiede in der Lösungsqualität zwischen 2-opt- und 3-opt-Austauschverfahren bei der Anwendung auf ein Routenzugsystem sind nicht erkennbar. Da in dieser Arbeit aufgrund der Evaluationsmethodik ein sequentielles und kein paralleles MACS verwendet wird, wie es in der Praxis umzusetzen wäre, wird die erfasste Rechenzeit als nachrangig eingestuft und die

¹⁵ Die Simulationsläufe wurden auf Simulationsservern (max. Leistung je Server; Geschwindigkeit: 3,66 GHz, Kerne: 8, Logische Prozessoren: 16) des Lehrstuhls fml an der Technischen Universität München durchgeführt.

Lösungsqualität betont. Deswegen werden für die weiteren Untersuchungen das MACS in Verbindung mit einem lokalen 2-opt-Austauschverfahren eingesetzt.

6.2.4 Abfahrtszeit

Im Modul der Abfahrtszeitbestimmung wird der Startzeitpunkt einer Tour festgelegt. Dabei werden sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Betrachtungsebene der Routenzugsystemsteuerung Entscheidungen getroffen. Der Systemzusammenhang des Moduls ist in Abbildung 6-23 verdeutlicht. Wie auch bei den anderen Modulen gibt es unbedingt erforderliche und optionale Eingangsparameter in das Modul.

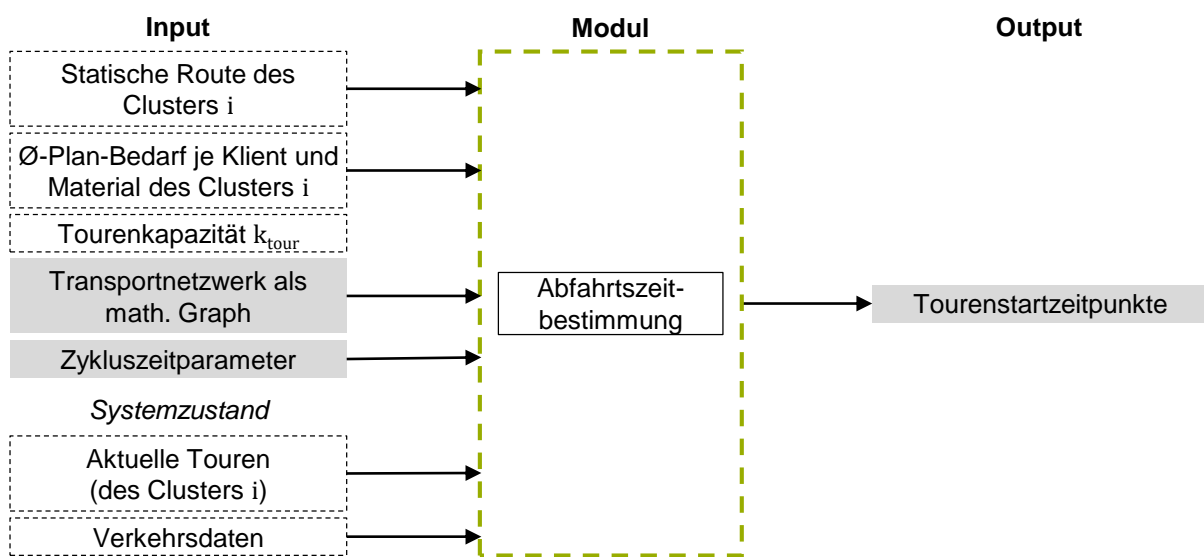


Abbildung 6-23: Systemzusammenhang des Moduls „Abfahrtszeit“

Um die Abfahrtszeit zu bestimmen, sind zum einen Informationen zu Transportnetzwerk für die Berechnung von Fahrtzeiten und zum anderen weitere Informationen zur Zykluszeit, wie z. B. geplante Handhabungszeiten an Materialflussquelle und -senken, erforderlich. Des Weiteren müssen je nach Ausgestaltung des Moduls sowie der anderen Steuerungsmodule Informationen zur statischen Route eines Clusters und zu den durchschnittlichen Plan-Bedarfen der darauf bedienten Klienten bekannt sein. Zudem ist je nach Ausprägung des Moduls die Kenntnis der aktuellen Touren sowie von Verkehrsdaten erforderlich.

Die Abfahrtszeitbestimmung ist die in der routenzugspezifischen Literatur am häufigsten betrachtete Steuerungsentscheidung (siehe Abschnitte 3.3 und 3.4). Zumeist werden dabei entweder Fahrpläne auf Basis deterministisch bekannter Transportaufträge erstellt (vgl. z. B. [Emd-2011]) bzw. durchschnittliche Transportbedarfe für die Ermittlung eines statischen Takts (vgl. z. B. [VDI-5586b]) verwendet. Daneben werden

jedoch auch Logiken vorgestellt, die die Touren dynamisch während des Betriebs terminieren. Dazu gibt es einerseits Standardstrategien wie einen permanenten oder auslastungsorientierten Tourenstart, der meist mit Zeitgrenzen beschrieben wird (vgl. z. B. [Kle-2019]). Andererseits werden Ausnahmestrategien, wie z. B. das Verschieben von Aufträgen auf andere Touren oder die Durchführung von Sondertransporten, präsentiert (vgl. z. B. [Kle-2015a]).

Da in dieser Arbeit die Effizienz verschiedener Steuerungsstrategien bei einer robusten Produktionsversorgung analysiert wird, werden Ausnahmestrategien nur insofern betrachtet, wie sie sowieso in der Steuerungsstrategie integriert sind. Eine Verschiebung von Aufträgen auf andere Touren im Fall eines kritischen Auftrags passiert z. B. implizit durch die dynamische Tourenbildung unter der Berücksichtigung von Zeitfenstern. Des Weiteren können Sondertransporte nur mit den zur Verfügung stehenden Transportressourcen durchgeführt werden (siehe Abschnitt 6.2.5).

Da in den Referenzsystemen dieser Arbeit keine exakten Transportaufträge langfristig deterministisch bekannt sind, wird als statische Ausprägung des Moduls der Abfahrtszeitbestimmung im Folgenden ein getakteter Tourenstart untersucht. Dieser stellt zudem die häufigste Ausprägung in realen Routenzugsystemen dar (vgl. [Lie-2017a, S. 43]). Des Weiteren werden als dynamische Abfahrtszeitlogiken ein permanenter Tourenstart sowie eine auslastungsorientierte Abfahrt mit Zeitgrenze betrachtet. Dadurch sind die Abfahrtsstrategien von mindestens 76 % der von *Lieb et al.* erfassten Routenzugsysteme mit verbrauchsorientiertem Abrufprinzip berücksichtigt (vgl. [Lie-2017a, S. 43]). Die konkrete Ausgestaltung dieser Modulausprägungen in dieser Arbeit wird im Folgenden erläutert.

Modulausprägung: Getaktet

Beim getakteten Tourenstart beginnen die Routenzüge in einem Cluster in zyklischen Abständen eine Tour. Beträgt die Routenzugtaktzeit z. B. 30 Minuten, fährt jede halbe Stunde ein Routenzug auf der Route los, sofern eine Transportressource im Cluster verfügbar ist. Beim getakteten Tourenstart werden die vorher erstellten Touren hinsichtlich ihrer Zeitfenster überprüft und evtl. erneut gebildet. Die Bestimmung der Routenzugtaktzeit ist eine statische Entscheidung, die im Rahmen der mittel- bis langfristigen Planung des Routenzugsystems getroffen wird. Die algorithmische Ausgestaltung der Modulausprägung folgt in dieser Arbeit größtenteils dem Vorgehen zur Festlegung einer Taktzeit nach der *VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2*. Dafür sind neben den Informationen zur statischen Route, für die die Taktzeit bestimmt wird, die durchschnittlichen Plan-Transportbedarfe der zugeordneten Klienten und die Transportkapazität einer Tour als Eingangsinformationen erforderlich (vgl. [VDI-5586b]).

Der erste Schritt zur Bestimmung der Routenzugtaktzeit ist, den gesamten Ladungsträgerdurchsatz λ_{route} der betrachteten Route zu ermitteln (vgl. [VDI-5586b]). Dieser ergibt sich nach Formel (6-5) aus der Summe aller der Route zugeordneten Materialbedarfe M_c der Klienten K :

$$\lambda_{route} = \sum_{c \in K} \sum_{m \in M_c} \lambda_{cm} \quad (6-5)$$

Dadurch ist dimensioniert, wie viele Ladungsträger durchschnittlich pro Zeiteinheit auf der Route transportiert werden müssen. Die dafür erforderliche minimale Routenfrequenz $f_{route,min}$ ergibt sich nach Formel (6-6) aus dem Verhältnis des Durchsatzes λ_{route} zur Tourenkapazität k_{tour} (vgl. [VDI-5586b]):

$$f_{route,min} = \frac{\lambda_{route}}{k_{tour}} \quad (6-6)$$

Der Kehrwert der minimalen Routenfrequenz $f_{route,min}$ ergibt den maximalen Tourenstartabstand $t_{TA,route,max}$ einer Route (vgl. [VDI-5586b]) (siehe Formel(6-7)):

$$t_{TA,route,max} = \frac{1}{f_{route,min}} \quad (6-7)$$

Wird die Taktzeit einer Route zu $t_{TA,route,max}$ gewählt, kann der Durchsatz λ_{route} gerade noch erzielt werden, sofern keine Transportbedarfsschwankungen auftreten. Durch die Vorgabe einer kapazitiven Plan-Auslastung η_{soll} für die Touren auf einer Route wird eine Kapazitätsreserve berücksichtigt, um Transportbedarfsspitzen im Regelbetrieb abzufangen (vgl. [VDI-5586b]). Dadurch ergibt sich die Taktzeit $t_{TA,route}$ einer Route nach Formel (6-8):

$$t_{TA,route} = \eta_{soll} \cdot t_{TA,route,max} \quad (6-8)$$

Die kapazitive Plan-Auslastung der Touren η_{soll} dient zudem als Sicherheitspuffer für schwankende Zykluszeiten. Eine zu hohe Plan-Auslastung gefährdet eine robuste Produktionsversorgung. Wird η_{soll} zu niedrig gewählt, folgt ein ineffizienter Systembetrieb. Um eine optimierte Wahl der Plan-Auslastung zu treffen, werden Simulationsexperimente mit unterschiedlichen Werten für η_{soll} im Intervall 0,5 bis 1 durchgeführt. Als Referenzszenario wird dafür eine GLT-Produktionsversorgung über das Layout *Rundkurs* gewählt, da dadurch Nebeneffekte aus anderen Steuerungsentscheidungen gering gehalten werden. Die Experimente werden für unterschiedliche

Gesamtdurchsätze sowie unterschiedliche Variationskoeffizienten der Zwischenabrufrzeiten mit ein bis zehn Zügen durchgeführt und jeweils mit fünf Beobachtungen wiederholt. Die Auswirkungen auf die Mittelwerte des WIP und der Anzahl an Zügen über alle durchgeführten Experimente sind in Abbildung 6-24 dargestellt. Sowohl für sehr geringe als auch für sehr hohe Werte von η_{soll} werden gute Ergebnisse erzielt. Wie bei den vorhergehenden Haupteffektdiagrammen werden die Mittelwerte jedoch durch instabile Szenarien verfälscht, weshalb eine Detailbetrachtung der Auswirkungen unterschiedlicher Parameterwerte auf die beiden Zielgrößen WIP und Anzahl an Zügen erforderlich ist.

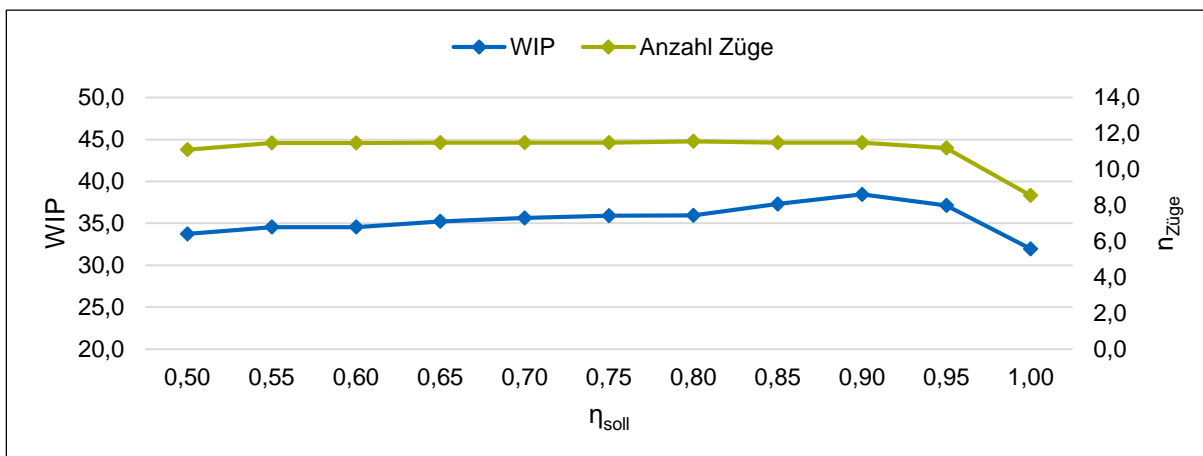


Abbildung 6-24: Haupteffektdiagramme der Auswirkungen der geplanten kapazitiven Auslastung bei der Kalkulation des Routentakts

Für diese Detailauswertung ist das Simulationsexperiment bei mittlerem Durchsatz und ohne Schwankungen der Zwischenabrufrzeiten in Abbildung 6-25 exemplarisch aufgezeigt. Es ist ersichtlich, dass eine kapazitive Plan-Auslastung von $\eta_{soll} = 0,5$ für dieses Experiment die besten Ergebnisse erzielt. Dies gilt insbesondere, falls nur ein geringer Umfang an WIP im Routenzugsystem erreicht werden soll. Hierfür sind die Ergebnisse für $\eta_{soll} = 0,5$ signifikant besser als für andere Parameterwerte. Dies liegt daran, dass falls zum getakteten Tourenstart kein Zug verfügbar ist, trotzdem, falls zumindest jeden zweiten Takt eine Tour starten kann, eine im Mittel robuste Produktionsversorgung erreicht werden kann. Bei einem größeren η_{soll} führt ein Auslassen eines Routenzugtakts hingegen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem instabilen System. Durch eine kapazitive Plan-Auslastung von $\eta_{soll} = 0,5$ steigt somit die Flexibilität bei der getakteten Produktionsversorgung. Wenn zudem die mittlere Zykluszeit größer als die daraus resultierende Taktzeit ist, werden Takte übersprungen und die tatsächliche mittlere Tourenauslastung steigt deutlich über 50 %.

Insgesamt wird für $\eta_{soll} = 0,5$ in 78 % der Experimente eine optimale Lösung im Vergleich zu den anderen Parameterwerten erreicht (siehe Abbildung 6-26). Dieser Wert

übertrifft die Ergebnisse der anderen kapazitiven Plan-Auslastungen deutlich. Um die Varianz der Steuerungsstrategien im weiteren Verlauf der Arbeit einzuschränken, wird deshalb für den getakteten Tourenstart eine einheitliche kapazitive Plan-Auslastung von $\eta_{soll} = 0,5$ verwendet.

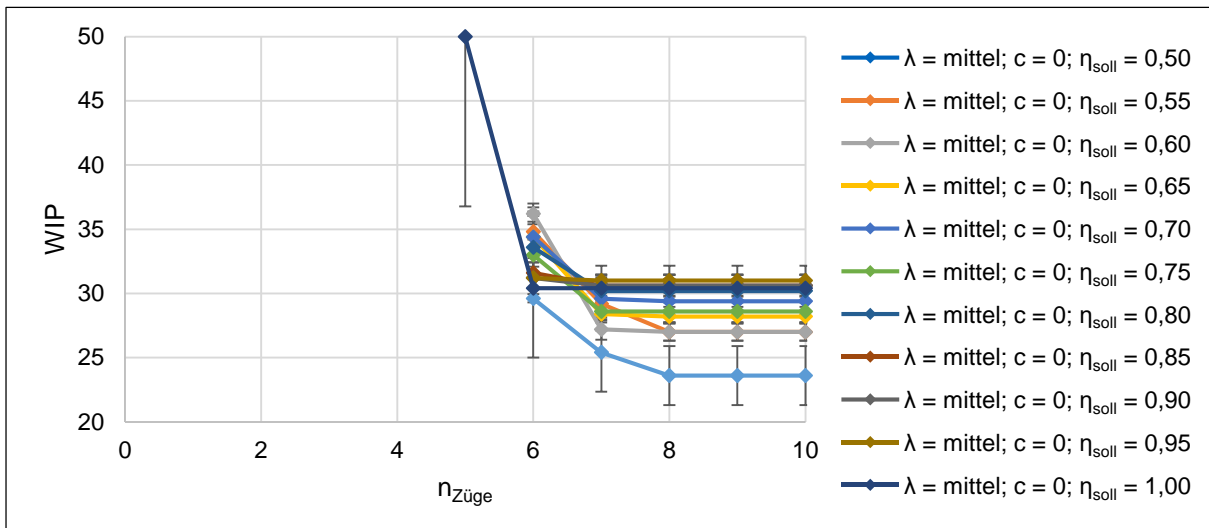


Abbildung 6-25: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl an Zügen in Abhängigkeit der geplanten kapazitiven Auslastung bei der Kalkulation des Routentakts für ein Szenario mit mittlerem Durchsatz und keinen Schwankungen der Zwischenabrufrufen

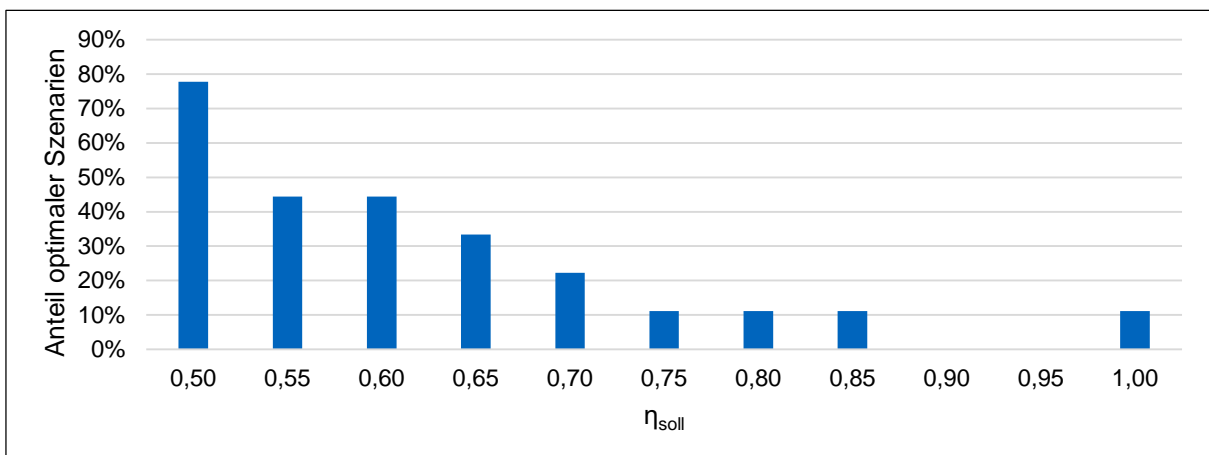


Abbildung 6-26: Anteil optimaler Szenarien in der Parametrisierung der getakteten Tourenstartlogik in Abhängigkeit der kapazitiven Plan-Auslastung η_{soll}

Modulusprägung: Permanent

Der permanente Tourenstart stellt die einfachste Tourenstartlogik dar und erfordert keine Parametrisierung. Eine Tour im Routenzugsystem oder innerhalb eines Clusters startet immer dann, wenn zum einen eine gültige aktuelle Tour, d. h. mindestens ein Transportauftrag, für den Betrachtungsraum vorliegt und zum anderen eine Transportressource verfügbar ist. Dadurch, dass die Wartezeit der Routenzüge an der

Materialflussquelle minimiert wird, ergibt sich eine maximale zeitliche Auslastung der Transportressourcen. Deren kapazitive Auslastung ist jedoch geringer (vgl. [Kle-2019]).

Da die Transportaufträge elektronisch durch Sensoren ausgelöst werden, sind zudem keine Leerfahrten der Routenzüge erforderlich, weshalb immer mindestens ein Transportauftrag auf einer Tour bereitgestellt wird.

Modulusprägung: Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze

Der auslastungsorientierte Tourenstart mit Zeitgrenze erfordert eine erhöhte Verfügbarkeit von elektronischen Informationen zu den aktuellen Touren und Transportaufträgen. Im Prinzip erfolgt die auslastungsorientierte Terminierung des Tourenstarts so, dass die Tour, die unter der Einhaltung aller Zeitfensterrestriktionen gebildet wurde, sofort beginnt, wenn k_{tour} Transportaufträge zugeteilt wurden. Falls die Transportkapazität einer Tour noch nicht vollständig ausgenutzt ist, wird ein spätester Tourenstart für jede Tour so bestimmt, dass alle Zeitfenster der zugeordneten Transportaufträge eingehalten werden und dass die Tour möglichst spät startet. Als Zeitgrenze werden z. B. maximale Wiederbeschaffungszeiten verwendet (vgl. [Kle-2019]).

Da in den Referenzsystemen dieser Arbeit eine Worst-Case-Abschätzung der spätesten Bereitstellzeit für jeden individuellen Transportauftrag getroffen wird, erfolgt die Festlegung der Startzeit einer Tour durch eine Vorwärts- und Rückwärtsterminierung aller Transportaufträge der Tour (siehe Abbildung 6-27).

In der Vorwärtsterminierung werden zunächst alle geplanten Zykluszeitanteile unter der Berücksichtigung der aktuellen Transportkosten für diese Tour bestimmt. Anschließend wird in der Rückwärtsterminierung versucht, denjenigen Transportauftrag der Tour zu finden, der am nächsten zu seinem spätesten Bereitstellzeitpunkt ausgeliefert werden kann. Dazu wird die Tour iterativ so gelegt, dass ein Transportauftrag zum spätesten möglichen Zeitpunkt innerhalb seines Zeitfensters bereitgestellt wird. Für alle anderen Transportaufträge wird dann jeweils überprüft, ob deren Zeitfenster noch eingehalten werden.

Um dieser Tourenstartlogik einen Sicherheitspuffer hinzuzufügen, durch den Abweichungen zur geplanten Zykluszeit berücksichtigt werden können, kann die späteste Bereitstellzeit LTA_j eines Transportauftrags j um die einheitliche Zeitspanne Δt_{SP} künstlich verkürzt werden.

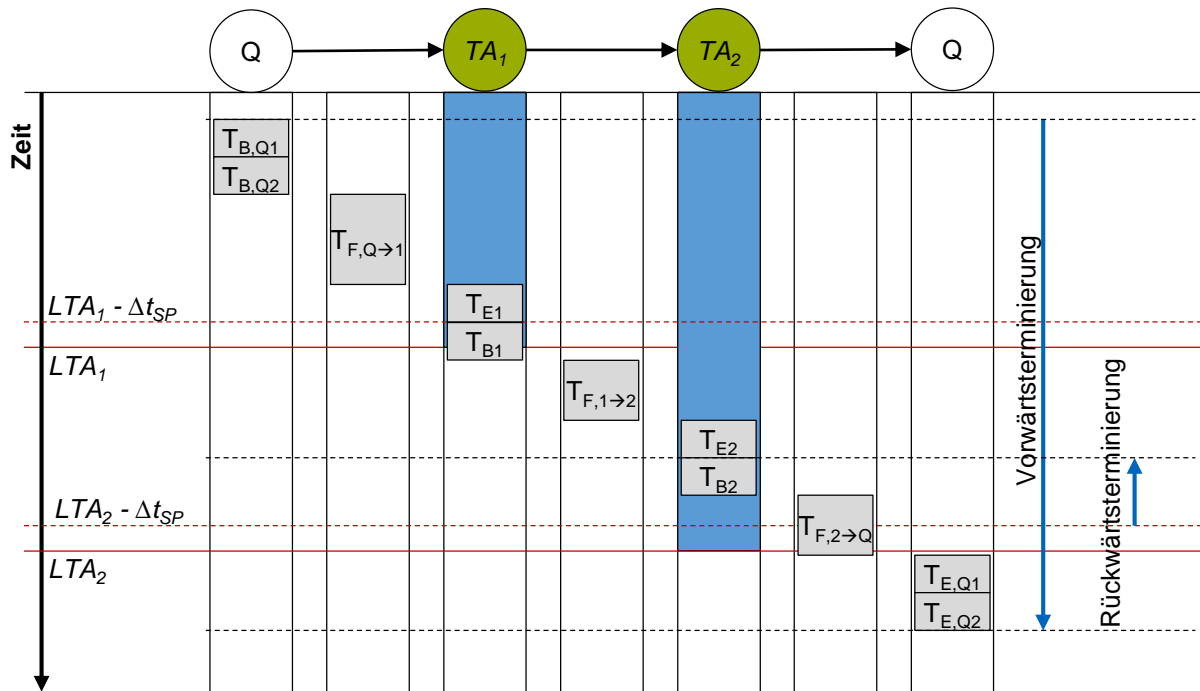


Abbildung 6-27: Schematische Darstellung der Abfahrtszeitbestimmung bei der Modulausprägung „Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze“

Um eine optimierte Wahl des zeitlichen Sicherheitspuffers zu treffen, werden Simulationsexperimente mit unterschiedlichen Werten für Δt_{SP} im Intervall 0 bis 100 Sekunden durchgeführt. Als Referenzszenario wird dafür eine GLT-Produktionsversorgung über das Layout *Rundkurs* gewählt, da dadurch Nebeneffekte aus anderen Steuerungsentscheidungen geringgehalten werden. Die Experimente werden für unterschiedliche Gesamtdurchsätze sowie unterschiedliche Variationskoeffizienten der Zwischenabruftzeiten mit ein bis zehn Zügen durchgeführt und jeweils mit fünf Beobachtungen wiederholt. Die Auswirkungen auf die Mittelwerte des WIP und der Anzahl an Zügen über alle durchgeführten Experimente sind in Abbildung 6-28 dargestellt.

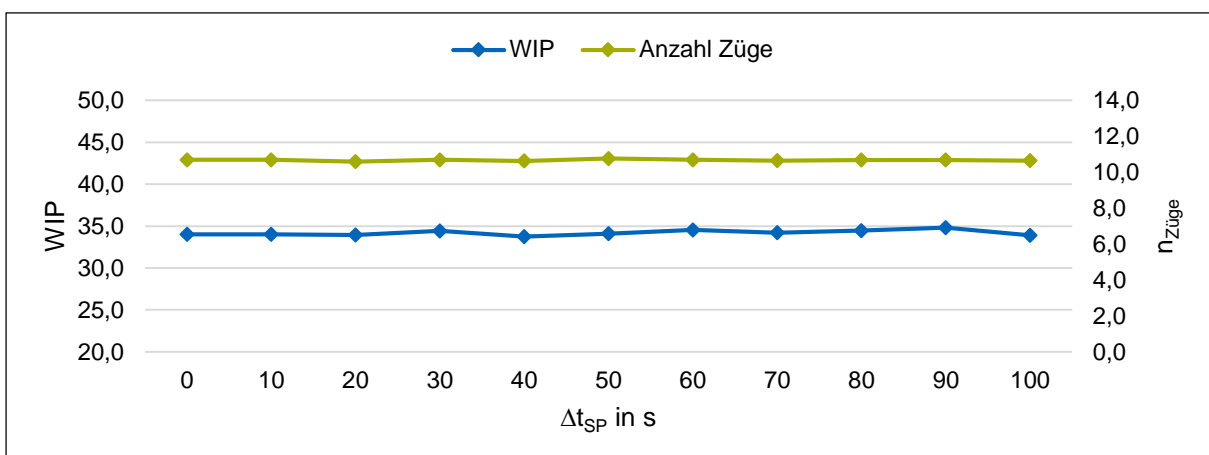


Abbildung 6-28: Haupteffektdiagramme der Auswirkungen des zeitlichen Sicherheitspuffers Δt_{SP} zur spätesten Bereitstellzeit eines Transportauftrags

Beide Optimierungsgrößen werden in den Haupteffekten durch die Wahl des Sicherheitspuffers Δt_{SP} kaum beeinflusst. Wie bei den vorhergehenden Haupteffektdiagrammen werden die Mittelwerte jedoch durch instabile Szenarien verfälscht, weshalb eine Detailbetrachtung der Auswirkungen unterschiedlicher Parameterwerte auf die beiden Zielgrößen WIP und Anzahl an Zügen erforderlich ist.

Für diese Detailauswertung ist das Simulationsexperiment bei niedrigem Durchsatz und hohen Schwankungen der Zwischenabrufzeiten in Abbildung 6-29 exemplarisch aufgezeigt. Es ist ersichtlich, dass ein niedriger Sicherheitspuffer Δt_{SP} zu signifikant besseren Ergebnissen als höhere führen. Dies gilt insbesondere, falls nur ein geringer Umfang an WIP im Routenzugsystem erreicht werden soll. Für einen Sicherheitspuffer von $\Delta t_{SP} = 0$ s werden im Beispiel die besten Ergebnisse erzielt.

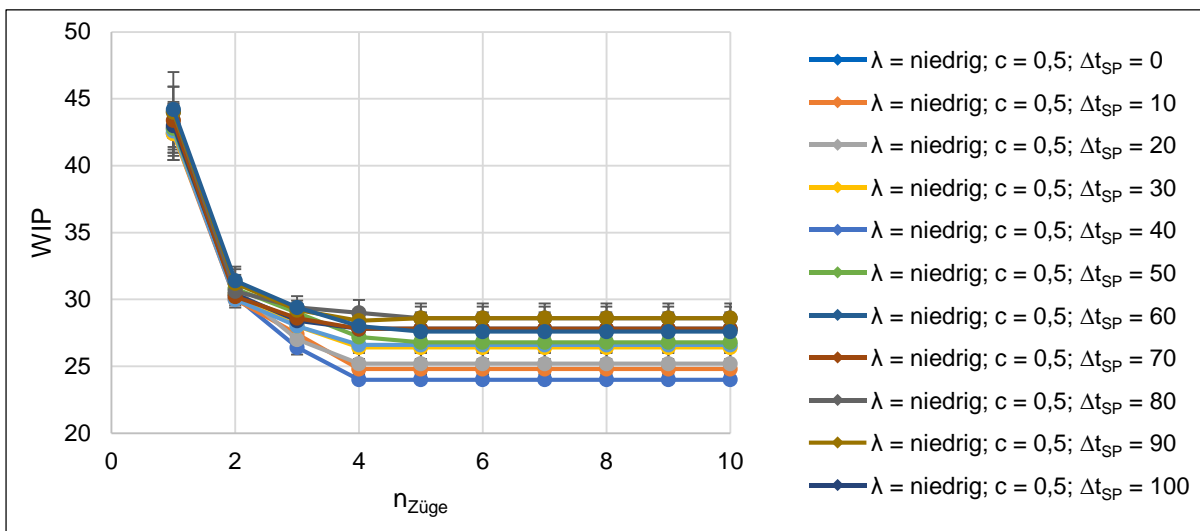


Abbildung 6-29: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl an Zügen in Abhängigkeit des zeitlichen Sicherheitspuffers bei der Bestimmung des Tourenstarts für ein Szenario mit niedrigem Durchsatz und hohen Schwankungen der Zwischenabrufzeiten

In Abbildung 6-30 ist die Bewertung der Parameterwerte für alle Szenarien dargestellt.

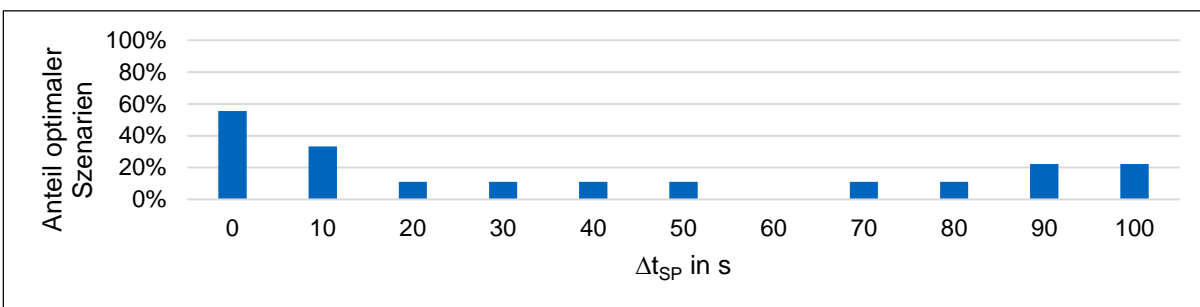


Abbildung 6-30: Anteil optimaler Szenarien in der Parametrisierung der auslastungsorientierten Tourenstarlogik mit Zeitgrenze in Abhängigkeit des zeitlichen Sicherheitspuffers Δt_{SP}

Insgesamt wird für $\Delta t_{SP} = 0$ s in 56 % der Experimente eine optimale Lösung im Vergleich zu den anderen Parameterwerten erreicht. Um die Varianz der Steuerungsstrategien im weiteren Verlauf der Arbeit einzuschränken, wird deshalb für diese Modulausprägung kein zusätzlicher Sicherheitspuffer für die Bereitstellung verwendet.

6.2.5 Ressourcen

Während sich die Dimensionierung der Transportressourcen im Rahmen der Planung u. a. damit beschäftigt, wie viele Routenzüge für einen robusten Systembetrieb notwendig sind, ist die Ressourcenzuteilung als Steuerungsentscheidung dafür zuständig, Routenzüge nach gewissen Regeln auf die gebildeten Touren zu disponieren.

In allen Steuerungsstrategien dieser Arbeit besteht die Ressourcenzuteilung aus einer statischen und einer dynamischen Betrachtungsebene. Statisch wird eingegrenzt, welcher der vorhandenen Routenzüge für welche Touren eingesetzt werden darf. Prinzipiell können die Transportressourcen auf bestimmte Randbedingungen, wie z. B. die Art der Ladungsträger, begrenzt oder beliebig einsetzbar sein (vgl. [Hor-2017]). Die dynamische Ebene der Ressourcenzuteilung disponiert schließlich einen konkreten Routenzug auf eine konkrete Tour.

Der Systemzusammenhang des Steuerungsmoduls ist in Abbildung 6-31 dargestellt.

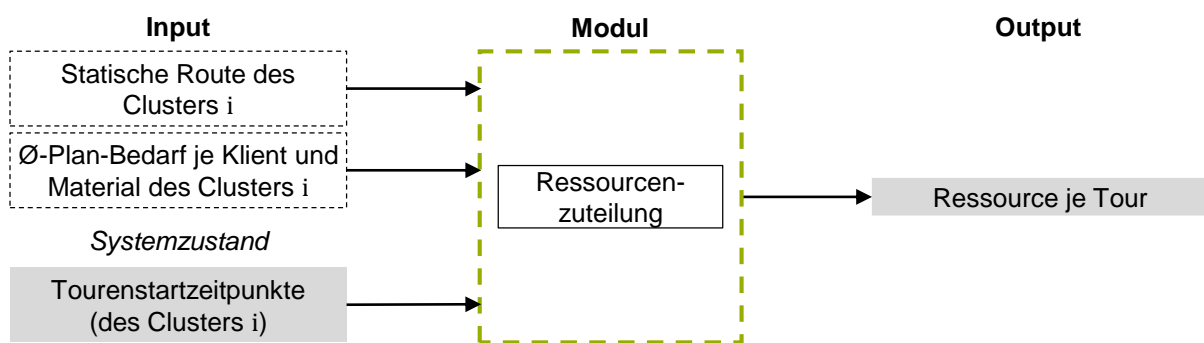


Abbildung 6-31: Systemzusammenhang des Moduls „Ressourcen“

Da in dieser Arbeit homogene Routenzugsysteme untersucht werden, erfolgt die mögliche Einschränkung der Transportressourcen lediglich hinsichtlich der Cluster und nicht nach weiteren Aspekten. Diese Einschränkung kann nur vorgenommen werden, falls statische Cluster vorab gebildet wurden. In einem solchen Fall benötigt die statische Ressourcenzuteilung einerseits Informationen zu den definierten Routen der Cluster und andererseits zu den durchschnittlichen Plan-Bedarfen. Falls eine statische Aufteilung der Transportressourcen auf Cluster erfolgt, werden diese gleichmäßig proportional zum durchschnittlichen Plan-Transportbedarf eines Clusters zugeteilt.

Hingegen können je nach Steuerungsstrategie auch beim Vorhandensein von Clustern alle Transportressourcen clusterunabhängig verwendet werden (vgl. [Kil-2012]).

Für die dynamische Ressourcenzuteilung werden Informationen zu den Tourenstartzeitpunkten benötigt. In dieser Arbeit erfolgt die Zuteilung der Routenzüge zu den Touren dann, wenn ein Tourenstart fällig und eine Transportressource aktuell verfügbar sind. Kann einer Tour kein Routenzug zugeteilt werden, müssen neue Touren gebildet werden. Durch eine ausreichende Dimensionierung der eingesetzten Züge und des Umlaufbestands im Routenzugsystem muss sichergestellt sein, dass zumindest jeder Transportauftrag im Direkttransport rechtzeitig bereitgestellt werden kann.

6.2.6 Intratour: Reihenfolge, Weg

Nachdem der Tourenstart einer geplanten Tour terminiert wurde, können sich der Systemzustand und damit die Voraussetzungen für die Reihenfolgebildung und Wegfindung ändern, indem z. B. Staus im Transportnetzwerk entstehen. Durch dieses Modul können die beiden Entscheidungen sowohl zum Tourenstart als auch während der Tour übersteuert werden. Sobald die Tour gestartet wurde, ist zudem keine Änderung der zugeordneten Transportaufträge möglich. Die Reihenfolgebildung während der Tour basiert analog zu den vorherigen Steuerungsmodulen entweder auf einer statisch definierten Route oder auf einer optimierten Reihenfolge aller offenen Transportaufträge einer Tour, die integriert mit der Wegfindung gesucht wird. Die Wegfindung kann ebenso der statisch definierten Route folgen oder auf Basis des aktuellen Systemzustands einen dynamischen Fahrweg innerhalb des Transportnetzwerks mit aktuellen Kosten als Kantengewichte finden.

Das Prinzip der Reihenfolgebildung wurde bereits in Abschnitt 6.2.3 erläutert. Im Gegensatz dazu ändern sich innerhalb dieses Moduls nur die Auslösezeitpunkte für eine erneute Reihenfolgebildung. Für die Ausgestaltung der Wegfindung wurde auf diesen Abschnitt verwiesen. Im Folgenden werden sowohl die Auslösezeitpunkte einer erneuten Reihenfolgebildung und Wegfindung als auch die Möglichkeiten der Wegfindung in den Steuerungsstrategien dieser Arbeit beschrieben.

Der Systemzusammenhang des Moduls ist in Abbildung 6-32 dargestellt. Als notwendige Eingangsinformationen in das Modul sind Informationen zum Transportnetzwerk und zu den gebildeten Touren erforderlich. Zudem muss während der Tour bekannt sein, welche Transportaufträge noch bereitzustellen sind. Je nach Ausprägung des Moduls müssen zudem Informationen über die statische Route des Clusters oder über Verkehrsdaten, mit denen die Transportkosten verändert werden, bekannt sein. Das Ergebnis des Moduls sind einerseits der als nächstes bereitzustellende

Transportauftrag einer Tour und andererseits der zu wählende Fahrweg, um diesen Transportauftrag bereitzustellen.

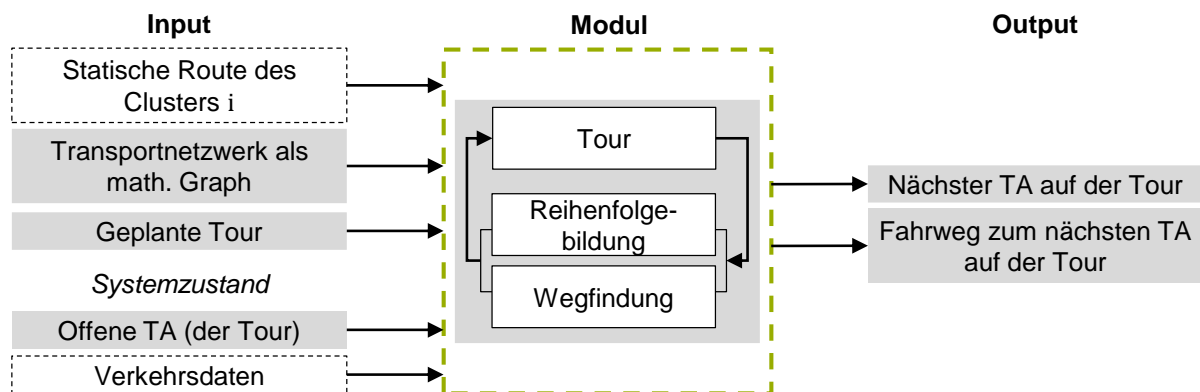


Abbildung 6-32: Systemzusammenhang des Moduls „Intratour: Reihenfolge, Weg“

Die Möglichkeiten der Kombination der Reihenfolgebildung sind in Abbildung 6-33 dargestellt. Zudem wird gezeigt, wann der Einsatz einer Intratour-Reihenfolgebildung und Wegfindung sinnvoll sein kann.

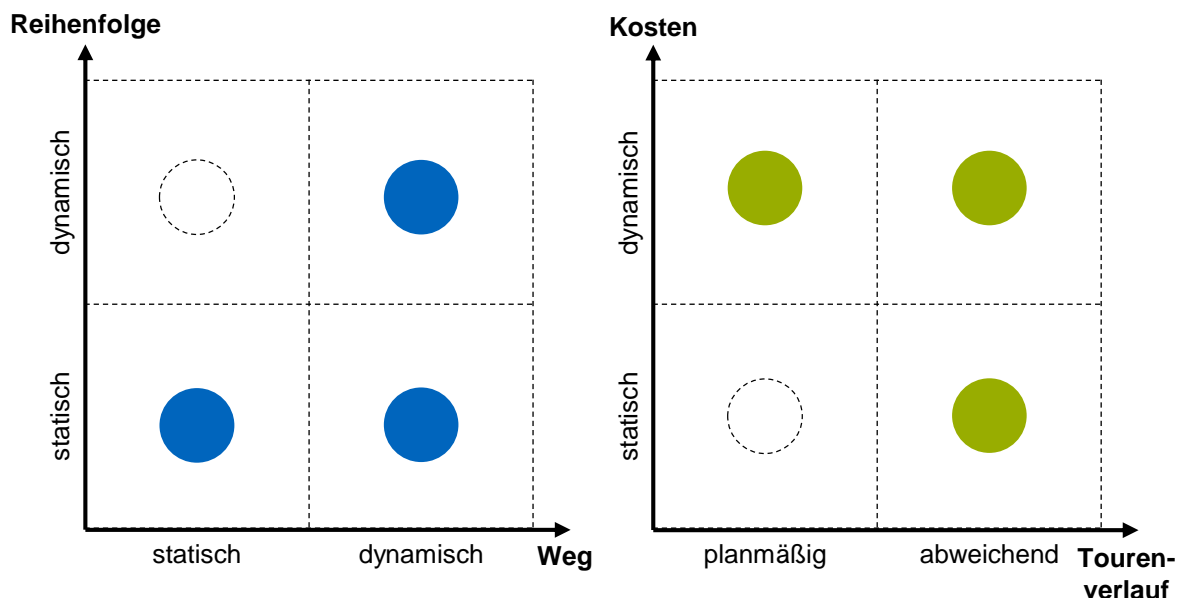


Abbildung 6-33: Auswirkungen der Ausprägungen der Reihenfolge und des Wegs sowie der Kosten und des Tourenverlaufs auf die möglichen Modulausprägungen

Generell ist eine dynamische Anpassung der Reihenfolge einer Tour nur erforderlich, wenn auch der Fahrweg zwischen zwei Klienten geändert wurde. Wird die Wegfindung dynamisch angepasst, kann dennoch die statische Reihenfolge der Tour beibehalten werden. Bei der dritten Kombinationsmöglichkeit werden weder Reihenfolge noch Fahrweg angepasst. In diesem Fall wird das Modul *Intratour: Reihenfolge, Weg* nicht

in die Steuerungsstrategie integriert. Das Modul kann jedoch berücksichtigt werden, wenn dynamische Kosten für die Wegfindung verwendet werden oder der bisherige Tourenverlauf vom angedachten abweicht, indem die geplante Zykluszeit in der bisherigen Tour überschritten wurde.

Der erste Zeitpunkt, an dem eine Optimierung innerhalb der Tour erfolgen kann, falls sich zwischen der Tourenbildung und der Abfahrt die Kosten im Transportnetzwerk dynamisch geändert haben, ist der Tourenstartzeitpunkt. Weitere Anpassungen der Tour können immer dann vorgenommen werden, wenn der Routenzug seine geplante Richtung ändern kann, d. h. an Kreuzungspunkten im Transportnetzwerk. Da die Optimierung jedoch einerseits Rechenzeit erfordert und andererseits die Tour durch den Routenzugfahrer ausgeführt werden muss, sind eine gewisse Vorlaufzeit und Planbarkeit der Entscheidungen zu berücksichtigen. Daher wird eine Anpassung der Tourenreihenfolge nur direkt nach der Bereitstellung eines vorhergehenden Transportauftrags oder zum Tourenstart empfohlen. Die dynamische Wegfindung während der Tour kann jedoch, sofern die Informationen dem Fahrer z. B. mittels eines Navigationssystems transparent zur Verfügung gestellt werden, permanent während der Tour erfolgen. Neben technischen Hilfsmitteln zur Informationsbereitstellung sind dafür jedoch zusätzliche Trackingsysteme im Transportnetzwerk zu installieren. Mögliche Umsetzungen eines solchen Navigationssystems für innerbetriebliche Routenzüge wurden bereits durch *Hormes et al.* (vgl. [Hor-2019]) vorgestellt.

Die dynamischen Wege zwischen zwei Klienten werden durch die Lösung des Dijkstra-Algorithmus und einer Rückrechnung der Vorgängerknoten auf der Tiefebene des Transportnetzwerks bestimmt. Die Kantengewichte der Tiefebene $c_{(i,j),T,basis}$ basieren auf der zurückzulegenden Wegstrecke einer Kante $d_{(i,j)}$ sowie der Fahrtgeschwindigkeit eines Routenzugs v_{Zug} (siehe Formel (6-9)):

$$c_{(i,j),T,basis} = \frac{d_{(i,j)}}{v_{Zug}} \quad (6-9)$$

Die Kosten einer Kante entsprechen somit einer geplanten Zeit, die zum Passieren der Kante erforderlich ist. Aufgrund der Interaktion mit anderen Routenzügen im System, die z. B. gerade Ladungsträger an einem Klienten bereitstellen, kann es jedoch zu einer Verlängerung dieser Zeit und damit zu erhöhten Kantengewichten kommen. Da die Routenzüge durch Routenzugfahrer bedient werden und Interaktionen mit anderen Fahrzeugen möglich sind, ist der Tourenverlauf nicht deterministisch vorhersagbar, sondern kann nur prognostiziert werden.

Für die Berücksichtigung des Verkehrs als dynamische Kosten der Tiefebene des Transportnetzwerks werden im Folgenden drei Ansätze vorgestellt (siehe Abbildung 6-34). Diese können individuell oder in beliebiger Kombination miteinander verwendet werden. Zwei Ansätze erweitern die Kosten der Fahrwege durch die Berücksichtigung von Staus. Stau bedeutet in dieser Arbeit, dass ein Routenzug aufgrund der Blockade durch einen anderen Routenzug stehen bleiben muss. Die Standzeiten der Routenzüge im Routenzugsystem werden dabei entweder in einer Historie erfasst oder für den aktuellen Zustand ausgewertet. Beim dritten Ansatz, der Flussrate, werden für jede Kante die Nutzungshäufigkeit gemessen und die Kosten der Kanten dazu in Relation gesetzt. Ein globales Optimum der Wegfindung aller Transportressourcen könnte durch ein zeitenfensterbasiertes Routing erfolgen. Beim Betrieb eines Routenzugsystems mit dem Menschen als Fahrer ist die Einhaltung von Zeitfenstern für jedes Element des Transportnetzwerks jedoch schwierig umsetzbar und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Für ein rein automatisch betriebenes System ist eine zeitenfensterbasierte Wegfindung jedoch durchaus denkbar (siehe Abschnitt 9.3).

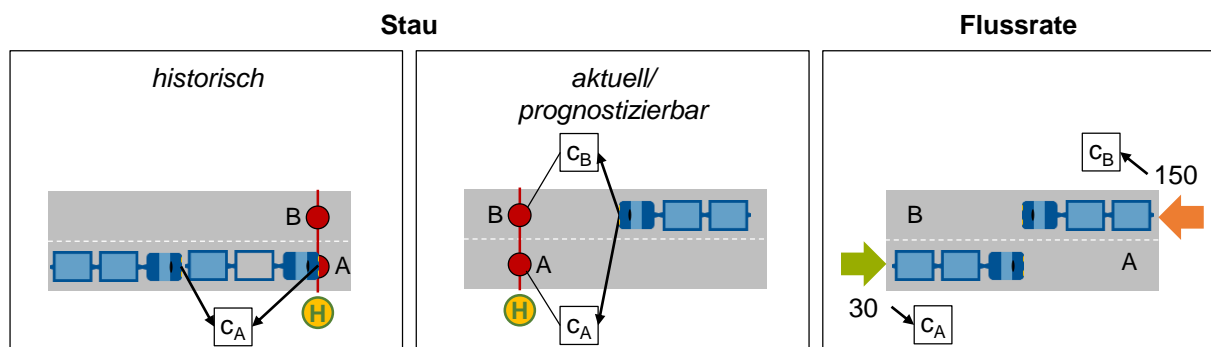


Abbildung 6-34: Prinzipien der Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens in den dynamischen Kosten der Kanten der Tiefebene des Transportnetzwerks

Bei der historischen Berücksichtigung von Stau werden alle Zeitspannen erfasst, in denen ein Routenzug auf einer Kante der Tiefebene stillsteht. Dies ist dann der Fall, wenn ein Routenzugfahrer Ladungsträger an einem Klienten bereitstellt. Erfolgt die Bereitstellung von der gegenüberliegenden Spur, können auch weitere Routenzüge an der Durchfahrt gehindert werden und daher stillstehen. Des Weiteren kann ein Routenzug blockiert werden, wenn er anderen Routenzügen an einer Kreuzung Vorfahrt gewährt oder auf einen bereits stehenden Zug auffährt und kein Überholen möglich ist. Pro Kante werden die Stillstandzeiten erfasst und nach jedem Ereignis mit den Kantenkosten verrechnet, indem die durchschnittliche Stillstandzeit mit einem Faktor f_h zu den Basiskosten $c_{(i,j),T,basis}$ addiert wird (siehe Formel (6-10)):

$$c_{(i,j),T} = c_{(i,j),T,basis} + f_h \cdot \bar{t}_{(i,j),T,Stillstand} \quad (6-10)$$

Des Weiteren kann Stau berücksichtigt werden, indem nur die aktuellen Blockaden durch bereitstellende Routenzüge erfasst werden. Da das Hindernis bei der eigentlichen Nutzung einer Kante jedoch bereits aufgehoben sein kann, werden im zweiten Ansatz die Stillstandzeiten zusätzlich prognostiziert. Dies geschieht, indem die nächste Bereitstellung aller aktiven Routenzüge die Kantenkosten an den jeweiligen Haltepunkten der Klienten bis zum Ende deren Bereitstellung erhöht. Dabei wird davon ausgegangen, dass Bereitstellungen einer Tour zeitnah aufeinander erfolgen. Die Kosten der durch die prognostizierten Bereitstellung betroffenen Kanten ergeben sich dann nach Formel (6-11) unter der Berücksichtigung eines Gewichtungsfaktors f_p :

$$c_{(i,j),T} = c_{(i,j),T,basis} + f_p \cdot t_{(i,j),T,P(Stillstand)} \quad (6-11)$$

Durch die Flussrate wird die Nutzungshäufigkeit einer Kante gemessen. Je öfter eine Kante genutzt wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Routenzüge auf dieser Kante begegnen. Durch eine Berücksichtigung der Flussrate in den Kosten des Transportnetzwerks wird versucht, die Kanten und damit die Fahrwege in der Produktionsversorgung gleichmäßiger auszunutzen und häufig genutzte Spuren zu entlasten. Fährt ein Fahrzeug auf eine Kante, erhöht sich deren Nutzungshäufigkeit um eins. Bei jeder Anpassung der Nutzungshäufigkeit einer Kante des Transportnetzwerks wird die Gewichtung der Flussrate f_r bei der Kostenbestimmung angepasst, indem die minimale und maximale Nutzungshäufigkeit im Transportnetzwerk ermittelt wird. Bei der Berechnung der Wegfindung werden die aktuellen Kantenkosten dann nach Formel (6-12) berücksichtigt mit dem Gewichtungsfaktor f_{fr} :

$$c_{(i,j),T} = c_{(i,j),T,basis} \cdot \left(1 + f_{fr} \cdot \frac{f_r(i,j) - f_{r_{min}}}{f_{r_{max}} - f_{r_{min}}} \right) \quad (6-12)$$

Eine höhere relative Nutzung einer Kante führt deshalb zu höheren Kosten und einer geringeren Wahrscheinlichkeit, bei der Wegfindung gewählt zu werden.

Die Berücksichtigung dynamischer Kosten bei der Reihenfolgebildung und Wegfindung kann nur zu einer verbesserten Tour führen, wenn das zugrunde liegende Transportnetzwerk die Flexibilität aufweist, alternative Wege zwischen zwei Klienten zu ermöglichen. Zudem ist ein hoher Aufwand erforderlich, um das Tracking und die Navigation der Routenzüge zu realisieren. Um das Potential der Reihenfolge- und Wegoptimierung während der Tour abzuschätzen, werden Simulationsexperimente auf dem flexiblen Layout *Werkstatt* mit einer dynamischen Steuerungsstrategie, aber ohne Intra-tour-Optimierung durchgeführt. Die Experimente betrachten eine GLT-Produktionsversorgung bei unterschiedlichem Durchsatz und variierenden Zwischenabrufzeiten von kurzen Routenzügen. In Abbildung 6-35 sind die durchschnittlichen sowie

minimalen und maximalen Mittelwerte aller Beobachtungen der Zykluszeit, Fahrtzeit sowie Stauzeit einer Tour in Abhängigkeit der eingesetzten Routenzüge dargestellt. Gerade beim effizienten Systembetrieb mit wenig Zügen entsteht kaum Stau im Routenzugsystem. Zudem werden in der Hälfte der von *Lieb et al.* erfassten Routenzugsystemen maximal fünf Routenzüge eingesetzt (vgl. [Lie-2017a, S. 49]). Je mehr Züge zur Produktionsversorgung eingesetzt werden, desto öfter kommt es zu gegenseitigen Behinderungen und desto höher fällt die Stillstandzeit und daher auch die durchschnittliche Zykluszeit einer Tour aus. Da die durchschnittliche Fahrtzeit einer Tour unabhängig von der Anzahl der eingesetzten Routenzüge ist, erhöht sich der Anteil der Stauzeit an der gesamten Zykluszeit einer Tour bei einem Einsatz von mehr Routenzügen. Dennoch ist der Zykluszeitanteil der mittleren Stillstandzeiten einer Tour aufgrund von Staus gering im Vergleich zur gesamten Fahrtzeit. Eine Intratour-Optimierung kann demnach nur eine geringe Verbesserung der Systemleistung bei hohem Implementierungsaufwand erreichen. Aus diesen Gründen wird die dynamische Kostenberücksichtigung in den Steuerungsstrategien dieser Arbeit nicht standardmäßig berücksichtigt. Trotzdem werden die drei entwickelten Ansätze in einem Exkurs in Anhang F hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Staureduzierung und Systemeffizienz bewertet.

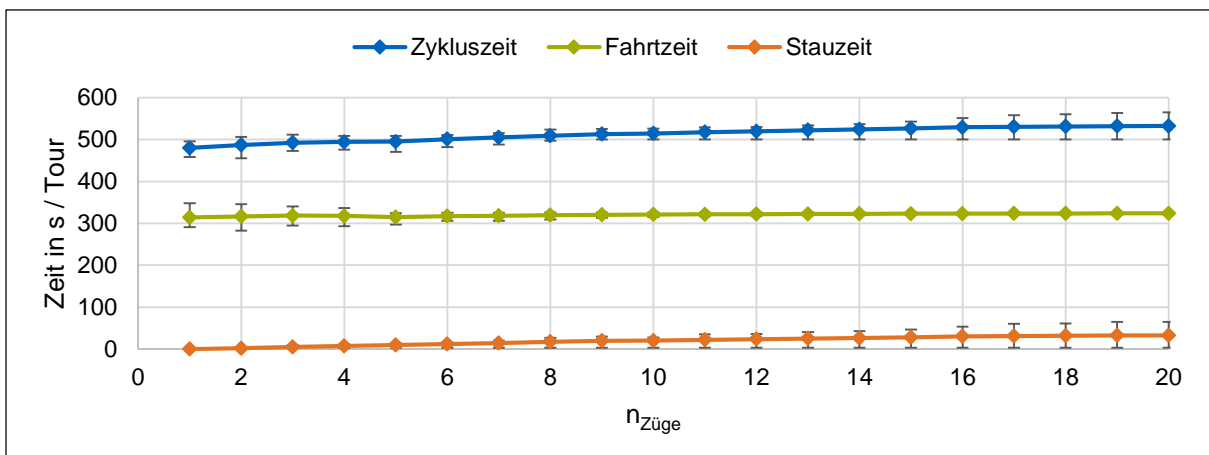


Abbildung 6-35: Durchschnittliche Mittelwerte sowie Minima und Maxima der Zykluszeit, Fahrtzeit und Stauzeit je Tour in Abhängigkeit der im Routenzugsystem eingesetzten Züge

6.3 Ableitung von dynamischen Steuerungsstrategien

Eine Steuerungsstrategie für ein Routenzugsystem ergibt sich als Kombination der vorgestellten Modulausprägungen. Je nach Dynamik der in die Strategie integrierten Ausprägungen ergeben sich unterschiedliche Dynamisierungsgrade für eine Steuerungsstrategie. Wie in Abschnitt 6.2.6 erläutert, wird die Optimierung der Reihenfolge und des Fahrwegs während der Tour auf Basis dynamischer Kosten in den Steuerungsstrategien aufgrund des geringen Aufwand-Nutzenverhältnisses und, um die

Varianz der betrachteten Steuerungsstrategien zu reduzieren, nicht weiter berücksichtigt. Deshalb werden die in Abbildung 6-36 zusammengefassten Modulausprägungen innerhalb der Steuerungsstrategien dieser Arbeit verwendet.

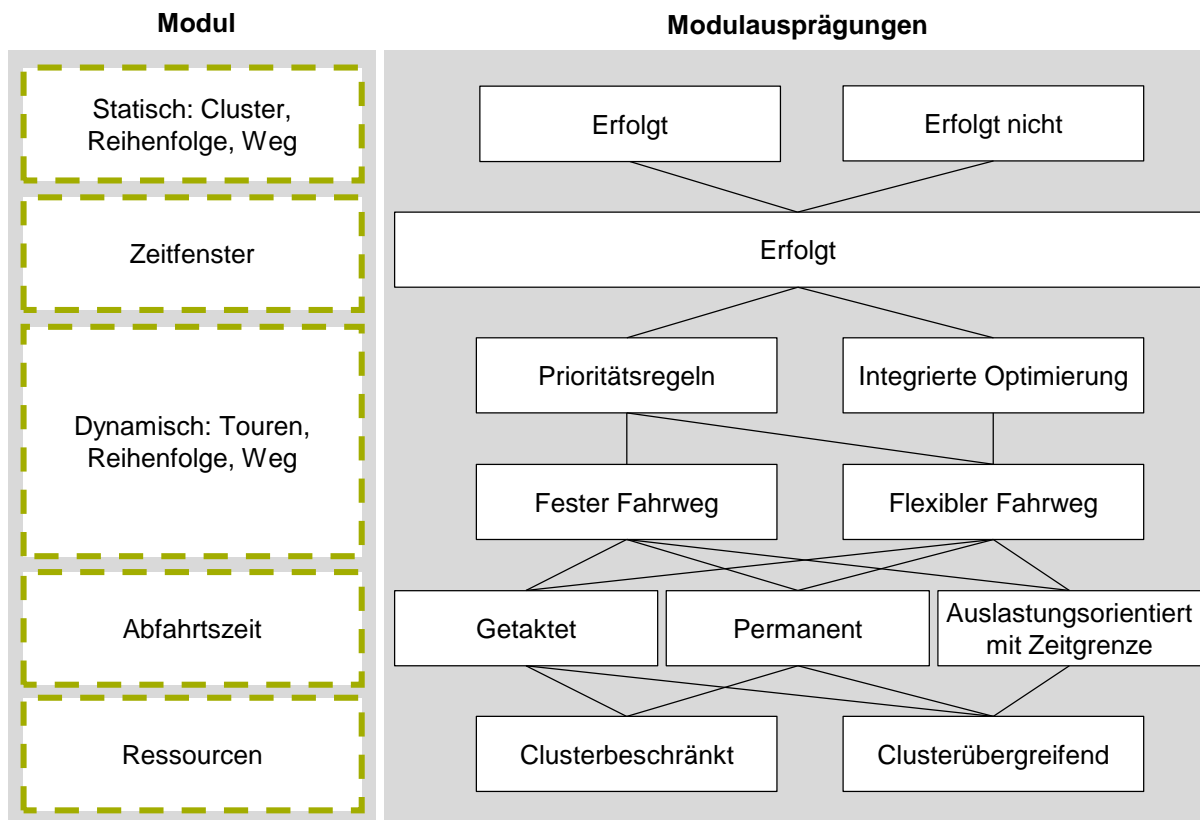


Abbildung 6-36: Modulausprägungen der Steuerungsstrategien der Routenzugsysteme in dieser Arbeit

Im ersten Modul *Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg* (siehe Abschnitt 6.2.1) werden optional feste Routen zur Produktionsversorgung definiert. Je nach Steuerungsstrategie sind die Ergebnisse des Moduls nicht notwendig, weshalb keine statischen Festlegungen durch dieses Modul erfolgen müssen.

Das Modul *Zeitfenster* (siehe Abschnitt 6.2.2) ist wesentlicher Bestandteil jeder dynamischen Steuerungsstrategie. Die Ausgestaltung des Moduls ist je nach Strategie einheitlich, weshalb keine Modulausprägungen unterschieden werden.

Beim Modul *Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg* (siehe Abschnitt 6.2.3) werden sowohl Prioritätsregeln von einer integrierten Optimierung als auch feste von flexiblen Fahrwegen unterschieden. Findet die gemeinsame Optimierung aller Entscheidungen in diesem Modul statt, werden immer flexible Fahrwege verwendet. Bei Prioritätsregeln können auch die im ersten Modul bestimmten festen Fahrwege als Grundlage der Touren genutzt werden.

Die Ausprägungen des Moduls *Abfahrtszeit* (siehe Abschnitt 6.2.4) werden in getaktet, permanent und auslastungsorientiert mit Zeitgrenze unterteilt. Während die letzten beiden dynamischeren Modulausprägungen in Verbindung mit allen Strategien eingesetzt werden können, erfordert die Festlegung eines statischen Takts die vorherige Definition von statischen Routen sowie die Verwendung von Prioritätsregeln. Durch die Berücksichtigung der Zeitfenster schränkt ein Takt die integrierte Optimierung der Entscheidungen zur Festlegung von Touren zu sehr ein. Deshalb werden diese beiden Ausprägungen nicht in einer gemeinsamen Strategie kombiniert.

Durch das Modul *Ressourcen* (siehe Abschnitt 6.2.5) werden die Züge in allen Strategien den Touren dynamisch nach Verfügbarkeit zugeteilt. Durch statische Entscheidungen können die verfügbaren Ressourcen auf einzelne Cluster beschränkt werden. Alternativ können alle Transportressourcen clusterübergreifend allen Touren zugeteilt werden.

Unter der Berücksichtigung der beschriebenen Restriktionen ergeben sich durch die Kombination der Merkmalsausprägungen 18 unterschiedliche Steuerungsstrategien (siehe Tabelle 6-3), die im weiteren Verlauf der Arbeit in Verbindung mit den identifizierten Routenzugreferenzsystemen (siehe Abschnitt 4.3) hinsichtlich ihrer Effektivität und Effizienz bei einer robusten Produktionsversorgung untersucht werden. Der Dynamisierungsgrad dieser Steuerungsstrategien variiert in Abhängigkeiten der Ausprägungen der integrierten Modulausprägungen. Die Strategien sind in aufsteigender Reihenfolge von S01 nach S18 nach ihrem qualitativen Dynamisierungsgrad sortiert. Jedoch ist der Dynamikunterschied zwischen zwei Steuerungsstrategien aufgrund der verschiedenen Dimensionen der Dynamik (siehe Abschnitt 3.1.3) häufig nicht trennscharf. Daher wird keine quantitative Bewertung der Gesamtdynamik einer Strategie vorgenommen.

Die Steuerungsstrategie S01 entspricht der Kombination der aktuell am häufigsten in realen Routenzugsystemen eingesetzten Merkmalsausprägungen (vgl. [Lie-2017a, S. 41 ff./ 63 ff.]). Daher wird diese relativ statische Strategie als Referenzstrategie für die Bewertung der anderen dynamischeren Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme ausgewählt.

Tabelle 6-3: *Übersicht der Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme mit unterschiedlichem Dynamisierungsgrad*

Steuerungsstrategie	Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg	Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg	Abfahrtszeit	Ressourcen
S01	Erfolgt	Prioritätsregeln Fester Fahrweg	Getaktet	Clusterbeschränkt
S02	Erfolgt	Prioritätsregeln Fester Fahrweg	Getaktet	Clusterübergreifend
S03	Erfolgt	Prioritätsregeln Flexibler Fahrweg	Getaktet	Clusterbeschränkt
S04	Erfolgt	Prioritätsregeln Flexibler Fahrweg	Getaktet	Clusterübergreifend
S05	Erfolgt	Prioritätsregeln Fester Fahrweg	Permanent	Clusterbeschränkt
S06	Erfolgt	Prioritätsregeln Fester Fahrweg	Permanent	Clusterübergreifend
S07	Erfolgt	Prioritätsregeln Flexibler Fahrweg	Permanent	Clusterbeschränkt
S08	Erfolgt	Prioritätsregeln Flexibler Fahrweg	Permanent	Clusterübergreifend
S09	Erfolgt	Prioritätsregeln Fester Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterbeschränkt
S10	Erfolgt	Prioritätsregeln Fester Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterübergreifend
S11	Erfolgt	Prioritätsregeln Flexibler Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterbeschränkt
S12	Erfolgt	Prioritätsregeln Flexibler Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterübergreifend
S13	Erfolgt	Int. Optimierung Flexibler Fahrweg	Permanent	Clusterbeschränkt
S14	Erfolgt	Int. Optimierung Flexibler Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterbeschränkt
S15	Erfolgt	Int. Optimierung Flexibler Fahrweg	Permanent	Clusterübergreifend
S16	Erfolgt	Int. Optimierung Flexibler Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterübergreifend
S17	Erfolgt nicht	Int. Optimierung Flexibler Fahrweg	Permanent	Clusterübergreifend
S18	Erfolgt nicht	Int. Optimierung Flexibler Fahrweg	Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze	Clusterübergreifend

7 Evaluation der Steuerungsstrategien im Hinblick auf die Routenzugreferenzsysteme

In diesem Kapitel werden die Anwendung sowie die Auswirkungen der Steuerungsstrategien in den Routenzugreferenzsystemen evaluiert. Dazu werden zunächst in Abschnitt 7.1 die Zielgrößen der Untersuchungen sowie die ereignisdiskrete Simulation als Methodik vorgestellt. Anschließend werden Versuchsplan und -durchführung entwickelt (Abschnitt 7.2). Auf Basis der durchgeführten Experimente wird die Formalisierung der Routenzugsysteme verifiziert (Abschnitt 7.3). Schließlich erfolgt zur Beantwortung der zweiten Forschungsunterfrage ein Vergleich der Effektivität und Effizienz der entwickelten Steuerungsstrategien (Abschnitt 7.4). Des Weiteren wird in Abschnitt 7.5 die dritte Forschungsunterfrage beantwortet, indem wesentliche Einflussparameter auf die Effektivität und Effizienz je Strategie analysiert werden.

7.1 Zielgrößen und Methodik

Die Evaluation dient dazu, die entwickelten Konzepte der dynamischen Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme (siehe Kapitel 6) in Anwendung auf die Routenzugreferenzsysteme (siehe Kapitel 4) zu bewerten. Konkret werden dabei die Robustheit und Effizienz der Routenzugsysteme betrachtet, um die Hauptforschungsfrage dieser Arbeit zu beantworten. Des Weiteren werden die Auswirkungen des Dynamisierungsgrads der Steuerungsstrategien auf die Effektivität und Effizienz der Produktionsversorgung untersucht (Zweite Forschungsunterfrage) und die Einflüsse der Systemausprägungen auf die Effektivität und Effizienz der dynamischen Steuerungsstrategien analysiert (Dritte Forschungsunterfrage).

Hauptkriterium der Bewertung in der Evaluation ist die Effizienz des Routenzugsystems bei einer robusten Produktionsversorgung. Eine robuste Produktionsversorgung ist in der Lage, auch kurzfristige Änderungen der Transportbedarfe stabil, d. h. ohne die Entstehung eines Materialengpasses in der Produktion, zu bedienen. Die Effizienz wird durch die beiden Zielgrößen Anzahl eingesetzter Züge sowie benötigter Umlaufbestand gemessen. Je weniger dieser beiden Ressourcen für die robuste Versorgung benötigt werden, desto effizienter ist der Systembetrieb (siehe Abschnitt 1.3).

Gerade im Zusammenhang mit einer JIT-Versorgung ist die Reduzierung des WIP ein Hauptziel der Materialbereitstellung [Emd-2017]. Daneben bestehen in einer Steigerung der Versorgungssicherheit und einer erhöhten Kapazitätsauslastung sowie einer

Reduzierung der Verkehrsstaus im Transportnetzwerk die höchsten Erwartungen an dynamische Steuerungsstrategien (siehe Abbildung 1-2, S. 5).

Daher werden im weiteren Verlauf zusätzlich die Auswirkungen der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung sowie die Stauzeiten der Touren analysiert. Eine hohe Kapazitätsauslastung der Ressourcen deutet auf einen effizienten Systembetrieb hin. Geringe Stauzeiten führen zum einen zu kürzeren Zykluszeiten und zum anderen zur besseren Einhaltung der Zeitfenster der Transportaufträge.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten zur Steuerung von Routenzugsystemen (vgl. z. B. [Kle-2017; Kle-2019]) zu ermöglichen, werden des Weiteren die Wiederbeschaffungszeiten je Strategie und Referenzsystem untersucht. Die Wiederbeschaffungszeit dient bei der Produktionsversorgung häufig als ein Maß der Reaktionsfähigkeit und Planbarkeit. Je geringer die durchschnittliche Wiederbeschaffungszeit ist, desto schneller kann auf kurzfristige Materialbedarfe reagiert werden. Je weniger die Wiederbeschaffungszeit variiert, desto konstanter und planbarer wird die Produktionsversorgung.

Um das komplexe zeitabhängige Verhalten der Routenzugsysteme in Kombination mit den entwickelten Steuerungsstrategien zu untersuchen, wird Simulation als Methode verwendet (siehe Abschnitt 5.1). Dadurch können dynamische Faktoren, wie z. B. die Interaktion der Transportressourcen, stochastisch variierende Zykluszeiten und kurzfristige Transportbedarfe, innerhalb des Systembetriebs abgebildet werden. Nach *Eley* sind besonders ereignisdiskrete Simulationsmodelle für die Untersuchung logistischer Systeme geeignet. Hierbei werden Aktivitäten im Zeitverlauf durch Ereignisse ausgelöst oder beendet. Diese Zufallsereignisse werden durch Pseudo-Zufallszahlen beeinflusst [Ele-2012, S. 8 ff./ 23 ff.]. Dadurch können einerseits für jede Steuerungsstrategie die gleichen Transportaufträge erzeugt und untersucht werden. Andererseits können vielfältige Zufallsereignisse je Szenario durch verschiedene Startwerte der Zufallszahlenströme berücksichtigt werden.

Die ereignisdiskrete Simulation wurde in Bezug auf Routenzugsysteme bereits von einigen Autoren mit unterschiedlichen Zielstellungen angewandt. *Williams et al.* untersuchen die Ressourcenauslastung in der Materialbereitstellung eines Presswerks in der Automobilindustrie mittels dynamischer Simulation (vgl. [Wil-2006]). *Raposo et al.* präsentieren die Entwicklung eines Routenzug-Simulationsmodells, mit dem Systemkonfigurationen verglichen werden, um das reale System nach Lean-Aspekten zu verbessern (vgl. [Rap-2009]). *Wiegel et al.* kombinieren den Materialverbrauchs- und Milkrun-Prozess in einem gemeinsamen Simulationsmodell, um die Systemdimensionierung zu überprüfen (vgl. [Wie-2013]). *Staab et al.* untersuchen die Effizienz und das

Verkehrsverhalten in Routenzugsystemen in der Automobilindustrie durch ereignisdiskrete Simulation (vgl. [Sta-2013a; Sta-2013b; Sta-2016; Sta-2015]). *Korytkowski und Karkoszka* betrachten den Einfluss von Störungen, wie z. B. Zeitverzug in der Materialbereitstellung, auf die Stabilität des Routenzugsystems mittels Simulation (vgl. [Kor-2016]). *Fedorko et al.* entwickeln ein Simulationsmodell, um kritische Bereiche in der Materialbereitstellung mittels eines automatischen Routenzugsystems zu identifizieren (vgl. [Fed-2018]). *Klenk und Galka* verwenden ereignisdiskrete Simulation, um den Einfluss von dynamischen Abfahrtszeitstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit in Routenzugsystemen zu analysieren (vgl. [Kle-2019]). *Pawlewski* sowie *Kluska und Hoffa-Dąbrowska* präsentieren schließlich die Auswahl eines geeigneten Simulationsprogramms sowie die Implementierung eines Routenzugsystems in einem Simulationsmodell (vgl. [Paw-2018; Klu-2019b]). Des Weiteren wird die Simulation bei der Materialbereitstellung empfohlen, um negative Effekte von Transportbedarfsschwankungen untersuchen zu können (vgl. [Kil-2015]).

Zur Umsetzung eines generischen Routenzugsystems, mit dem alle relevanten Systemausprägungen der Referenzsysteme abgebildet werden können, sowie der entwickelten Steuerungsstrategien dient in dieser Arbeit die ereignisdiskrete Simulationsumgebung Plant Simulation. Diese eignet sich aufgrund der Objektorientierung sowie des Vererbungsprinzips besonders gut für einen modularen Aufbau. Über eine zentrale Eingabemaske im Simulationsmodell können die unterschiedlichen Parameterkonfigurationen vorgegeben werden. Mit dem entwickelten Simulationsmodell können generische Routenzugsysteme für das 1-Depot VRPTW mit homogener Flotte untersucht werden. Der Aufbau und Hauptbestandteile der entwickelten generischen Simulationsumgebung für Routenzugsysteme sind in Anhang G beschrieben.

7.2 Versuchsplan und -durchführung

Die in dieser Arbeit modellierten Routenzugsysteme und Steuerungsstrategien weisen zahlreiche Parameter auf, die für ein Simulationsexperiment variiert werden können. Um den Aufwand des Versuchsplans einzuschränken, wurden die Steuerungsstrategien bereits in Abschnitt 6.2 parametrisiert. Parameter, die im Versuchsplan berücksichtigt sind, werden als Faktoren bezeichnet. Je mehr Faktoren in einem Versuchsplan enthalten sind, desto höher ist dessen Aufwand. Jeder Faktor unterteilt sich in mindestens zwei Stufen, die im Rahmen des Versuchsplans variiert werden [Sie-2017, S. 5 ff.].

Zur Evaluation der Steuerungsstrategien werden in dieser Arbeit verschiedene Faktoren untersucht. Einerseits werden die Routenzugreferenzsysteme durch die Faktoren

Layout sowie Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik im Versuchsplan berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.3). Andererseits werden die achtzehn entwickelten Steuerungsstrategien unterschieden (siehe Abschnitt 6.3). Des Weiteren werden die Systemlast und die Schwankungen der Zwischenabrufzeiten je Klienten variiert. Hinsichtlich der Systemlast werden die Stufen Niedrig (10 LT/h), Mittel (50 LT/h) und Hoch (100 LT/h) verglichen (vgl. [Lie-2017a, S. 49]). Die unterschiedlichen Transportbedarfsschwankungen ergeben sich durch verschiedene Variationskoeffizienten der Zwischenabrufzeiten eines Klienten. Dabei werden keine ($c = 0$) von niedrigen ($c = 0,25$) und hohen ($c = 0,5$) Schwankungen unterschieden (siehe Abschnitt 5.2.2). Als zusätzliche Faktoren werden die Anzahl der zu versorgenden Klienten und die Länge der Routenzüge berücksichtigt. Eine hohe Anzahl ($n = 50$) an zu versorgenden Klienten mit jeweils einer zugehörigen Haltestelle erhöht die Möglichkeiten der Tourenbildung im Vergleich zu Routenzugsystemen mit einer geringen ($n = 10$) Anzahl an Klienten (vgl. [Gol-2013, S. 133]). Die räumliche Verteilung der Klienten und Haltestellen in den Layouts der Transportnetzwerke ist in Anhang B dargestellt. Durch eine unterschiedliche Länge der Routenzüge, die durch die Anzahl der Anhänger variiert wird, ergeben sich verschiedene Transportkapazitäten für eine Tour. Durch längere Routenzüge ($n_{Anhänger} = 4$) ist der Bündelungseffekt des Routenzugsystems höher als bei Systemen mit kürzeren Routenzügen ($n_{Anhänger} = 1$) (siehe Abschnitt 5.2.3). In Tabelle 7-1 sind die Faktoren und Stufen des Versuchsplans zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Faktoren und Stufen des Versuchsplans

Faktor	Anzahl Stufen	Stufen
Layout	3	Rundkurs, Montage, Werkstatt
Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik	6	GLT - Schubkonzept Integriert LM Schubkonzept Integriert RZF Transportwagen Entkoppelt Transportwagen Integriert KLT - Transportwagen Entkoppelt Transportwagen Integriert
Systemlast	3	Niedrig (10 LT/h), Mittel (50 LT/h), Hoch (100 LT/h)
Schwankungen der Zwischenabrufzeiten je Klienten	3	Keine ($c = 0$), Niedrig ($c = 0,25$), Hoch ($c = 0,5$)
Anzahl Klienten	2	Niedrig ($n = 10$), Hoch ($n = 50$)
Routenzuglänge	2	Kurz ($n_{Anhänger} = 1$), Lang ($n_{Anhänger} = 4$)
Steuerungsstrategie	18	S01 bis S18

Durch die Untersuchung der Faktoren und Faktorstufen in einem vollständigen Versuchsplan ergeben sich $3 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 18 = 11.664$ zu betrachtende Szenarien, in 162

denen die Routenzugreferenzsysteme durch die ersten beiden Faktoren abgebildet sind (siehe Abschnitt 4.3). Für jedes Szenario wird in Simulationsexperimenten ermittelt, wie hoch der Ressourceneinsatz ist, um eine robuste Produktionsversorgung sicherzustellen. Dazu wird in Abhängigkeit der eingesetzten Züge u. a. der erforderliche WIP bestimmt. Eine Versorgungssicherheit von 100 % wird als Randbedingung eines Simulationslaufs gesetzt. Pro Experiment wird die Anzahl an Routenzügen fixiert. Um ein stabiles Routenzugsystem über die Zeit zu garantieren, werden in der Simulation im Falle eines simulierten Engpasses zusätzlicher WIP erzeugt und die davon abhängigen Systemparameter, z. B. Zeitfenster der Transportaufträge, aktualisiert.

Die beiden Zielparameter WIP und Anzahl der Routenzüge beeinflussen sich gegenseitig. Tendenziell gilt folgender Zusammenhang: Je weniger Züge verwendet werden, desto höher ist der notwendige WIP. Je niedriger der zulässige WIP ist, desto mehr Züge sind für die robuste Produktionsversorgung eines Szenarios erforderlich. Je nach Anforderungen an ein Routenzugsystem können der WIP oder die Anzahl der einzusetzenden Transportmittel der effizienzbeschränkende Parameter sein. Deshalb werden für jedes Szenario der notwendige WIP für eine Bandbreite von verwendeten Routenzügen in Abhängigkeit der Systemlast simuliert. Aufgrund von durchgeführten Testsimulationen werden für eine niedrige Systemlast der Einsatz von 1 bis 10, für eine mittlere Systemlast 1 bis 14 und für eine hohe Systemlast 1 bis 20 langen Routenzügen bewertet. Bei der Untersuchung von kurzen Routenzügen werden jeweils 1 bis 20 Transportmittel simuliert. Daraus ergeben sich insgesamt 192.456 durchzuführende Simulationsexperimente.

Ein Simulationslauf eines Experiments hängt von zufälligen Ereignissen ab. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss deshalb eine statistische Unsicherheit berücksichtigt werden. Diese Unsicherheit kann durch die Wiederholung eines Experiments mit mehreren unabhängigen Beobachtungen reduziert werden [VDI-3633a]. *Law und McComas* empfehlen, mindestens drei bis fünf unabhängige Beobachtungen, die durch eine Variation der Startwerte der Zufallszahlenreihen erreicht werden, durchzuführen [Law-1991]. Die Ergebnisse der Beobachtungen eines Experiments ergeben eine Stichprobe für den Mittelwert der Ergebnisse der Grundgesamtheit. Unter der Berücksichtigung eines Konfidenzniveaus kann schließlich das Konfidenzintervall für den wahren Mittelwert der Grundgesamtheit bestimmt werden. Je mehr Beobachtungen durchgeführt werden, desto enger wird der wahre Mittelwert im Konfidenzintervall eingegrenzt (vgl. [Ele-2012, S. 26 ff.]). In dieser Arbeit werden der Empfehlung von *Law und McComas* (vgl. [Law-1991]) folgend fünf Beobachtungen je Simulationsexperiment durchgeführt. Dadurch ergeben sich insgesamt 962.280 Simulationsläufe. Zur Bewertung der Ergebnisse wird ein Konfidenzniveau von 90 % verwendet.

Neben der Anzahl an Beobachtungen werden die Ergebnisse einer Simulation durch die Laufzeit der Beobachtung beeinflusst. Diese ist zum einen so zu wählen, dass das System eingeschwungen ist (vgl. [Gut-2017, S. 184 ff.]). Die untersuchten Routenzugsysteme sind eingeschwungen, wenn sich der WIP auf einem konstanten Niveau eingependelt hat. Zum anderen müssen ausreichend Ereignisse, insbesondere Touren, erfolgt sein, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Ein Simulationslauf bildet in dieser Arbeit eine Zeit von einer Arbeitswoche (5 Arbeitstage) mit drei Schichten pro Tag à acht Stunden nach. Die Zeit eines Simulationslaufs beträgt folglich 120 Stunden. Pausenzeiten oder Schichtwechsel werden nicht berücksichtigt. Zum Start eines Simulationslaufs werden die Behälterfüllmengen des initialen WIP zufällig bestimmt.¹⁶

Zur Verdeutlichung der Auswertung sind in Abbildung 7-1 Simulationsergebnisse eines Routenzugsystem-Szenarios¹⁷ dargestellt. Für jede Steuerungsstrategie ergibt sich in Abhängigkeit der Anzahl an eingesetzten Routenzügen ein Konfidenzintervall für den im Mittel notwendigen WIP, um eine robuste Produktionsversorgung zu garantieren.

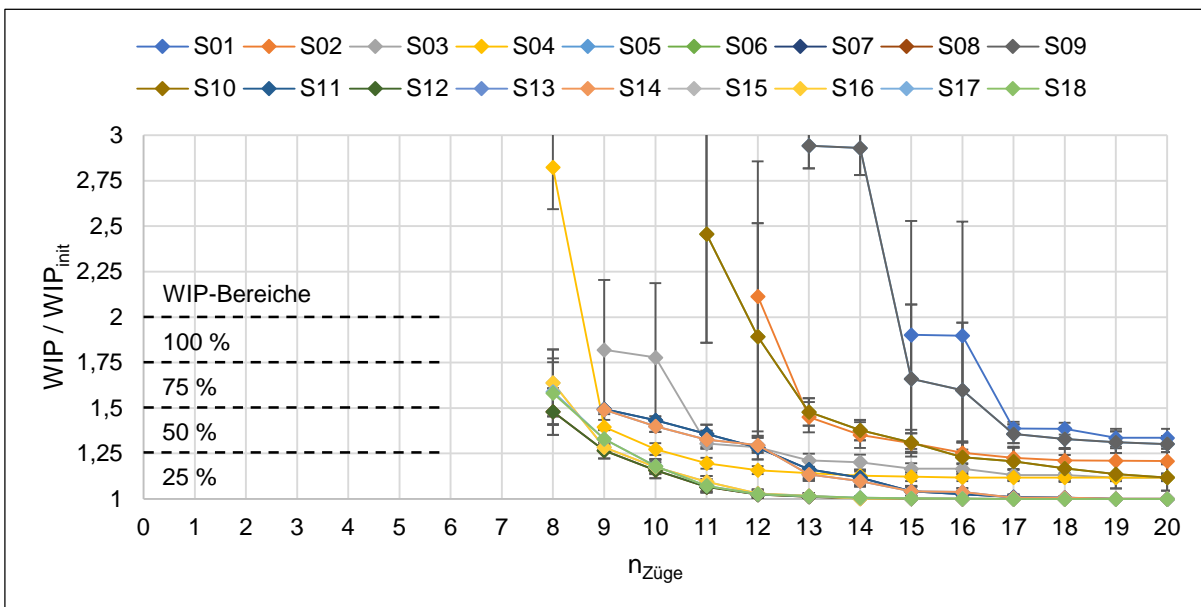


Abbildung 7-1: Exemplarische Ergebnisse der Hauptzielgrößen für die Bewertung der Effizienz eines Routenzugsystem-Szenarios

Der initiale WIP ergibt sich durch zwei Bereitstelleinheiten je Klienten gemäß eines Zwei-Behälter-Kanban. Übersteigt der WIP in einem Simulationslauf den dreifachen initialen WIP, wird die Lösung als instabil bewertet. Im Beispiel sind über alle Strategien gesehen mindestens acht Transportmittel mit einer Transportkapazität von einem

¹⁶ Die Simulationsläufe wurden auf Simulationsservern (max. Leistung je Server; Geschwindigkeit: 3,66 GHz, Kerne: 8, Logische Prozessoren: 16) des Lehrstuhls fml an der Technischen Universität München durchgeführt. In der Spitze wurden 720 Simulationsläufe parallel über ca. vier Monate ausgeführt. Die mittlere Rechenzeit eines Simulationslaufs beträgt damit ca. zwei Stunden.

¹⁷ Layout: Werkstatt; Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik: GLT – Transportwagen Integriert; Systemlast: Mittel; Schwankungen der Zwischenabrufrzeiten je Klienten: Hoch; Anzahl Klienten: Niedrig; Routenzuglänge: kurz

GLT notwendig, um eine robuste Produktionsversorgung zu ermöglichen. Je nach Steuerungsstrategie sind auch deutlich mehr Ressourcen für eine stabile Lösung notwendig. Jedoch ist für alle Steuerungsstrategien ersichtlich, dass der Einsatz von zusätzlichen Routenzügen zum gleichen oder weniger WIP im Routenzugsystem führt.

Die Auswahl einer Steuerungsstrategie für ein Einsatzszenario ergibt sich schließlich als Kompromiss hinsichtlich des Ressourceneinsatzes. Für die weitere Bewertung werden die Untersuchungsergebnisse in WIP-Bereiche eingeteilt. In jedem Bereich werden die Steuerungsstrategien hinsichtlich des minimalen Einsatzes von Routenzügen beurteilt und die effizientesten Steuerungsstrategien ausgewertet. Die Lösung einer Steuerungsstrategie für einen betrachteten Wert der eingesetzten Routenzüge ist dann in einem WIP-Bereich enthalten, wenn das Konfidenzintervall des erreichten WIP vollständig unter der oberen Grenze des jeweiligen WIP-Bereichs liegt. Im Folgenden werden die vier WIP-Bereiche 25 %, 50 %, 75 % und 100 % analysiert. Die Bezeichnung steht für den Zuschlag auf den initialen, minimalen WIP eines Routenzugsystems. Durch die Auswertung nach den Bereichen werden unterschiedliche Anforderungen an Routenzugsysteme hinsichtlich des zulässigen WIP berücksichtigt.

Vor der eigentlichen Bewertung der entwickelten Steuerungsstrategien erfolgt eine Verifikation der Systemmodellierung. Die Formalisierung der Routenzugreferenzsysteme erfolgte in Kapitel 5 unterteilt nach Transportnetzwerk, Transportbedarf, Transportressourcen und Zykluszeit. Im folgenden Abschnitt werden die Unterschiede, die sich durch die modellierten Systemausprägungen ergeben, durch Auswertungen der durchgeführten Simulationsexperimente verdeutlicht.

7.3 Verifikation der Systemmodellierung

7.3.1 Transportnetzwerk

Die Transportnetzwerke wurden als Knoten- und Kantenmodell auf verschiedenen Betrachtungsebenen modelliert. Unterschiedliche Merkmalsausprägungen der Produktionsorganisation beeinflussen das Layout des Transportnetzwerks. In Abschnitt 4.3 wurden deshalb drei Varianten präsentiert, die sich in der Flexibilität der möglichen Fahrweggestaltung unterscheiden. Das erste Layout bildet den in der *VDI-Richtlinie 5586* (vgl. [VDI-5586b]) beschriebenen *Rundkurs* einer Route von ca. 520 m nach. Die Routenzüge können diesen Rundkurs nur in eine Richtung befahren. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass die Routenzüge innerhalb einer Tour öfter zirkulieren. Neben diesem sehr restriktiven Transportlayout werden durch die Layoutvarianten *Montage* und *Werkstatt* zwei größere Transportnetzwerke modelliert. Die Ausmaße beider Layouts sind gleich, jedoch existieren im Layout *Werkstatt* mehr

Querverbindungen zwischen den Fahrwegen, wodurch flexiblere Transportwege gewählt werden können (siehe Anhang B).

Die Flexibilitätsunterschiede der Transportlayouts zeigen sich durch die gefahrene Distanz der simulierten Touren. In Abbildung 7-2 sind die Tourenlängen der drei Layouts in Kombination mit der betrachteten Anzahl an Haltestellen exemplarisch als Boxplots mit zusätzlichen Mittelwerten dargestellt. Die Werte basieren auf den Simulationsdaten einer Beobachtung der GLT-Produktionsversorgung¹⁸.

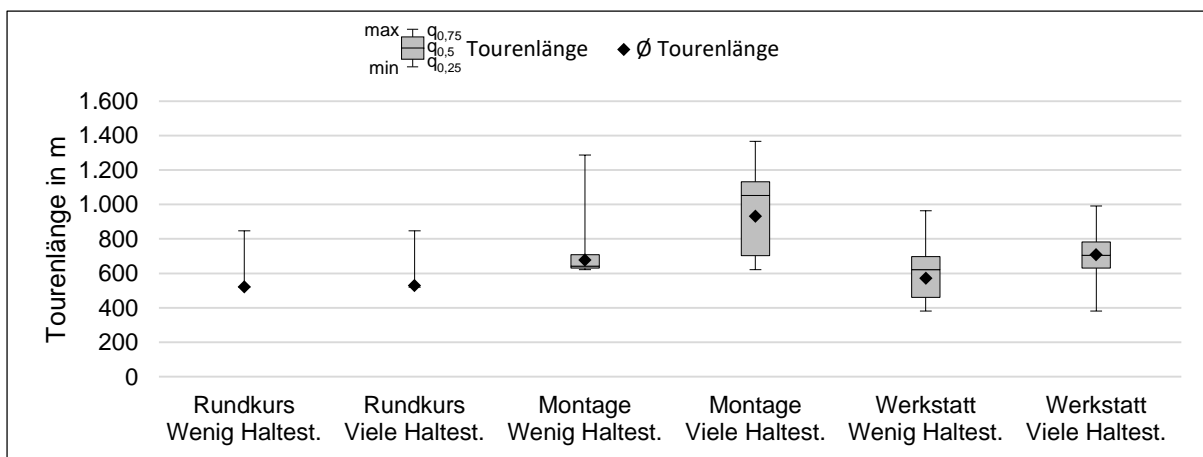


Abbildung 7-2: Tourenlänge in Abhängigkeit des Layouts und der Anzahl an Haltestellen

Die Auswertung zeigt, dass die Varianz der Tourenlänge beim Layout *Rundkurs* unabhängig von der Anzahl an Haltestellen gering ist. Die meisten Touren fahren eine Runde und kehren dann zur Quelle zurück. Jedoch treten auch doppelte Kreisfahrten auf. Dies kann der Fall sein, wenn ein Transportauftrag mit dringender und ein Transportauftrag mit weit entfernter spätester Bereitstellungszeit auf einer Tour kombiniert werden und der dringendere Auftrag weiter von der Materialflussquelle entfernt ist. Ebenfalls können Mehrfachkreisfahrten in einer Tour auftreten, wenn eine mögliche, aber nicht optimale Tour gebildet wird.

Beim Layout *Montage* können die gleichen Effekte dazu führen, dass gerade bei vielen Haltestellen im Transportnetzwerk sehr komplexe Tourenverläufe gebildet werden. Durch die Auswertung der Tourenlängen wird ersichtlich, dass sowohl die mittlere Länge als auch die Streuung der Tourenlänge in Richtung höherer Werte zunimmt, wenn das Layout viele Haltestellen enthält.

¹⁸ Je Kombination aus Layout und Anzahl an Haltestellen wurden die Optima des WIP-Bereichs 50 % ausgewertet. Das zugrundeliegende Szenario ist: Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik: GLT - TW Ent.; Systemlast: Mittel; Schwankungen der Zwischenabruflzeiten je Klienten: Niedrig; Zuglänge: lang; Steuerungsstrategie: S18

Durch die erhöhte Flexibilität in der Fahrwegbildung werden beim Layout *Werkstatt* kürzere Touren als beim Layout *Montage*, das die gleichen Ausmaße aufweist, gefahren. Dadurch erhöht sich die Reaktionsfähigkeit im Routenzugsystem. Dennoch nehmen auch hier die mittleren Tourenlängen mit einer höheren Anzahl an zu versorgenden Haltestellen zu. Jedoch konzentriert sich die Verteilung der Tourenlängen stärker um den Mittelwert.

Um den Einfluss der Layouts in Kombination mit der Anzahl an zu bedienenden Haltestellen über alle durchgeführten Simulationsläufe zu zeigen, sind in Tabelle 7-2 die mittleren, minimalen und maximalen durchschnittlichen Tourenlängen aller stabilen Experimente je Merkmalskombination aufgeführt. Die durchschnittlichen Tourenlängen eines Experiments ergeben sich wiederum als Mittelwert der durchschnittlichen Tourenlänge der fünf Beobachtungen eines Experiments.

Tabelle 7-2: \emptyset -Tourenlänge in Abhängigkeit des Layouts und der Anzahl an Haltestellen im Transportnetzwerk

Layout	Anzahl Haltestellen	\emptyset Tourenlänge in m		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
Rundkurs	10	520	520	575
	50	520	520	828
Montage	10	837	642	1.562
	50	948	649	1.624
Werkstatt	10	724	519	1.394
	50	854	532	1.578

Auch die Betrachtung aller stabilen Simulationsläufe bestätigt, dass die durchschnittliche Tourenlänge im Layout *Rundkurs* einerseits stabil und andererseits unabhängig von der Anzahl an bedienten Haltestellen ist. Lediglich die maximale durchschnittliche Tourenlänge nimmt bei einer höheren Anzahl an Haltestellen zu, da die Tourenoptimierung aufwendiger ist und deshalb mit einer höheren Wahrscheinlichkeit keine optimalen Lösungen gefunden werden. Dagegen steigt die mittlere Tourenlänge bei den Layouts *Montage* und *Werkstatt* mit zunehmender Anzahl an Haltestellen. Die höhere Flexibilität des Layouts *Werkstatt* wird durch die im Mittel kürzeren Touren bestätigt.

7.3.2 Transportbedarf

Wie in Abschnitt 5.2.2 erläutert, entstehen die Transportaufträge in den in dieser Arbeit betrachteten Routenzugsystemen durch den Abruf der Transportbedarfe der Klienten. Die Zwischenabrufzeiten des Materialbedarfs eines Klienten, die in einer getakteten Variantenproduktion entstehen, ähneln für eine unendliche Anzahl an Abrufen einer

Binomialverteilung. Über den Variationskoeffizienten lassen sich die Schwankungen der Zwischenabrufzeiten beschreiben. Je niedriger der Variationskoeffizient ist, desto niedriger sind diese Schwankungen. Zudem gilt, dass je öfter geringe Zwischenabrufzeiten auftreten, desto mehr Bedarfsspitzen müssen durch die Routenzugsystemsteuerung ausgeglichen werden. Des Weiteren wird die gesamte Systemlast eines Routenzugsystems in den Simulationsexperimenten gleichmäßig auf alle zu versorgenden Klienten verteilt. Das bedeutet, dass die Nachfrage eines Klienten in einem Szenario geringer ist, wenn die gleiche Systemlast, jedoch mehr Klienten untersucht werden.

Hohe Schwankungen der Zwischenabrufzeiten eines Klienten führen nicht zwangsläufig zu hohen Schwankungen der Zwischenabrufzeiten im System, die durch die Abrufe aller Klienten entstehen. Schwankungen können sich gegenseitig ausgleichen, jedoch auch verstärken. In Abbildung 7-3 sind die Häufigkeitsverteilungen der Zwischenabrufzeiten eines Klienten sowie des zugehörigen Systems in Abhängigkeiten der Systemlast und der eingestellten Schwankungen der Transportbedarfe der Klienten dargestellt. Die Auswertungen beruhen jeweils auf den Werten eines Simulationslaufs eines exemplarischen Szenarios¹⁹. Unabhängig von der Systemlast entstehen im Routenzugsystem schwankende Zwischenabrufzeiten, auch wenn die Zwischenabrufzeiten eines Klienten keine Schwankungen aufweisen. Besonders bei niedriger Systemlast führen diese Schwankungen im Beispiel jedoch nur zu einem geringen Anteil an starken Bedarfsspitzen. Bei hoher Systemlast frägt ein Klient dahingegen wesentlich häufiger Transporteinheiten nach. Unterliegt diese Nachfrage keinen Schwankungen, entstehen starke Bedarfsspitzen im System, da sich die insgesamt hohe Nachfrage nur in einem kleinen Intervall verteilen kann. Schwanken die Zwischenabrufzeiten der Klienten, schwanken ebenso die Zwischenabrufzeiten des Systems. Diese enthalten zudem hohe Bedarfsspitzen, die leicht stärker ausgeprägt sind, je geringer die Schwankungen der Klienten sind. Zudem gilt für die höheren Systemlasten, dass die Produktionstaktzeiten kürzer sind. Daher treten die Bedarfsspitzen bei höherer Systemlast in einer höheren Frequenz auf.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Zwischenabrufzeitverteilungen aller untersuchten stabilen Szenarien sind in Tabelle 7-3 aufgeführt. Die zeitliche Verteilung der Transportbedarfe eines Systems ist von der Systemlast, den Schwankungen der Materialnachfrage der Klienten sowie der Anzahl der zu versorgenden Klienten in einem Routenzugsystem abhängig. Weitere Faktoren, die im Versuchsplan untersucht werden, haben keinen Einfluss auf die System-Zwischenabrufzeiten. Aus diesem Grund stimmen die mittleren, minimalen und maximalen Werte der Einsatzszenarien

¹⁹ Je Kombination aus Systemlast und Schwankungen der Zwischenabrufzeiten wurden die Optima des WIP-Bereichs 100 % ausgewertet. Das zugrundeliegende Szenario ist: Layout: Montage; Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik: KLT – TW Int.; Anzahl Klienten: Niedrig; Routenzuglänge: Lang, Steuerungsstrategie: S17

überein. In Tabelle 7-3 wird deshalb keine Unterscheidung getroffen. Die dargestellten Werte ergeben sich als Mittelwert der Beobachtungen eines Experiments.

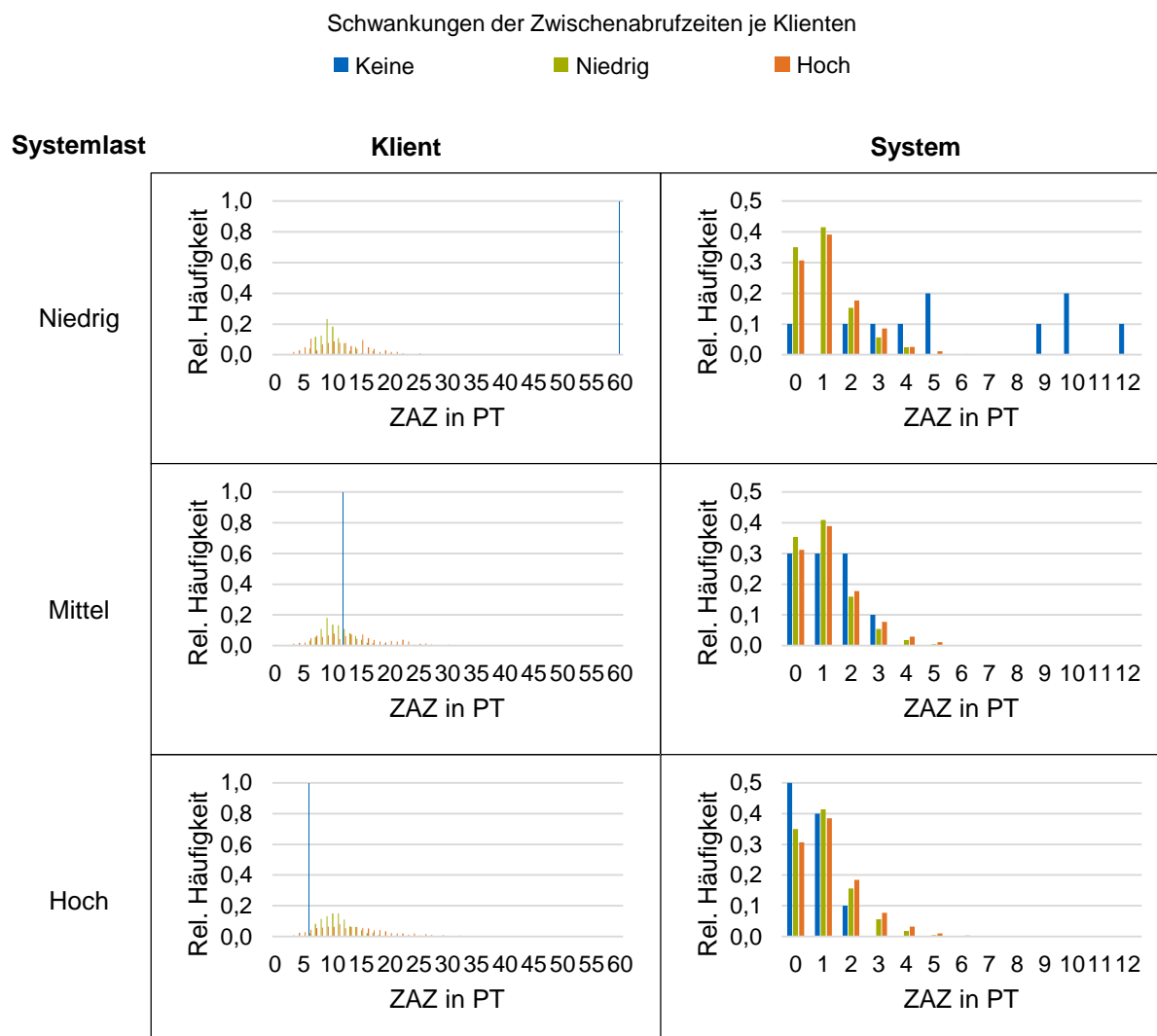


Abbildung 7-3: Zwischenabrufzeiten der Transportaufträge je Klienten und je System in Abhängigkeit des Systemdurchsatzes und der Transportbedarfsschwankungen je Klienten

Die Mittelwerte μ der simulierten System-Zwischenabrufzeiten bestätigen die untersuchten Systemlasten von ca. 10 LT/h bei niedrigem, 50 LT/h bei mittlerem und 100 LT/h bei hohem Durchsatz. Zudem zeigt sich, dass bei niedriger und mittlerer Systemlast sowie wenig Klienten die Schwankungen der Zwischenabrufzeiten der Klienten kaum Auswirkung auf die Standardabweichung σ der System-Zwischenabrufzeiten haben. Bei hohen Systemlasten führen die Schwankungen jedoch zu einer stärkeren Konzentration der System-Zwischenabrufzeiten um den relativ geringen Mittelwert μ . Dies hat erhöhte Bedarfsspitzen um den Mittelwert zur Folge. Wird die Systemlast auf viele Klienten verteilt, führen Schwankungen unabhängig von der Höhe der Systemlast zu höheren Standardabweichungen der System-Zwischenabrufzeiten. Daraus lässt sich schließen, dass die Transportbedarfe im System besser über die Zeit verteilt

werden. Dies führt dazu, dass Transportbedarfsschwankungen der Klienten insgesamt zu einer Nivellierung der Transportbedarfsspitzen im Routenzugsystem beitragen können.

Tabelle 7-3: μ und σ der System-Zwischenabruflzeiten (ZAZ) in Abhängigkeit des Systemdurchsatzes, der Transportbedarfsschwankungen der Klienten und der Anzahl an zu versorgenden Klienten

Systemlast	Transportbedarfs- schwankungen der Klienten	Anzahl Klienten	Mittelwerte der System-ZAZ in s	
			μ	σ
Niedrig	Keine	Niedrig	360	350
		Hoch	360	381
	Niedrig	Niedrig	360	348
		Hoch	358	553
	Hoch	Niedrig	360	348
		Hoch	357	651
Mittel	Keine	Niedrig	72	69
		Hoch	72	78
	Niedrig	Niedrig	72	71
		Hoch	72	111
	Hoch	Niedrig	72	70
		Hoch	72	130
Hoch	Keine	Niedrig	36	46
		Hoch	36	45
	Niedrig	Niedrig	36	36
		Hoch	36	55
	Hoch	Niedrig	36	35
		Hoch	36	65

7.3.3 Transportressourcen

Die Gestaltung der Transportressourcen bestimmt zum einen die durchführbaren Prozesse und damit die Zykluszeiten. Zum anderen wird die Tourenkapazität durch die Transportkapazität eines Routenzugs festgelegt. Damit haben die Transportressourcen unmittelbaren Einfluss auf den Bündelungseffekt im Routenzugsystem. Die Transportkapazität ergibt sich durch die Ladungsträgerkapazität eines Anhängers und der Anzahl an Anhängern im Verbund eines Routenzugs. Während die Anzahl der Anhänger in einem Zug insbesondere durch Kurvenradien und Sicherheitsaspekte begrenzt wird, hängt die Transportkapazität von den zu befördernden Ladungsträgern ab. Wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, können GLT-Anhänger in den Routenzugsystemen dieser Arbeit einen Ladungsträger transportieren. KLT-Anhänger befördern bis zu

zwölf Ladungsträger auf einmal. Zudem werden vier Anhänger bei langen Routenzügen und ein Anhänger bei kurzen Routenzügen vom Schleppfahrzeug gezogen. Daraus ergeben sich Transportkapazitäten von einem Ladungsträger für kurze GLT-Routenzüge, vier Ladungsträger für lange GLT-Routenzüge sowie zwölf Ladungsträger für kurze KLT-Routenzüge und 48 Ladungsträger für lange KLT-Routenzüge.

In Abbildung 7-4 sind die Häufigkeitsverteilungen der Vollgut-Ladungsträger je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart und der Routenzuglänge dargestellt. Die Auswertungen beruhen jeweils auf den Werten eines Simulationslaufs eines exemplarischen Szenarios²⁰.

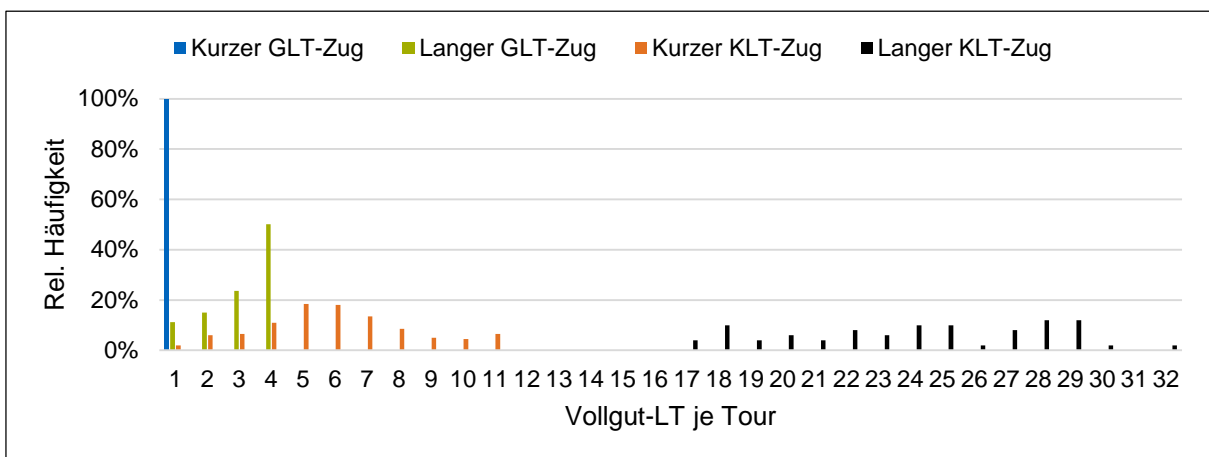


Abbildung 7-4: Vollgut-LT je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart und Zuglänge

Da eine Tour nur startet, wenn mindestens ein Ladungsträger transportiert wird, werden bei kurzen GLT-Zügen stets ein GLT auf einer Tour ausgefahren. Für den langen GLT-Zug treten sowohl hoch als auch gering ausgelastete Touren auf, wobei voll ausgelastete Touren am häufigsten starten. Die Häufigkeitsverteilungen der transportierten KLT je Tour unterliegen dahingegen größeren absoluten Schwankungen, da auch mehr Ladungsträger transportiert werden können. Im betrachteten Szenario wurden weder bei kurzen noch bei langen KLT-Zügen die maximale Kapazitätsauslastung auf einer Tour erreicht. Im Durchschnitt werden nur ungefähr die Hälfte der Tourenkapazität genutzt.

Der Tourenbündelungseffekt über alle durchgeführten Experimente ist in Tabelle 7-4 bewertet. Dazu sind in Abhängigkeit der Ladungsträgerart und der Routenzuglänge die durchschnittliche Anzahl an Ladungsträgern je Tour aufgeführt. Für jede Kombination sind jeweils die mittleren, minimalen und maximalen Werte, die sich als Mittelwert

²⁰ Je Kombination aus Ladungsträgerart und Routenzuglänge wurden die Optima des WIP-Bereichs 25 % ausgewertet. Das zugrundeliegende Szenario ist: Layout: Rundkurs; Prozess und Anhängertechnik: TW Ent.; Anzahl Klienten: Hoch; Systemlast: Hoch; Schwankungen der Zwischenabrufrzeiten je Klienten: Niedrig; Steuerungsstrategie: S01

der Beobachtungen eines Experiments ergeben, dargestellt. Zunächst verifiziert sich für die kurzen GLT-Züge mit einer Transportkapazität von einem Ladungsträger, dass auf jeder Tour auch genau ein Ladungsträger mitgenommen wird. Bei langen GLT-Zügen werden im Mittel über alle Szenarien durchschnittlich 2,1 Ladungsträger pro Tour transportiert. Daneben treten auch Szenarien auf, z. B. bei einer permanenten Abfahrt und einer hohen Anzahl an verfügbaren Transportmitteln, bei denen immer nur ein Ladungsträger auf einer Tour bereitgestellt wird. Genauso existiert das gegensätzliche Szenario, bei dem immer vollausgelastete Touren gefahren werden. Die KLT-Transporte sind in den untersuchten Szenarien im Mittel mit 2,11 Ladungsträgern bei kurzen und 5,27 Ladungsträgern bei langen Routenzügen gering ausgelastet. Je nach Einsatzszenario werden durchschnittlich sogar nur 1,01 Ladungsträger, aber auch 11,99 Ladungsträger (kurze Routenzüge) bzw. 45,83 Ladungsträger (lange Routenzüge) auf einer Tour mitgenommen. Die Auslastung einer Tour hängt v. a. von der Systemlast und der Tourenstartlogik ab.

Tabelle 7-4: \emptyset Anzahl an Ladungsträgern je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart und der Routenzuglänge

Ladungsträgerart	Routenzuglänge	\emptyset Anzahl Ladungsträger je Tour		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
GLT	Kurz	1,00	1,00	1,00
	Lang	2,11	1,00	4,00
KLT	Kurz	2,82	1,01	11,99
	Lang	5,27	1,01	45,83

7.3.4 Zykluszeit

Die Zykluszeit einer Tour im Routenzugsystem setzt sich aus der Dauer der Fahrt, der Handhabung an Materialflussquelle und -senken sowie Nebenzeiten zusammen. Während die Fahrtzeit v. a. durch Transportmittel und Wegstrecken sowie Stau bestimmt wird, ergeben sich die Handhabungszeiten durch die Ladungsträgerart, die Anhänger-technik sowie die Handhabungsprozesse (siehe Abschnitt 4.3). Je nach Ausprägung dieser Merkmale ergeben sich unterschiedliche Zykluszeiten (siehe Abschnitt 5.2.4).

In Abbildung 7-5 bis Abbildung 7-7 sind die Fahrtzeiten und Handhabungszeiten an Materialflussquelle sowie -senken je Tour in Abhängigkeit der Kombination aus Ladungsträgerart, Anhängertechnik und Prozess exemplarisch dargestellt. Die Auswertungen beruhen jeweils auf den Werten eines Simulationslaufs eines exemplarischen Szenarios²¹ und sind als Boxplots mit zusätzlichen Mittelwerten ausgeführt. Die

²¹ Je Kombination aus Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik wurden die Optima des WIP-Bereichs 25 % ausgewertet. Das zugrundeliegende Szenario ist: Layout: Werkstatt; Anzahl Klienten: Hoch; Systemlast: Mittel; Schwankungen der Zwischenabrufrufen je Klienten: Niedrig; Steuerungsstrategie: S08

Fahrtzeit wird im Mittel nicht von diesen Merkmalen beeinflusst. Für die KLT-Versorgung ergeben sich im Beispiel jedoch vermutlich zufallsbedingt geringere maximale Tourenlängen.

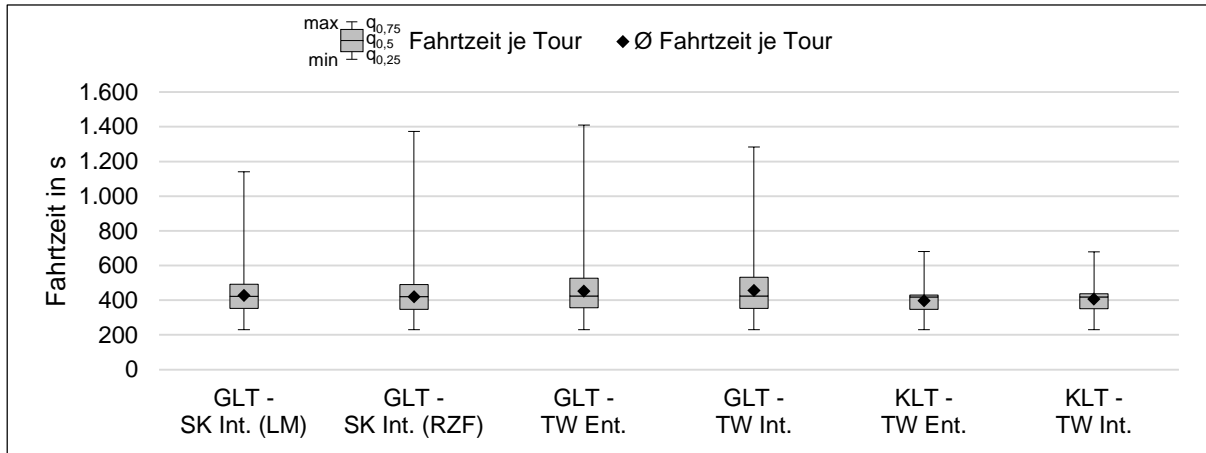


Abbildung 7-5: *Fahrtzeit je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses*

Für die Handhabungszeiten ergeben sich deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Merkmalsausprägungen. Im Mittel sind die Handhabungszeiten bei der KLT-Bereitstellung geringer als bei GLT-Systemen, da erstere einfach vom Zug entnommen und zum Bereitstellort getragen werden können. Findet die Be- und Entladung der Ladungsträger an der Quelle in die Tour integriert statt, so sind die Handhabungszeiten an der Quelle ebenfalls länger als bei einem entkoppelten Prozess. Da die Handhabung an den Senken in den betrachteten Routenzugsystemen immer in die Tour integriert durch den Routenzugfahrer stattfindet, ergeben sich dort keine Zykluszeitunterschiede in Abhängigkeit des Prozesses. Dennoch wirkt sich des Weiteren die Anhängertechnik auf die Handhabungsdauer aus. An der Quelle benötigen die Schubkonzepte eine längere Dauer als die Transportwagenkonzepte. Besonders auffällig ist die entkoppelte GLT-Beladung beim Transportwagenprinzip. Hier wird dem Routenzugfahrer bereits ein vollständig beladener Anhängerverband zur Verfügung gestellt, der nur noch an das Schleppfahrzeug angehängt bzw. bei der Leergutabgabe abgehängt wird. Daher ergeben sich geringe und konstante Handhabungszeiten für diese Merkmalsausprägungen. Finden das An- bzw. Abkuppeln der Transportwagen einzeln durch den Routenzugfahrer statt, entstehen dementsprechend längere Zykluszeiten. Beim Schubkonzept werden die Anhänger jeweils in die Tour integriert entweder durch manuelles Schieben durch den Routenzugfahrer oder mittels Stapler durch einen weiteren Logistikmitarbeiter mit den Transporteinheiten be- bzw. entladen. Die Beladung mit dem Stapler ist dabei besonders bei voll ausgelasteten Touren etwas schneller. An den Senken werden hingegen alle Transporteinheiten einzeln durch den Routenzugfahrer bereitgestellt. Bei der GLT-Bereitstellung führt die Transportwagentechnik zu längeren

Handhabungszeiten als die Schubkonzepte, da ein mehrfaches An- bzw. Abkuppeln der Anhänger vom Verband erfolgt. Mit Ausnahme des letzten Anhängers müssen sowohl bei Entladung des Vollguts als auch bei der Beladung des Routenzugs mit Leergut-Anhängern zwei Kupplungen gelöst bzw. verbunden werden.

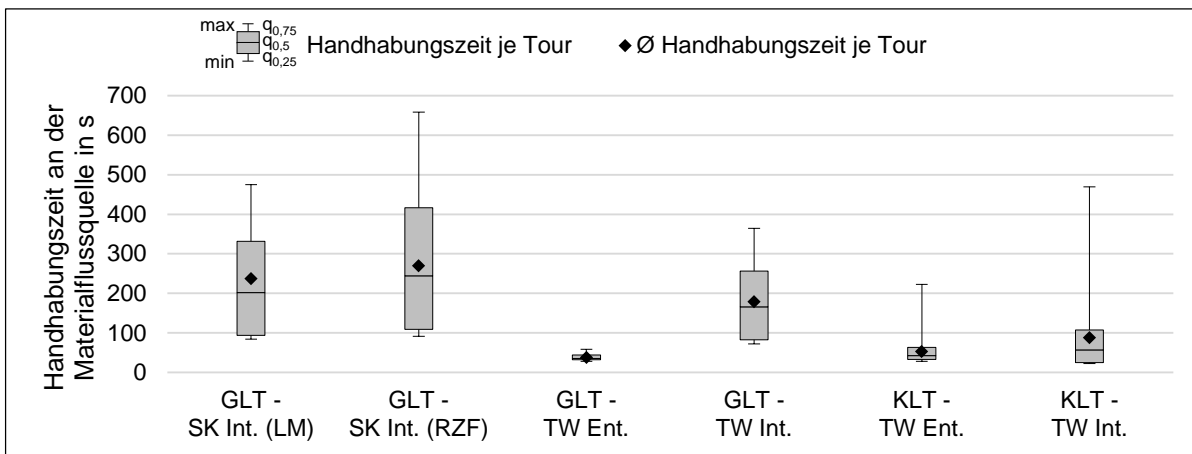


Abbildung 7-6: Handhabungszeit je Tour an der Materialflussquelle in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses

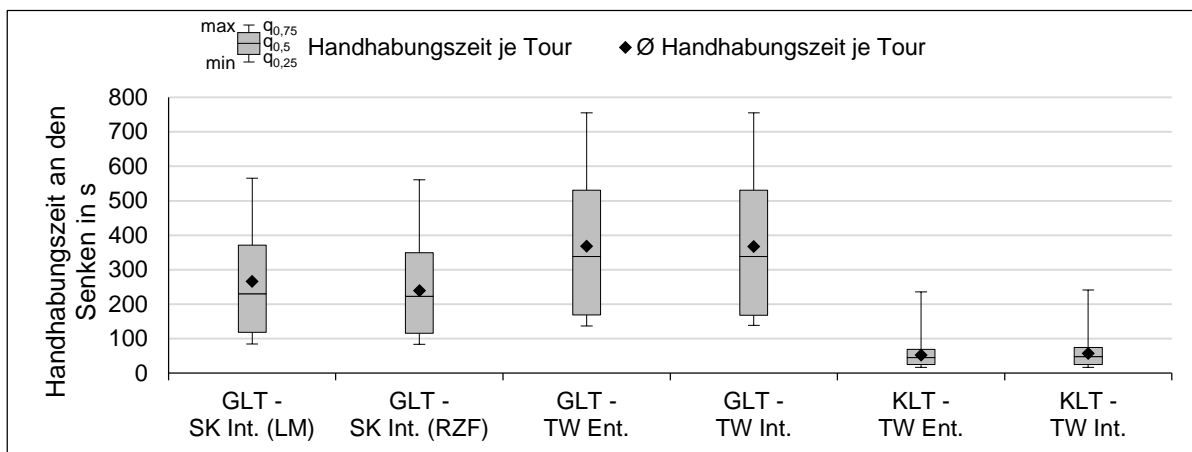


Abbildung 7-7: Handhabungszeit je Tour an den Senken in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses

Die drei gezeigten Zykluszeitanteile sind in Abbildung 7-8 in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Handhabungsprozesses gemittelt über alle durchgeführten stabilen Experimente dargestellt. Zusätzlich sind Minima und Maxima der durchschnittlichen Zeiten aller Experimente aufgetragen. Die durchschnittlichen Zykluszeitanteile eines Experiments ergeben sich wiederum als Mittelwert der durchschnittlichen Zykluszeitanteile aller fünf Beobachtungen eines Experiments.

Die Auswertung zeigt, dass die Fahrtzeit einer Tour von der Ladungsträgerart, dem Handhabungsprozess sowie der Anhängertechnik unabhängig ist. Obwohl die

mittleren Zeiten der Handhabungszeitanteile in Abhängigkeit der dargestellten Merkmale variieren, stellen sich für den GLT-Transport ähnliche Gesamtzykluszeiten ein. Die Zeit, die beim entkoppelten Transportwagenprinzip an der Quelle durch das Anhängen eines vorbeladenen Anhängerverbands eingespart wird, benötigt der Routenzugfahrer dafür für das aufgrund des An- und Abkoppelns zeitaufwendige Bereitstellen der Transportwägen an den Klienten. Dies führt auch dazu, dass die in die Tour integrierte Beladung des Routenzugs mit Anhängern durch den Routenzugfahrer in den im Mittel insgesamt längsten Zykluszeiten im Vergleich resultiert. Die KLT-Versorgung bedingt in den durchgeführten Simulationen im Mittel etwas kürzere Zykluszeiten. Dies liegt daran, dass die Handhabung eines KLT wesentlich schneller erfolgen kann als die eines GLT. Ist die Auslastung einer KLT-Tour jedoch hoch, können aufgrund der hohen Transportkapazität wesentlich längere Zykluszeiten entstehen.

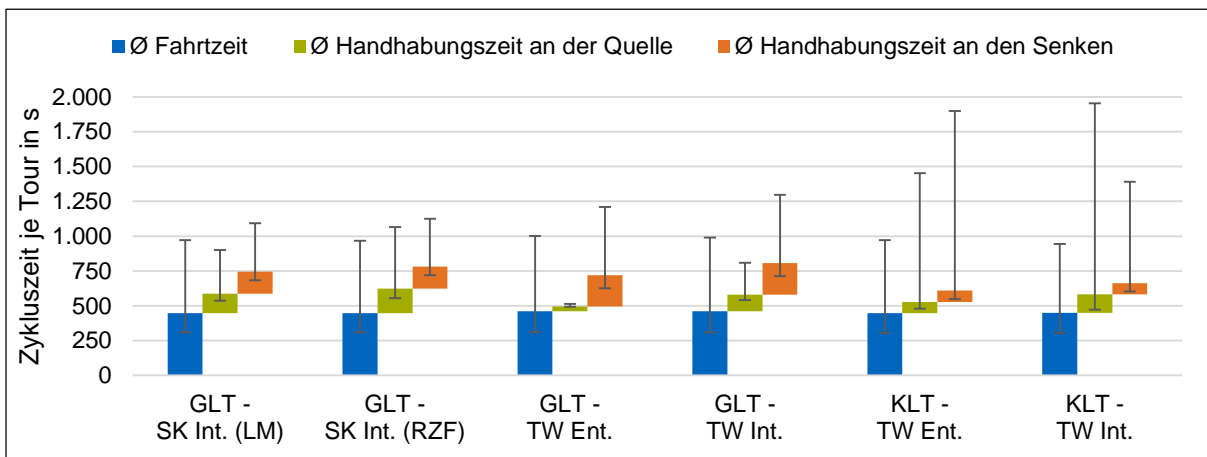


Abbildung 7-8: Ø-Zykluszeitanteile in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses

Die in diesem Abschnitt erläuterten Auswertungen zeigen, dass die verschiedenen Ausprägungen der Routenzugreferenzsysteme durch die in dieser Arbeit vorgenommene Modellierung abgebildet werden (Anforderung 1, siehe Abschnitt 5.1). Durch die Modellierung der Transportnetzwerke als Knoten und Kanten eines gerichteten Graphen ist Anforderung 2 der Formalisierung implizit erfüllt. Zudem werden konkrete Transportbedarfe zeitabhängig erzeugt, deren Zwischenabrufzeiten stochastisch verteilt sind (Anforderung 3). Des Weiteren ändern sich die Auslastungen, Distanzen sowie Zykluszeiten der Touren über die Simulationszeit (Anforderung 4). Die unterschiedlichen Fahrtzeiten der Touren zeigen außerdem das verkehrabhängige Verhalten der Routenzüge (Anforderung 5). Damit werden alle Anforderungen an die Formalisierung als erfüllt erachtet.

In den folgenden Abschnitten werden die Simulationsergebnisse der Steuerungsstrategien in Verbindung mit den untersuchten Merkmalen der Routenzugreferenzsysteme

dargestellt und hinsichtlich ihrer Effektivität und Effizienz bei einer robusten Produktionsversorgung analysiert, um die zweite und dritte Forschungsunterfrage zu beantworten.

7.4 Vergleichende Bewertung der Steuerungsstrategien

7.4.1 Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien

Jede der entwickelten Steuerungsstrategien wird im Folgenden hinsichtlich ihrer Effizienz bei einer robusten Produktionsversorgung im Vergleich zu den anderen Strategien bewertet. Wie in Abschnitt 7.1 erläutert, wird die Effizienz über die beiden Zielgrößen Anzahl der eingesetzten Züge und notwendiger WIP, um eine robuste Produktionsversorgung zu ermöglichen, bewertet. Je weniger Ressourcen dazu notwendig sind, umso effizienter wird ein Routenzugsystem betrieben.

Allerdings beeinflussen sich die beiden Zielgrößen gegenseitig. Durch den Einsatz von mehr Routenzügen kann ein geringerer WIP erreicht werden. Ist ein höherer WIP zulässig, kann die Anzahl der notwendigen Transportmittel reduziert werden. Je nach Routenzugsystem werden die beiden Zielgrößen unterschiedlich gewichtet. In der Versorgung einer Endmontage der Automobilindustrie sind der Linienbestand und damit auch der WIP in der Versorgung z. B. meist auf einem Minimum zu halten und hochfrequent nachzuversorgen. Dagegen ist in anderen Routenzugsystemen auch mehr WIP zulässig, wodurch die Frequenz der Produktionsversorgung niedrig gehalten werden kann. Um unterschiedliche Gewichtungen des zulässigen WIP zu berücksichtigen, werden in dieser Arbeit die vier WIP-Bereiche 25 %, 50 %, 75 % und 100 % unterschieden. Für jeden Bereich liefert diejenige Steuerungsstrategie die optimale, d. h. effizienteste Lösung, die am wenigsten Routenzüge erfordert, um den WIP-Bereich im Mittel mit dem Konfidenzniveau 90 % zu erreichen (siehe Abschnitt 7.2). Die optimale Lösung kann auch durch mehrere Strategien gleichzeitig erzielt werden. Nicht-optimale Lösungen einer Steuerungsstrategie für ein Szenario erreichen zwar den WIP-Bereich mit einer gewissen Anzahl an Routenzügen. Diese Anzahl ist jedoch höher als die Anzahl der Züge der optimalen Lösung des WIP-Bereichs. In diesem Fall kann die Effizienz der Steuerungsstrategie im Vergleich zu anderen stabilen Strategien über den Abstand der gefundenen Lösung zum Optimum in Routenzügen bemessen werden. Eine instabile Lösung besteht dann, wenn eine Steuerungsstrategie den WIP-Bereich nicht erreicht, auch wenn die maximale Anzahl an simulierten Routenzügen je Szenario aufgewandt wird. Die Ergebnisse der Effizienzoptimalität werden im Folgenden in die WIP-Bereiche unterteilt dargestellt. Dabei sind jeweils für jede Strategie der Anteil an optimalen, nicht optimalen und instabilen Lösungen für alle simulierten Szenarien abgebildet. Zusätzlich ist jeweils der durchschnittliche Abstand an Routenzügen

für den Fall, dass eine stabile, aber nicht optimale Lösung erreicht wurde, in der Auswertung aufgetragen.

WIP-Bereich 25 %

In Abbildung 7-9 ist die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien im Vergleich für den WIP-Bereich 25 % dargestellt.

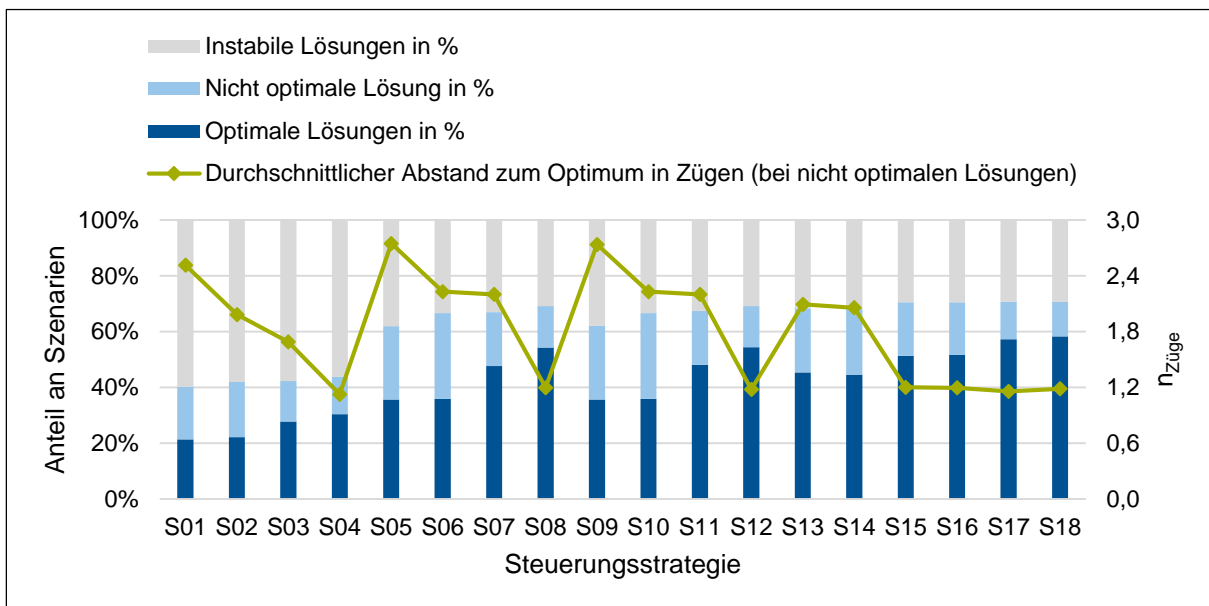


Abbildung 7-9: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 25 %

Mit knapp 40 % erreicht die relativ statische Referenzstrategie S01, bei der die Routenzüge auf vordefinierten Routen in einem festen Takt Touren fahren, einen geringen Anteil an stabilen Lösungen. Optimale Lösungen werden in ca. 20 % der Szenarien gefunden. Strategien mit einem hohen Dynamisierungsgrad führen in diesem WIP-Bereich, der nur wenig Bestand in der Produktionsversorgung zulässt, häufiger zu stabilen und optimalen Ergebnissen. Besonders die Steuerungsstrategien S17 und S18 erreichen für beinahe 60 % der Szenarien die optimale Lösung. Beide Strategien bilden die Touren dynamisch in Abhängigkeit der aktuellen Auftragslage, ohne durch ein vordefiniertes Cluster oder einen festen Fahrweg eingeschränkt zu sein. S17 startet die Touren permanent, S18 auslastungsorientiert mit einer Zeitgrenze. Daneben erzielen die Steuerungsstrategien S08 und S12 ebenfalls sehr häufig stabile und optimale Lösungen. Bei diesen Strategien werden die Transportaufträge zwar geclustert und nach Prioritätsregeln zu Touren zusammengefasst, die Fahrwege und die Ressourcenzuteilung erfolgen jedoch flexibel und clusterübergreifend. Daneben werden ein permanenter Tourenstart (S08) bzw. ein auslastungsorientierter Tourenstart mit Zeitgrenze (S12) verwendet. Falls eine stabile, aber keine optimale Lösung für ein Szenario im WIP-Bereich 25 % gefunden wird, liegen die Lösungen dieser vier

Strategien zusammen mit den Strategien S04, S15 und S16 jedoch durchschnittlich nur ca. 1,2 Routenzüge vom Optimum entfernt. Bei anderen Steuerungsstrategien kann die Entfernung auch annähernd drei Routenzüge betragen.

WIP-Bereich 50 %

In Abbildung 7-10 ist die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien im Vergleich für den WIP-Bereich 50 % dargestellt.

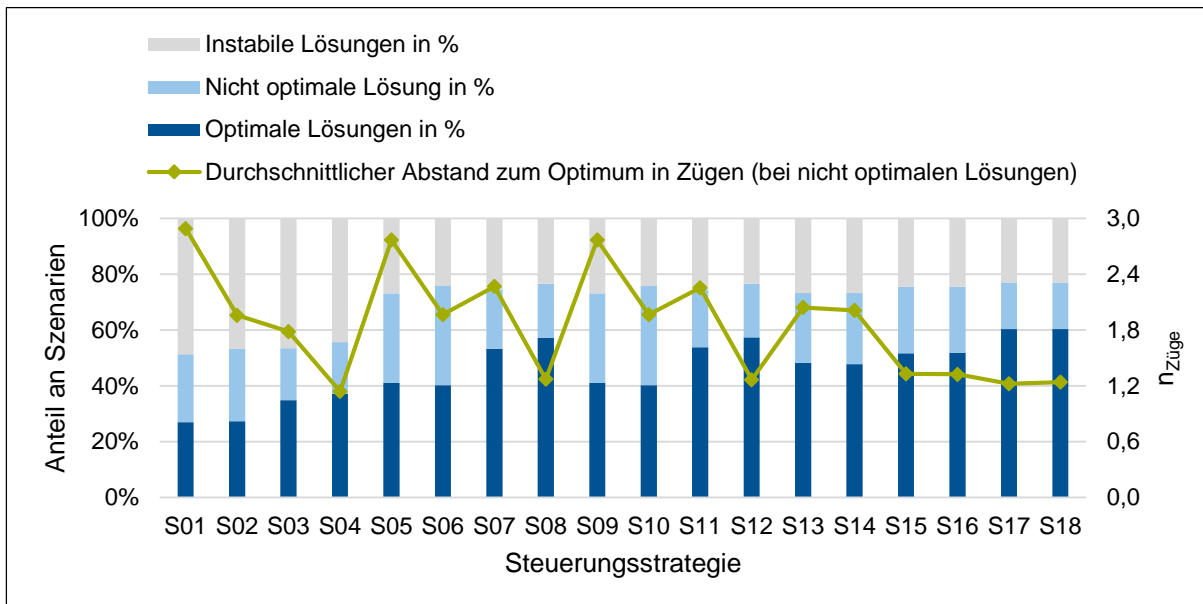


Abbildung 7-10: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 50 %

Dieser WIP-Bereich erlaubt im Vergleich zum WIP-Bereich 25 % einen höheren Umlaufbestand in der Produktionsversorgung. Die Ergebnisse der Steuerungsstrategien hinsichtlich der Effizienzoptimalität entsprechen im Trend denen des WIP-Bereichs 25 %. Jedoch schaffen es alle Steuerungsstrategien, nun häufiger stabile Lösungen zu erzeugen. Zudem erreichen besonders die Strategien mit einem höheren Anteil an statischen Entscheidungen, z. B. S01 oder S07, öfter optimale Lösungen, während der Anteil an Optima bei den sehr dynamischen Strategien, z. B. S17 oder S18, stagniert.

WIP-Bereich 75 %

In Abbildung 7-11 ist die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien im Vergleich für den WIP-Bereich 75 % dargestellt. Dadurch, dass mehr WIP in diesem Betrachtungsbereich zulässig ist, erreichen alle Strategien häufiger stabile Lösungen als in den strikteren WIP-Bereichen. Besonders für die weniger dynamischen Steuerungsstrategien, z. B. S01 oder S02, steigt der Anteil deutlich. Während der Anteil an optimalen Lösungen in den meisten Fällen nur wenig zunimmt, erreichen die beiden

Strategien S08 und S12 nun deutlich über 60 % an Optima und übertreffen damit die sehr dynamischen Strategien S17 und S18, deren Anteil stagniert.

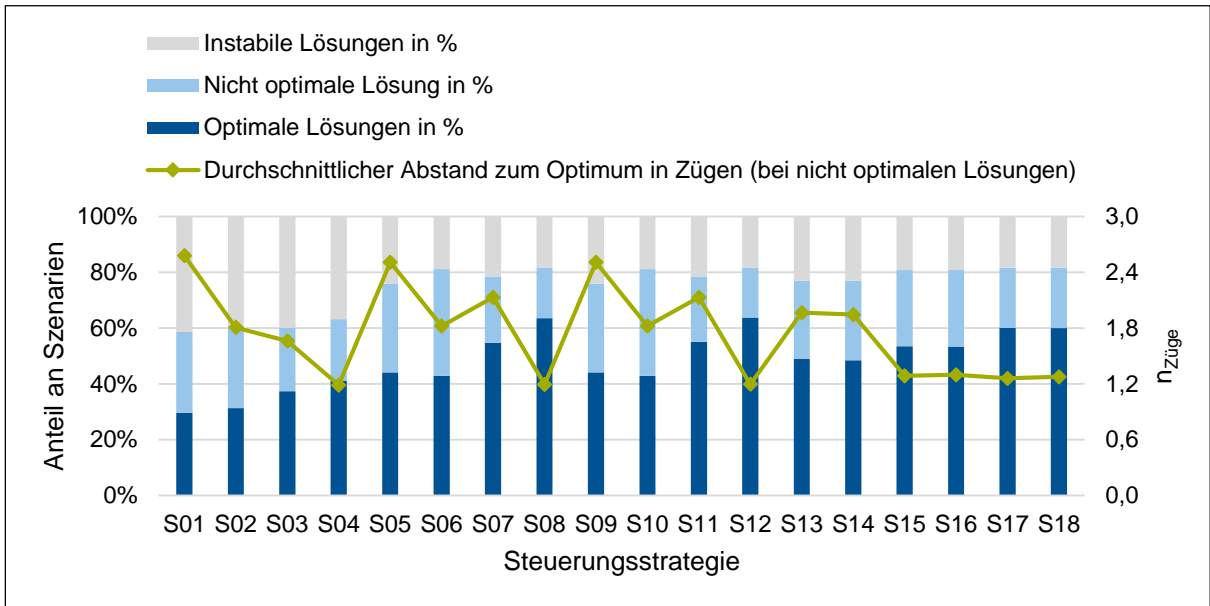


Abbildung 7-11: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 75 %

WIP-Bereich 100 %

In Abbildung 7-12 ist die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien im Vergleich für den WIP-Bereich 100 % dargestellt.

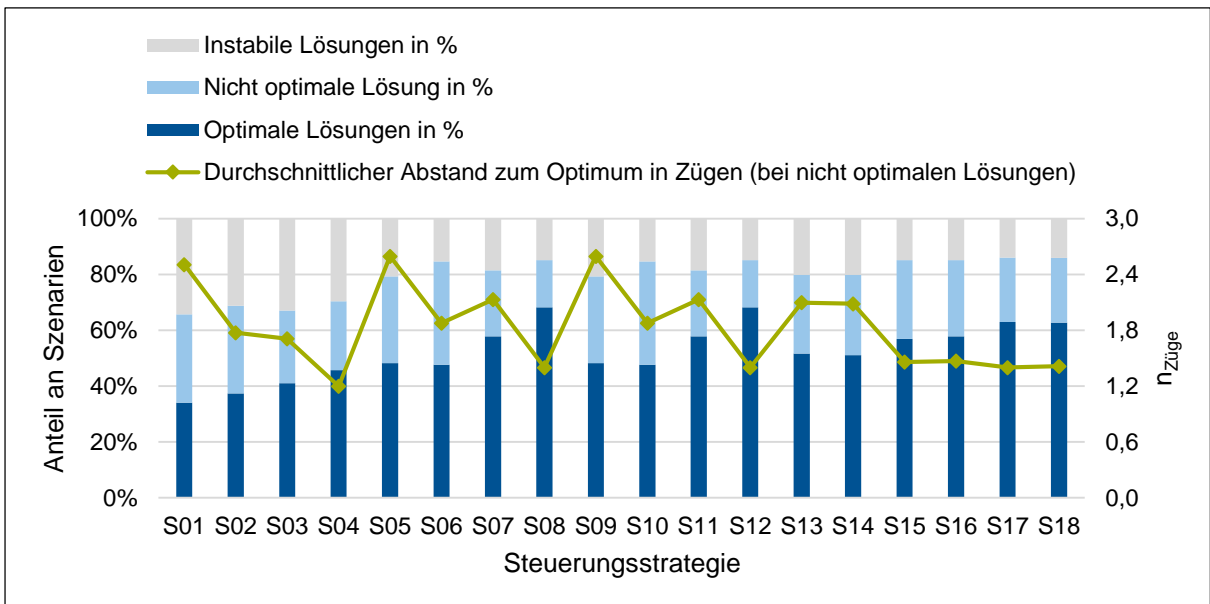


Abbildung 7-12: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 100 %

Der bisherige Trend, dass der Anteil an stabilen Lösungen für alle Strategien zunimmt, wenn mehr WIP im Routenzugsystem zulässig ist, setzt sich auch in diesem WIP-Bereich fort. Der Anteil an optimalen Lösungen steigt wiederum besonders für die beiden Steuerungsstrategien S08 und S12, die zwar in Clustern und nach FIFO arbeiten, alle anderen Entscheidungen aber dynamisch und flexibel treffen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Effizienzoptimalität der entwickelten dynamischen Steuerungsstrategien vom zulässigen WIP abhängt. Die sehr dynamischen Strategien S17 und S18, bei denen die Touren dynamisch in Abhängigkeit der aktuellen Auftragslage ohne vordefinierte Cluster oder einen festen Fahrweg gebildet werden, erzielen für alle WIP-Bereiche eine effiziente Produktionsversorgung. Je mehr WIP zulässig ist, desto stärker steigt jedoch die Effizienzoptimalität der anderen Strategien. Besonders die beiden teildynamischen Steuerungsstrategien S08 und S12 übertreffen die sehr dynamischen Strategien bei einem hohen zulässigen WIP im Routenzugsystem. Relativ statische Strategien mit einem getakteten Tourenstart (S01 bis S04) erreichen in allen WIP-Bereichen im Vergleich die niedrigste Häufigkeit an stabilen und optimalen Szenarien. Allerdings ermöglichen auch diese Steuerungsstrategien in einigen Szenarien eine effizienzoptimale, robuste Produktionsversorgung. Des Weiteren erreicht keine der untersuchten Steuerungsstrategien für alle Szenarien eine robuste Produktionsversorgung. Die Effizienzoptimalität einer Steuerungsstrategie ist folglich vom Routenzugsystem und Einsatzszenario abhängig. Der Einfluss der Systemausprägungen wird im folgenden Abschnitt untersucht.

7.4.2 Einfluss der Systemausprägungen auf die Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien

Welche Steuerungsstrategie für welches Routenzugsystem die effizienteste Produktionsversorgung ermöglicht, hängt von den Ausprägungen der Systemmerkmale ab. In diesem Abschnitt wird daher für jede untersuchte Ausprägung eines Routenzugsystems beurteilt, ob die jeweilige Steuerungsstrategie im Vergleich zu allen anderen Steuerungsstrategien überdurchschnittlich (↑), durchschnittlich (-) oder unterdurchschnittlich (↓) oft optimale Lösungen bezüglich einer effizienten Produktionsversorgung ermöglicht. Eine Steuerungsstrategie erreicht durchschnittlich oft optimale Ergebnisse, wenn ihr Anteil an optimalen gelösten Szenarien im Toleranzbereich des Mittelwerts zu- und abzüglich der einfachen Standardabweichung der optimalen Lösungsanteile aller 18 Steuerungsstrategien liegt. Wird ein höherer Wert durch eine Steuerungsstrategie erzielt, schneidet diese überdurchschnittlich ab bzw. unterdurchschnittlich, falls sich ein Ergebnis unter dem Toleranzbereich ergibt. Eine unterdurchschnittliche Bewertung muss demnach nicht bedeuten, dass eine Steuerungsstrategie immer zu einer weniger effizienten robusten Produktionsversorgung führt. Im Mittel gibt es für die jeweils betrachtete Merkmalsausprägung jedoch Steuerungsstrategien, die

häufiger eine effizientere Bereitstellung des Materials im Routenzugsystem ermöglichen.

Der Abschnitt ist nach den analysierten Faktoren des Versuchsplans gegliedert. Für jeden Faktor werden die WIP-Bereiche 25 % und 100 % erläutert. Der Trend zwischen diesen Bereichen ist für alle Faktoren ebenfalls in den anderen beiden WIP-Bereichen erkennbar. Die vollständigen Ergebnistabellen für alle vier WIP-Bereiche sind in Anhang G aufgeführt.

Layout

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit des Layouts des Transportnetzwerks ist in Tabelle 7-5 für den WIP-Bereich 25 % bewertet. Das Layout *Rundkurs* ermöglicht kaum Flexibilität bei der Fahrwegbildung und kann zu häufigeren gegenseitigen Behinderungen der Routenzüge führen. Dagegen sind die Layouts *Montage* und *Werkstatt* größer, so dass sich die Routenzüge im Transportnetzwerk besser verteilen können. Das Layout *Werkstatt* weist zudem eine erhöhte Flexibilität in der Fahrwegbildung auf (siehe Abschnitt 7.3.1).

Keine der untersuchten Steuerungsstrategien erzielt für alle Varianten der Layouts überdurchschnittlich oft effizienzoptimale Lösungen. Die relativ statischen Strategien S01 und S02, bei denen die Routenzüge getaktet auf vordefinierten Routen fahren, liefern im Vergleich zu den anderen Steuerungsstrategien jedoch wesentlich seltener optimale Lösungen.

Tabelle 7-5: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Layout“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Layout	Rundkurs	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-	-	-	-	
	Montage	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	
	Werkstatt	↓	↓	-	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	-	↑	↑

Dahingegen können die dynamischen Strategien S17 und S18, bei denen die Touren auf Basis des aktuellen Systemzustands mit flexiblen Fahrwegen gebildet werden, vor allem für die weniger restriktiven Layouts *Montage* und *Werkstatt* überdurchschnittlich oft die effizienteste robuste Produktionsversorgung ermöglichen. Beim restriktiven Layout *Rundkurs* erweisen sich diejenigen Steuerungsstrategien am häufigsten als besonders effizient, die die Touren innerhalb von Clustern nach Prioritätsregeln bilden

und mit einem permanenten oder auslastungsorientierten Tourenstart mit Zeitgrenze die Abfahrtszeiten der Routenzüge bestimmen (S05 bis S12). Bei den beiden Steuerungsstrategien S06 und S10 können die Routenzüge clusterübergreifend zu Touren zugeteilt werden, fahren dann jedoch eine statisch vorbestimmte Route. Diese Strategien erweisen sich für das Layout *Werkstatt* als unterdurchschnittlich häufig effizienzoptimal.

Der Vergleich der Ergebnisse mit einem WIP-Bereich, der mehr WIP in der Produktionsversorgung zulässt, zeigt, dass die dynamischen Steuerungsstrategien S17 und S18 nach wie vor für die Layouts *Montage* und *Werkstatt* überdurchschnittlich oft effizienzoptimale Lösungen finden. Dies trifft nun ebenfalls für die Strategien S08 und S12 zu, bei denen die Routenzüge clusterübergreifend zu Touren zugeteilt werden können, die nach dem FIFO-Prinzip gebildet wurden und auf flexiblen Fahrwegen das Material bereitstellen. Des Weiteren verbessern sich die getakteten Steuerungsstrategien S01 bis S04 für das Layout *Rundkurs* in dem Maße, dass die Strategien S07, S08, S11 und S12 auf diesem Layout nur noch durchschnittlich bewertet werden (siehe Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6: *Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Layout“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich*

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Layout	Rundkurs	-	-	-	-	↑	↑	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-	-
	Montage	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Werkstatt	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑

Anzahl Klienten

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Anzahl der Klienten und damit der Haltestellen im Transportnetzwerk ist in Tabelle 7-7 für den WIP-Bereich 25 % bewertet. Je mehr Klienten in einem Routenzugsystem vorhanden sind, desto höher ist die Vielfalt der gebildeten Touren. Jedoch führen mehr Klienten auch zu einem dichteren Transportnetzwerk, weshalb die gegenseitige Behinderung der Routenzüge zunehmen kann (siehe Abschnitt 7.3.1).

Unabhängig von der Anzahl der zu versorgenden Klienten liefern wiederum die Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 überdurchschnittlich oft die effizienzoptimalen Ergebnisse. Die Strategien mit getaktetem Tourenstart (S01 bis S04) schneiden dagegen im Vergleich unterdurchschnittlich ab. Die weiteren Strategien erzielen

durchschnittliche Bewertungen mit Ausnahme der Strategien S06 und S10, die für eine hohe Anzahl an Klienten im Routenzugsystem schlechtere Ergebnisse erreichen. Beide Strategien nutzen vordefinierte Fahrwege und teilen die Ressourcen clusterübergreifend zu. Wie bereits beim Faktor Layout führt dies bei großen und flexiblen Transportnetzwerken zu einem häufiger ineffizienten Systembetrieb.

Tabelle 7-7: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Anzahl Klienten“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Anzahl Klienten	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Hoch	↓	↓	↓	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑

Ist bei der Bewertung der Effizienz mehr WIP zulässig, ergeben sich für die dynamischen Steuerungsstrategien S17 und S18 nur noch durchschnittlich oft die optimalen Lösungen. Des Weiteren ermöglicht die Strategie S03, bei der Züge getaktet innerhalb von Clustern operieren, aber flexible Fahrwege wählen, für eine hohe Anzahl an Klienten nun durchschnittlich häufig eine effizienzoptimale Produktionsversorgung. Die Bewertung der anderen Strategien bleibt unverändert (siehe Tabelle 7-8).

Tabelle 7-8: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Anzahl Klienten“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Anzahl Klienten	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-
	Hoch	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑

Systemlast

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Anzahl der Systemlast des Routenzugsystems ist in Tabelle 7-9 für den WIP-Bereich 25 % bewertet. Je höher die Systemlast ist, desto häufiger müssen Touren gebildet werden und desto mehr Möglichkeiten gibt es, verschiedene Transportaufträge in einer Tour miteinander zu kombinieren (siehe Abschnitt 7.3.2).

Tabelle 7-9: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Systemlast“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Systemlast	Niedrig	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mittel	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Hoch	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑

Bei einer niedrigen Systemlast erreichen beinahe alle untersuchten Steuerungsstrategien eine robuste, effizienzoptimale Produktionsversorgung. Lediglich die relativ statischen Strategien S01 und S02, die getaktete Touren auf vordefinierten Routen bilden, erzielen unterdurchschnittliche Bewertungen. Ein getakteter Tourenstart (S01 bis S04) führt zudem bei mittlerer und hoher Systemlast im Routenzugsystem unterdurchschnittlich oft zu einer effizienzoptimalen Lösung. Dagegen erzielen wiederum die Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 überdurchschnittliche Ergebnisse.

Bei der Betrachtung eines WIP-Bereichs, in dem mehr WIP zulässig ist, erreichen die Strategien S02 und S04, bei denen zwar ein getakteter Tourenstart, aber ein flexibler Fahrweg verwendet wird, besonders bei höheren Systemlasten bessere Ergebnisse. Generell erzielen nun alle Steuerungsstrategien mit einem vordefinierten Fahrweg bei niedriger Systemlast unterdurchschnittliche Bewertungen (siehe Tabelle 7-10).

Tabelle 7-10: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Systemlast“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Systemlast	Niedrig	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mittel	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Hoch	↓	-	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	↓	↓	-	-	-	-

Des Weiteren führt eine hohe Systemlast zu einem schlechteren Abschneiden der Steuerungsstrategien S13 und S14, die die Touren zwar auf Basis des aktuellen Systemzustands mit flexiblen Fahrwegen bilden, aber die Zuteilung der Routenzüge auf statisch gebildete Cluster beschränken. Wie schon bei den vorherigen Faktoren zeigt sich auch für die Systemlast, dass die Strategien S08 und S12 überdurchschnittliche

Ergebnisse erzielen, sofern mehr WIP in der Produktionsversorgung zulässig ist. Dagegen erreichen die beiden Strategien S17 und S18 für einzelne Merkmalsausprägungen nur noch durchschnittliche Werte, auch wenn die Bewertung bei strikteren WIP-Bereichen noch überdurchschnittlich war.

Schwankungen der Transportbedarfe

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Schwankungen der Zwischenabrufrzeiten der Klienten im Routenzugsystem ist in Tabelle 7-11 für den WIP-Bereich 25 % bewertet. Schwankungen der Transportbedarfe können zu Bedarfsspitzen und zu Zeiträumen ohne Materialbedarfe führen. Die Schwankungen der Klienten bedingen zusammen mit der Systemlast die Transportbedarfsschwankungen im Routenzugsystem (siehe Abschnitt 7.3.2).

Tabelle 7-11: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Schwankungen der Transportbedarfe“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Schwankungen der ZAZ der Klienten	Keine	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Niedrig	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Hoch	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑

Die dynamischen Steuerungsstrategien S17 und S18 erzielen unabhängig von der Höhe der Schwankungen der Transportbedarfe an den Klienten überdurchschnittliche Ergebnisse. Dagegen führt ein getakteter Tourenstart (S01 bis S04) zu einer unterdurchschnittlichen Bewertung. Dies gilt mit Ausnahme der Strategie S04, bei der flexible Fahrwege gebildet und die Routenzüge clusterübergreifend zugeteilt werden, für alle drei untersuchten Schwankungsfaktoren. Unterliegen die Materialabrufe der Klienten im Routenzugsystem keinen oder niedrigen Schwankungen, erreichen zudem die Steuerungsstrategien S08 und S12 überdurchschnittlich oft die beste Effizienz im Vergleich zu den anderen Strategien. Bei hohen Schwankungen erzielen des Weiteren die Strategien S15 und S16, die auf Basis von Clustern durch eine integrierte Optimierung der Steuerungsentscheidungen Touren bilden und die Transportressourcen clusterübergreifend zuteilen, eine überdurchschnittliche Bewertung.

Ist mehr WIP im Routenzugsystem zulässig, verbessern sich sowohl die Steuerungsstrategien S08 und S12 als auch S07 und S11 hinsichtlich ihres Anteils an optimalen Lösungen. S07 und S11 bilden Touren mit flexiblen Fahrwegen nach dem FIFO-Prinzip und disponieren die Routenzüge nur innerhalb eines Clusters. Zudem erreichen

die getakteten Strategien mit flexiblem Fahrweg (S03 und S04) nun durchschnittliche Bewertungen. Dagegen erzielen die dynamischen Strategien S17 und S18 für niedrige Transportbedarfsschwankungen der Klienten nur noch durchschnittlich häufig optimale Ergebnisse (siehe Tabelle 7-12).

Tabelle 7-12: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Schwankungen der Transportbedarfe“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Schwankungen der ZAZ der Klienten	Keine	↓	↓	-	-	-	-	↑	↑	-	-	↑	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Niedrig	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-
	Hoch	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	↑	↑	↑

Ladungsträgerart

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Ladungsträgerart der im Routenzugsystem bereitgestellten Transporteinheiten ist in Tabelle 7-13 für den WIP-Bereich 25 % bewertet. Während die durchschnittliche Handhabungszeit bei der GLT-Bereitstellung länger als bei der KLT-Bereitstellung ist, können die KLT-Touren deutlich mehr Ladungsträger bündeln. Die Zykluszeit der KLT-Touren ist im Mittel kürzer als die der GLT-Touren, kann bei entsprechender Auslastung aber auch deutlich länger sein (siehe Abschnitt 7.3.3 und 7.3.4).

Tabelle 7-13: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Ladungsträgerart“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Ladungsträgerart	GLT	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
	KLT	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	↑	↑

Sowohl für den GLT- als auch KLT-Transport werden die optimalen Ergebnisse mit am häufigsten durch die Steuerungsstrategien S17 und S18 erreicht. Die getakteten Strategien, die die Ladungsträger auf vordefinierten Routen bereitstellen (S01 bis S02), erzielen hingegen jeweils unterdurchschnittlich häufig die effizienzoptimale Lösung. Für die GLT-Versorgung erreichen des Weiteren die Steuerungsstrategien S08, S12,

S15 und S16 überdurchschnittliche Bewertungen für die KLT-Bereitstellung die Strategien S07 und S12.

Während sich die Bewertung der Steuerungsstrategien bei einem höheren zulässigen WIP für die GLT-Routenzugsysteme kaum ändert, erreichen die Steuerungsstrategien S02, S04, S05 und S09 bei der KLT-Versorgung bessere Ergebnisse. Alle vier Strategien verwenden statische Cluster und Prioritätsregeln zur Tourenbildung, unterscheiden sich aber ansonsten in ihren Modalausprägungen. Im Gegensatz dazu sind die Strategien S15 bis S18 im Vergleich schlechter bewertet (siehe Tabelle 7-14).

Tabelle 7-14: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Ladungsträgerart“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Ladungsträgerart	GLT	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	↑	↑
	KLT	↓	-	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-

Prozess und Anhängertechnik

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Kombination aus Handhabungsprozess und Anhängertechnik sowie Ladungsträgerart ist in Tabelle 7-15 für den WIP-Bereich 25 % bewertet. Die Kombination dieser Merkmale beeinflusst die Zykluszeitanteile der Routenzugtouren an der Materialflussquelle und den -senken. Je nach Ausprägung variieren die Zeitanteile an Quelle und Senken deutlich. Auf eine Tour gesehen benötigen alle GLT-Kombinationen im Mittel jedoch eine ähnliche Zykluszeit. Das gleiche gilt für die KLT-Kombinationen, nur dass diese insgesamt zu kürzeren mittleren Zykluszeiten, jedoch auch höheren Extremwerten führen (siehe Abschnitt 7.3.3 und 7.3.4).

Für die GLT-Kombinationen der Prozesse und Anhängertechniken erreichen die dynamischen Steuerungsstrategien S15 bis S18 ebenso wie S8 und S12 annähernd für jede Ausprägung überdurchschnittlich häufig effizienzoptimale Ergebnisse. Dagegen erzielen die Strategien S01, S02, S05 und S09 nur unterdurchschnittliche Bewertungen. Alle vier Strategien bilden die Touren auf Basis von Clustern und nach Prioritätsregeln, wobei die Touren auf vordefinierten Fahrwegen stattfinden und die Ressourcen nur innerhalb der Cluster disponiert werden. Die KLT-Kombinationen führen in Verbindung mit einem getakteten Tourenstart (S01 bis S04) zu unterdurchschnittlichen Ergebnissen. Lediglich die Steuerungsstrategien S07 und S11, bei denen die Touren

innerhalb eines Clusters mit flexiblen Fahrwegen gebildet und die Ressourcen nur im Cluster zugeteilt werden, ermöglichen für entkoppelte Transportwagenbeladung an der Materialflussquelle überdurchschnittlich häufig eine effizienzoptimale Produktionsversorgung. Für die in die Tour integrierte Transportwagenbeladung durch den Routenzugfahrer wird dies durch die Strategien S17 und S18 erreicht. Die anderen Steuerungsstrategien erhalten im Vergleich durchschnittliche Bewertungen.

Tabelle 7-15: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Prozess und Anhängertechnik“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																		
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
Prozess und Anhängertechnik	GLT	SK. Int. (LM)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		SK Int. (RZF)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	-	↑	↑
		TW Ent.	↓	↓	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑
		TW Int.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
	KLT	TW Ent.	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-
		TW Int.	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑

Ist im Routenzugsystem mehr WIP zulässig, versorgen die Strategien S08 und S12 die Produktion häufiger überdurchschnittlich effizient mit GLT. Die dynamischen Strategien S15, S16 und S18 erzielen je nach Merkmalskombination hingegen nur durchschnittliche Bewertungen. Der erhöhte WIP beeinflusst den Vergleich der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien bei der KLT-Versorgung stärker. Die Strategien S15 und S16 schneiden genauso wie die relativ statischen Strategien S01 bis S03 überwiegend unterdurchschnittlich ab. Die zuvor überdurchschnittlich bewerteten Strategien S08, S12, S17 und S18 erzielen im Vergleich nur noch durchschnittliche Ergebnisse. Dagegen erreichen die Steuerungsstrategien S05, S06, S09 und S11 für beide Varianten überdurchschnittlich oft eine effizienzoptimale, robuste Produktionsversorgung. Alle vier Strategien verwenden statische Cluster und bilden Touren nach dem FIFO-Prinzip, unterscheiden sich ansonsten aber in den Modulusprägungen (siehe Tabelle 7-16).

Tabelle 7-16: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Prozess und Anhängertechnik“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																		
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
Prozess und Anhängertechnik	GLT	SK. Int. (LM)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		SK Int. (RZF)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	-
		TW Ent.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
		TW Int.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	↑	↑
	KLT	TW Ent.	↓	↓	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-
		TW Int.	↓	-	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	-	-	-

Routenzuglänge

Die Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Länge der Routenzüge ist in Tabelle 7-17 für den WIP-Bereich 25 % bewertet (siehe Abschnitt 7.3.3). Kurze Routenzüge haben eine geringere Anzahl an Anhängern und damit eine geringere Transportkapazität. Beim Einsatz von langen Routenzügen können mehr Transportaufträge auf einer Tour gebündelt werden. Daraus folgt, dass die Zykluszeit von kurzen Routenzügen im Mittel geringer ist als von langen Routenzügen, weshalb Routenzugsysteme mit kurzen Zügen eine höhere Reaktionsfähigkeit aufweisen.

Tabelle 7-17: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Routenzuglänge“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Routenzuglänge	Kurz	↓	↓	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Lang	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑

Ähnlich wie bei den vorher betrachteten Faktoren erreichen besonders die Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 überdurchschnittlich häufig eine robuste, effizienzoptimale Produktionsversorgung. Dagegen schneiden die getakteten Strategien (S01 bis S04) besonders bei langen Routenzügen im Vergleich unterdurchschnittlich ab.

Ist im Routenzugsystem mehr WIP zulässig, erzielen die Steuerungsstrategien S08 und S12 auch für lange Routenzüge überdurchschnittliche Bewertungen, was dazu führt, dass die Strategien S17 und S18 nur noch durchschnittlich häufig effizienzoptimale Lösungen ermöglichen (siehe Tabelle 7-18).

Tabelle 7-18: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Routenzuglänge“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																	
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Routenzuglänge	Kurz	↓	↓	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	Lang	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-

In Anbetracht aller Faktoren erreichen die getakteten Steuerungsstrategien S01 bis S04 überwiegend unterdurchschnittlich häufig eine robuste, effizienzoptimale Produktionsversorgung im Vergleich zu den anderen Strategien. Dies gilt besonders für die relativ statischen Strategien S01 und S02, bei denen die Touren auf vordefinierten Routen stattfinden. Die Strategien mit einer flexiblen Fahrwegbildung erzielen des Weiteren häufiger ein Effizienzoptimum als die Strategien mit fest vordefiniertem Fahrweg. Insgesamt erreichen die Steuerungsstrategien S08, S12 sowie S17 und S18 am häufigsten eine überdurchschnittliche Bewertung in Abhängigkeit der Systemausprägungen. Zudem werden diese vier Steuerungsstrategien in keinem WIP-Bereich für eine Systemausprägung unterdurchschnittlich beurteilt. Ist nur ein geringer WIP im Routenzugsystem zulässig, sind die Steuerungsstrategien S17 und S18 am besten bewertet. Je höher der zulässige WIP im System ist, desto bessere Ergebnisse erreichen die Strategien S08 und S12. Generell wird jedoch ersichtlich, dass die Effizienzoptimalität einer Steuerungsstrategie von den Ausprägungen des Routenzugsystems abhängig ist und je nach Einsatzszenario unterschiedliche Strategien eine robuste, effizienzoptimale Produktionsversorgung ermöglichen können.

Die Effizienzoptimalität gibt einen Überblick über die relative Leistung einer Steuerungsstrategie im Vergleich zur Leistung der anderen Steuerungsstrategien. Daneben werden im folgenden Abschnitt die absoluten Effizienzpotentiale der dynamischen Steuerungsstrategien bewertet.

7.4.3 Effektivität und Effizienzpotentiale der Steuerungsstrategien

Die Effektivität einer Steuerungsstrategie ergibt sich daraus, wie häufig diese in der Lage ist, im betrachteten WIP-Bereich eine robuste Produktionsversorgung zu ermöglichen. In Abbildung 7-13 ist für den WIP-Bereich 25 % nochmals der Anteil an stabilen

Szenarien des Versuchsplans je Steuerungsstrategie dargestellt (siehe auch Abbildung 7-9, S. 177). Die Effektivität der Strategien in den weiteren WIP-Bereichen kann Abschnitt 7.4.1 entnommen werden.

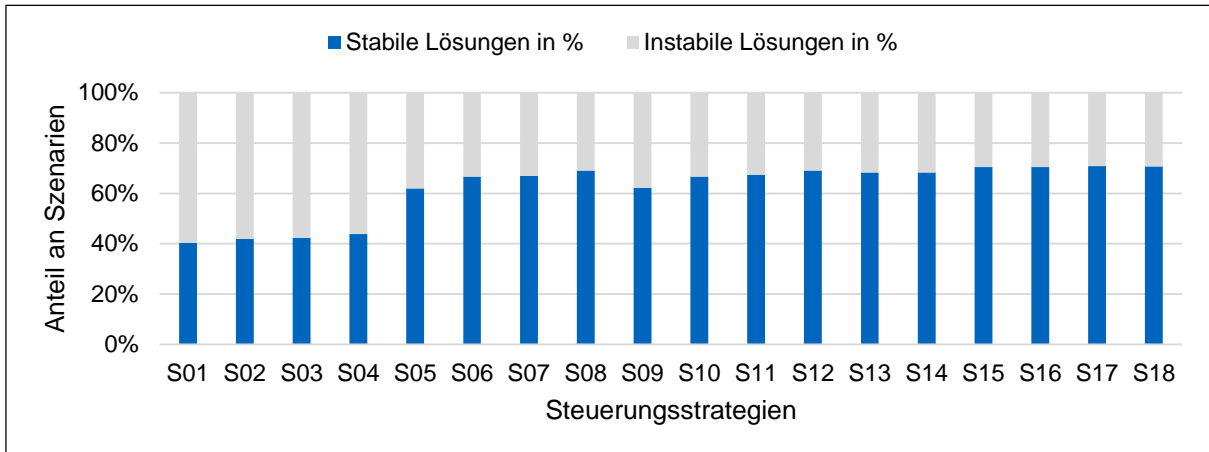


Abbildung 7-13: Effektivität der untersuchten Steuerungsstrategien im Versuchsplan für den WIP-Bereich 25 %

Die Ergebnisse zeigen, dass die dynamischeren Steuerungsstrategien effektiver sind als statischere. Besonders die Steuerungsstrategien S17 und S18 sind dann am effektivsten, wenn nur wenig WIP im Routenzugsystem zulässig ist. Beide Steuerungsstrategien bilden die Touren auf Basis des aktuellen Systemzustands unabhängig von Clustern durch eine integrierte Optimierung der Auftragsdisposition, der Reihenfolge und des flexiblen Fahrwegs. Zur Abfahrtszeitbestimmung werden bei Strategie S17 eine permanente und bei Strategie S18 eine auslastungsorientierte Tourenstartlogik mit Zeitgrenze verwendet. Ist ein höherer WIP erlaubt, erreichen beide Strategien immer noch eine hohe Effektivität, die allerdings von den Steuerungsstrategien S08 und S12 übertroffen wird. Diese wählen die Transportaufträge einer Tour nach dem FIFO-Prinzip innerhalb vorab statisch gebildeter Cluster. Die Fahrwege der Touren sind jedoch flexibel wählbar und die Transportressourcen clusterübergreifend zuteilbar. Zur Abfahrtszeitbestimmung werden wiederum ein permanenter (S08) oder ein auslastungsorientierter Tourenstart mit Zeitgrenze (S12) eingesetzt. Die Steuerungsstrategien mit einem getakteten Tourenstart (S01 bis S04) weisen jeweils die geringste Effektivität im Versuchsplan auf. Liefert die relativ statische Referenzstrategie S01 eine Lösung, erreichen auch die Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 immer eine robuste Produktionsversorgung.

Die absoluten Effizienzpotentiale aller Steuerungsstrategien lassen sich nur für die Szenarien des Versuchsplans vergleichen, in denen alle Steuerungsstrategien eine robuste Produktionsversorgung ermöglichen. Zur Bewertung der Effizienzpotentiale werden wiederum die WIP-Bereiche in Verbindung mit der Anzahl der zum Erreichen

einer robusten Produktionsversorgung notwendigen Züge ausgewertet. Des Weiteren werden jeweils die Kennzahlen *Fahrtzeit je Tour*, *Stauzeit je Tour*, *Kapazitätsauslastung je Tour* und *Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge* in den optimalen Lösungen je Steuerungsstrategie bewertet. Damit lassen sich die Erwartungen an die Effizienz der dynamischen Steuerungsstrategien (siehe Abbildung 1-2, S. 5) mit den Simulationsergebnissen vergleichen.

Zunächst erfolgt die Auswertung zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten zwischen den Bewertungsgrößen anhand eines exemplarischen Szenarios²² im WIP-Bereich 25 %. Anschließend werden die Haupteffekte der Zielgrößen in Abhängigkeit der Steuerungsstrategien beurteilt. Dazu wird wiederum der WIP-Bereich 25 % in diesem Abschnitt detailliert erläutert. Die vollständige Übersicht der Haupteffekte für alle WIP-Bereiche ist in Anhang I enthalten.

Im exemplarischen Szenario, das im Folgenden betrachtet wird, benötigt eine robuste Produktionsversorgung mit der relativ statischen Referenzstrategie S01 neun Routenzüge. Die effizienzoptimale Lösung wird mit sechs Routenzügen durch die Steuerungsstrategien S15, S17 und S18 erreicht. Dadurch lassen sich durch eine Dynamisierung der Routenzugsystemsteuerung im Beispiel bis zu drei Routenzüge einsparen.

Diese Einsparung ergibt sich durch die Kombination mehrerer Effekte. In Abbildung 7-14 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Routenzügen und der Fahrtzeit t_{Fahrt} je Tour dargestellt. Die Fahrtzeit der Touren ist je Steuerungsstrategie als Boxplot mit zusätzlichen Mittelwerten abgebildet. Dadurch lässt sich die Verteilung der Fahrtzeiten je Tour für das Szenario betrachten. Fahrtzeit bedeutet in diesem Zusammenhang die tatsächliche Zeit, in der sich ein Routenzug auf einer Tour bewegt. Stillstandzeiten durch Staus werden extra ausgewertet. Steuerungsstrategien, die im Mittel Touren mit längeren Fahrwegen bilden, führen tendenziell zu einem erhöhten Bedarf an Routenzügen für eine robuste Produktionsversorgung. Die ähnlich verteilten Fahrtzeiten der Strategien S03 und S04 genauso wie S07, S08, S11 und S12 oder S17 und S18 führen jeweils zur gleichen Anzahl an Transportressourcen. Allerdings gibt es auch bei ähnlichen Fahrtzeitverteilungen der Strategien Unterschiede in der Anzahl an Routenzügen. So weisen die Steuerungsstrategien S01, S02, S05, S06, S09 und S10 zwar sehr ähnliche Verteilungen und Mittelwerte auf, da deren Touren alle den statisch vorbestimmten Fahrwegen folgen, die Bandbreite der notwendigen Routenzüge variiert allerdings zwischen sieben und neun. Ebenso benötigen die

²² Das zugrundeliegende Szenario ist: Layout: Werkstatt; Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik: GLT TW Int.; Anzahl Klienten: Hoch; Systemlast: Mittel; Schwankungen der Zwischenabrufrzeiten je Klienten: Keine, Routenzuglänge: Lang

Steuerungsstrategien S13, S14, S15 und S16 trotz ähnlicher Fahrtzeiten der Touren zwischen sechs und sieben Routenzügen.

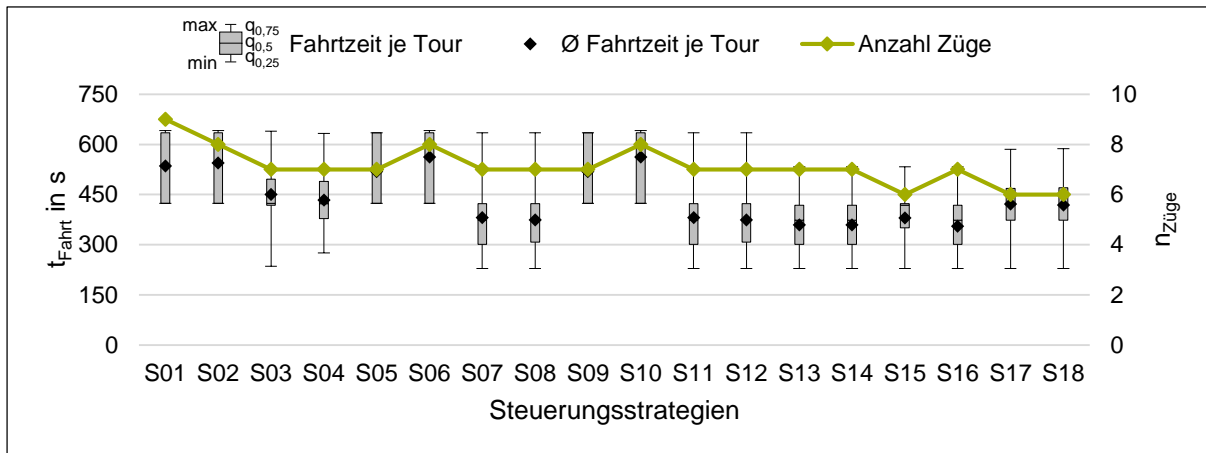


Abbildung 7-14: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Fahrtzeit je Tour

Neben der reinen Fahrtzeit einer Tour beeinflusst die Stauzeit t_{Stau} die Effizienz des Routenzugsystems. Stau entsteht in den untersuchten Systemen, wenn ein Routenzug durch einen anderen Routenzug an seiner Weiterfahrt gehindert wird. In Abbildung 7-15 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Routenzügen und der Stauzeit je Tour dargestellt. Die Stauzeit der Touren ist je Steuerungsstrategie als Boxplot mit zusätzlichen Mittelwerten abgebildet.

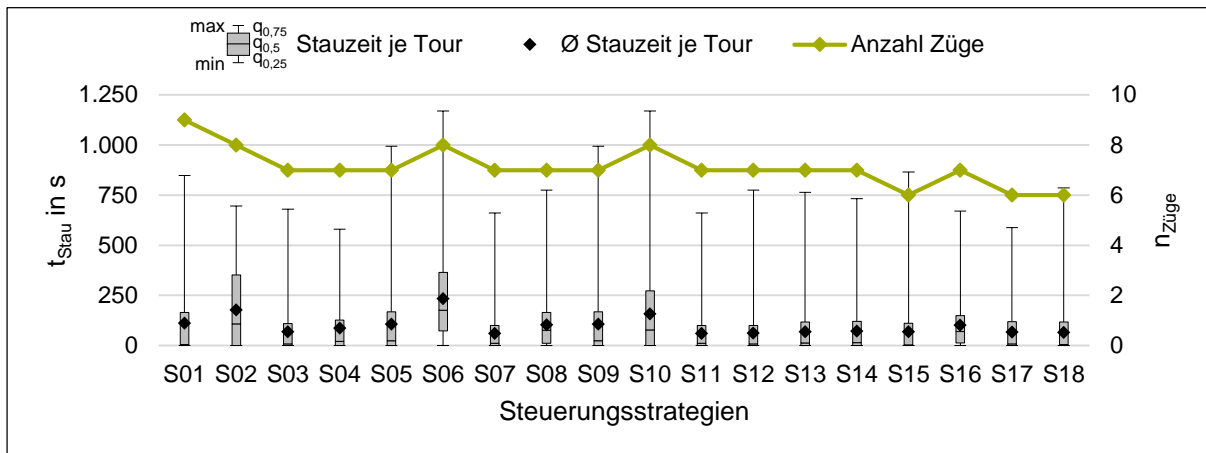


Abbildung 7-15: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Stauzeit je Tour

Die meisten Steuerungsstrategien führen zu niedrigen mittleren Stauzeiten je Tour mit ähnlichen Verteilungen. Lediglich die Strategien S02, S06 und S10 ergeben deutlich höhere und weiter verteilte Stauzeiten. Alle drei Strategien fahren die Touren auf vordefinierten Routen. Die Routenzüge können zudem flexibel zwischen den Routen

eingesetzt werden. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Vielzahl an Transportressourcen gleichzeitig auf einer identischen Route unterwegs ist, weshalb erhöhte Staugefahr besteht. Generell scheinen die Stauzeiten kaum einen Einfluss auf die Anzahl der notwendigen Routenzüge zu haben. Bei den Strategien S06 und S10 treten jedoch starke Spitzen in der Stauzeit auf, die die Effizienz der Produktionsversorgung negativ beeinflussen. Ist die Stauzeit einer Tour zu lange, kann es zu einem kurzfristigen Engpass an Transportangebot kommen. Je nach Transportauftragssituation kann dann durch mehr Transportmittel, die auf den Routen operieren, auf denen kein Stau besteht, eine robuste Produktionsversorgung erreicht werden.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Effizienz der Produktionsversorgung ist die Kapazitätsauslastung η_K der Touren. Je höher die Auslastung ist, desto mehr Ladungsträger werden pro Tour transportiert. Für alle Steuerungsstrategien treten im untersuchten Szenario sowohl maximale Tourenaustlastungen von 100 % (vier GLT) als auch minimale Kapazitätsauslastungen von 25 % (ein GLT) auf (siehe Abbildung 7-16). Besonders niedrige Verteilungen der Kapazitätsauslastung je Tour entstehen durch die Steuerungsstrategien S08, S12 und S16, die die Abfahrtszeit entweder permanent oder nach einer auslastungsorientierten Tourenstartlogik mit Zeitgrenze bestimmen und die Touren auf flexiblen Fahrwegen mit clusterübergreifend zugeteilten Routenzügen bilden. Die gleiche mittlere Auslastung mit einer höheren Streuung wird durch die Strategien S07, S11, S13 und S14 erzielt. Diese bilden die Touren innerhalb von Clustern auf vorbestimmten Fahrwegen. Die Zuteilung der Routenzüge ist auf das jeweilige Cluster beschränkt. Die Tourenstartlogik ist wiederum *Permanent* oder *Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze*. Alle Steuerungsstrategien dieser mittleren Kapazitätsauslastung führen zur gleichen Anzahl notwendiger Routenzüge, um eine robuste Produktionsversorgung zu ermöglichen. Des Weiteren weisen die Steuerungsstrategien S05, S06, S09, S10 sowie S15 eine ähnliche Verteilung der Kapazitätsauslastung je Tour mit leicht variierenden Mittelwerten auf. Werden die Ressourcen clusterbeschränkt zugeteilt, sind die Mittelwerte der Kapazitätsauslastung leicht erhöht im Vergleich zu einer clusterübergreifenden Zuteilung. Dies liegt daran, dass für ein Cluster ein größerer Ressourcenpool zur Verfügung steht und dadurch für abfahrtsbereite Touren mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eine Transportressource verfügbar ist. Beim permanenten Tourenstart ist die daraus folgende geringere Tourenaustlastung offensichtlich. Beim auslastungsorientierten Tourenstart mit Zeitgrenze kann der gemeinsame Ressourcenpool unterschiedlicher Cluster dazu führen, dass alle Ressourcen für einen gewissen Zeitraum in einem Cluster gebunden sind. Wird der Tourenstart einer Tour im anderen Cluster in diesem Zeitraum fällig und keine Transportressource steht zur Verfügung, muss die geplante Tour gesplittet werden. Dadurch entsteht zumindest für den dringenden Transportauftrag, der die Abfahrtszeit terminiert hat, eine geringer ausgelastete Tour.

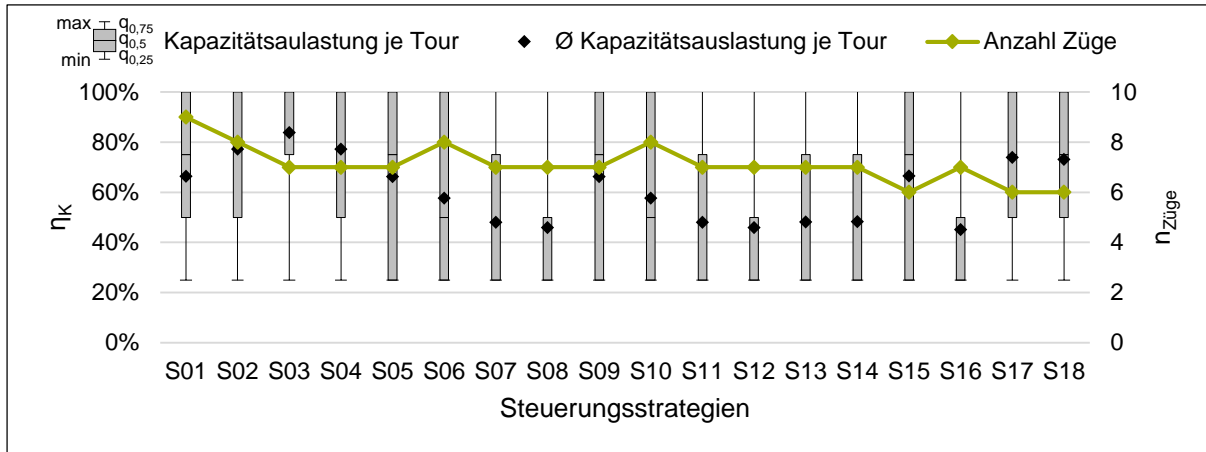


Abbildung 7-16: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Kapazitätsauslastung je Tour

Bei den Strategiepaaren S05 und S06 sowie S09 und S10 führt die niedrigere Kapazitätsauslastung der Touren zusammen mit den Spitzen in den Stauzeiten (siehe Abbildung 7-15, S. 193) zu einem erhöhten Ressourcenbedarf. Beim Vergleich der Steuerungsstrategien S15 und S16 bedingt die geringere Tourenauslastung der Abfahrtszeitstrategie *Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze* aus oben erläuterten Grund ebenso einen erhöhten Routenzugbedarf im Vergleich zur identischen Strategie nur mit permanentem Tourenstart. Die gleiche optimale Effizienz wie die Strategie S15 erzielen in diesem WIP-Bereich die beiden Steuerungsstrategien S17 und S18, deren Kapazitätsauslastung jedoch höher liegt. Auch hier ergeben die unterschiedlichen Tourenstartlogiken keine Unterschiede in der Verteilung der Tourenauslastung. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei einem effizient betriebenen Routenzugsystem so wenig Transportressourcen verwendet werden, dass auch beim permanenten Tourenstart häufig zahlreiche Transportaufträge für eine Tour zur Verfügung stehen. Dagegen führen mehr Transportaufträge auf einer Tour dazu, dass die Tour auch beim auslastungsorientierten Tourenstart mit Zeitgrenze tendenziell starten muss, bevor die Tour vollausgelastet ist, da die Zeitgrenze eher erreicht wird.

Mit die höchste Kapazitätsauslastung der Touren wird durch die getakteten Steuerungsstrategien (S01 bis S04) erreicht. Dies liegt daran, dass bei der parametrisierten kapazitiven Planauslastung von $\eta_{soll} = 0,5$ Abfahrtstakte übersprungen werden und dennoch eine robuste Versorgung erreicht wird. Hier führt jedoch die hohe Fahrtzeit der Touren (siehe Abbildung 7-14, S. 193) zu einem hohen Bedarf an Transportressourcen. Im direkten Vergleich dieser vier Strategien ist ersichtlich, dass die geringere Kapazitätsauslastung der relativ statischen Referenzstrategie S01 in einem nochmals höheren Ressourcenbedarf resultiert, wohingegen die Steuerungsstrategie S03 weniger Routenzüge aufgrund der hohen mittleren Kapazitätsauslastung benötigt. Der Effizienzunterschied zwischen den Strategien S02 und S04 entsteht durch die erhöhte

Stauzeitverteilung bei der Strategie S02 (siehe Abbildung 7-15, S. 193), die sich aufgrund des festen Fahrwegs der Strategie im Vergleich zum flexiblen Fahrweg der Steuerungsstrategie S04 ergibt.

Die Konstanz und Reaktionsfähigkeit eines Routenzugsystems lässt sich durch die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge beschreiben. In Abbildung 7-17 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Routenzügen und der Wiederbeschaffungszeit je Transportauftrag dargestellt. Die Wiederbeschaffungszeit ist je Steuerungsstrategie als Boxplot mit zusätzlichen Mittelwerten abgebildet.

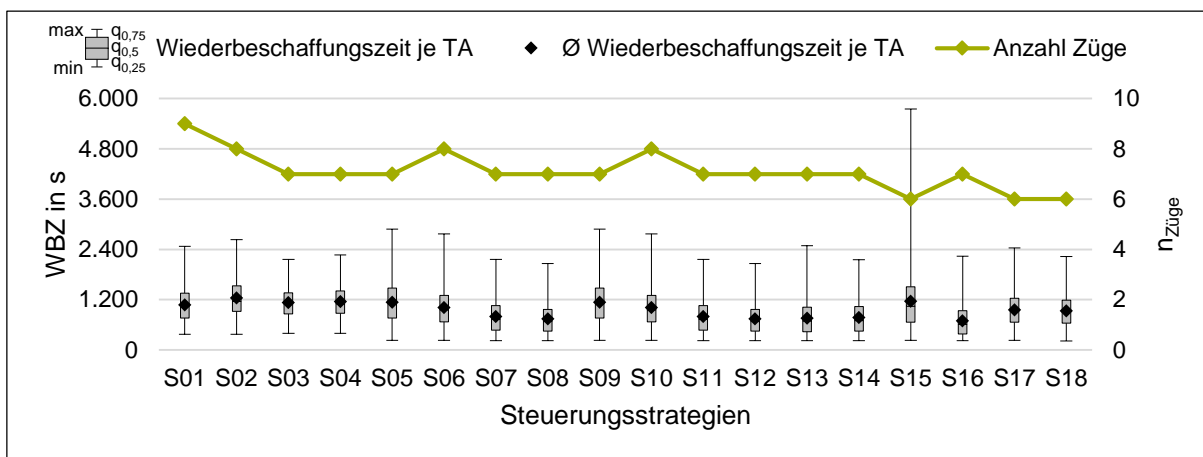


Abbildung 7-17: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge

Generell bewegen sich die Verteilungen der Wiederbeschaffungszeit unabhängig von der untersuchten Steuerungsstrategie in einem ähnlichen Intervall. Lediglich bei der Steuerungsstrategie S15 kommt es für einige Transportaufträge zu starken Ausreißern. Diese haben jedoch keinen negativen Einfluss auf die Systemeffizienz, da auch diese Werte in einem vertretbaren Rahmen liegen. Würden die Steuerungsstrategien in einem Szenario zu extrem hohen Wiederbeschaffungszeiten außerhalb des vertretbaren Rahmens führen, wäre die Strategie für dieses Szenario auch nicht stabil.

Das erläuterte Beispiel zeigt, dass die Effizienz eines Routenzugsystems durch unterschiedliche Effekte komplex beeinflusst wird. Besonders interessant ist, dass eine hohe Kapazitätsauslastung nicht unbedingt zu einer hohen Systemeffizienz führt. Vielmehr muss eine Steuerungsstrategie in der Lage sein, möglichst kurze Touren bzgl. Fahrt- und Stauzeiten, die jedoch viele Ladungsträger transportieren, zu bilden. Die beschriebenen Auswertungen lassen vermuten, dass die Kürze der Touren jedoch einen stärkeren Einfluss auf die Effizienz des Routenzugsystems hat als deren Kapazitätsauslastung.

Wie in Abschnitt 7.4.2 erläutert, hängt die Effizienz einer Steuerungsstrategie von den konkreten Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems ab. Um dennoch eine Aussage zu den mittleren Effizienzpotentialen der Steuerungsstrategien treffen zu können, werden im Folgenden die Haupteffekte der unterschiedlichen Strategien für die oben erläuterten Kennzahlen für den WIP-Bereich 25 % analysiert. Die Bewertung ist für alle WIP-Bereiche in Anhang I enthalten. Die Aussagen sind tendenziell vom WIP-Bereich unabhängig. Je mehr WIP zulässig ist, desto bessere Ergebnisse liefern jedoch die beiden Steuerungsstrategien S08 und S12. Der Haupteffekt einer Steuerungsstrategie ergibt sich jeweils als der Mittelwert aller untersuchten Szenarien, für die alle Strategien eine robuste Produktionsversorgung ermöglichen. Die Bewertung eines Szenarios ergibt sich als Mittelwert der Ergebnisse aller Beobachtungen der optimalen Experimente je Kombination aus Szenario und Steuerungsstrategie. Die Ergebnisse der Beobachtungen sind die durchschnittlichen Werte der Kennzahlen eines Simulationslaufs.

Im Mittel über alle Szenarien des Versuchsplans, für die alle Steuerungsstrategien zu einer robusten Produktionsversorgung führen, erreichen die Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 (je 3,7 Routenzüge) die höchste Einsparung an Transportressourcen im Vergleich zur relativ statischen Referenzsteuerung S01 (4,7 Routenzüge) (siehe Abbildung 7-18).

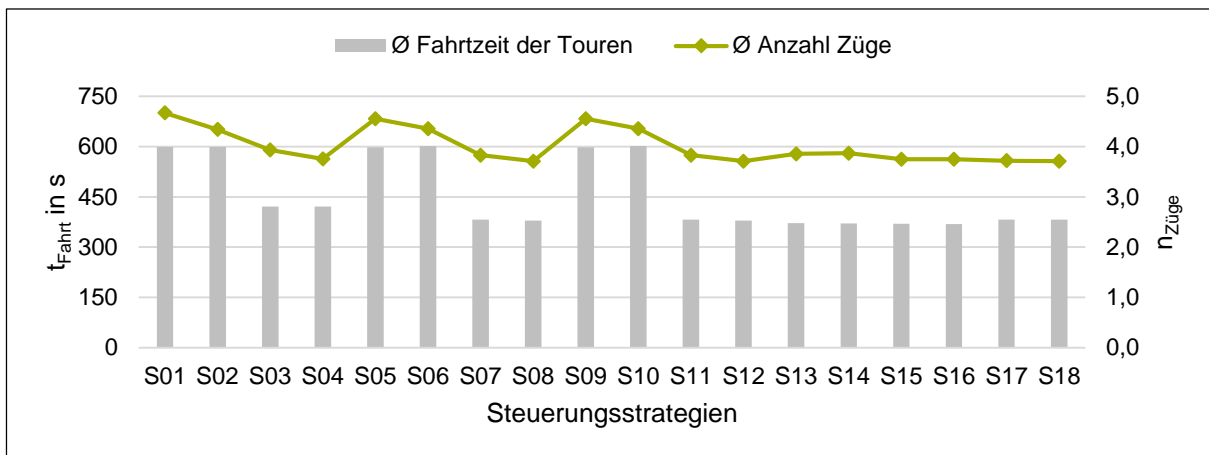


Abbildung 7-18: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

Folglich kann im Mittel durch die Anwendung dieser dynamischen Steuerungsstrategien in Routenzugsystemen ein Routenzug eingespart werden. Dies gilt als Mindestwert für alle WIP-Bereiche. Generell wird durch jede Form der Dynamisierung im Rahmen der Steuerungsstrategien die Effizienz der robusten Produktionsversorgung erhöht. Dabei erreichen die Strategien S02, S05, S06, S09 und S10 nur geringe Verbesserungen durch eine mittlere Einsparung zwischen 0,1 und 0,4 Routenzügen. Dies

liegt wiederum an der im Mittel deutlich erhöhten durchschnittlichen Fahrtzeit der Touren. In Abbildung 7-18 ist zudem die Korrelation zwischen der mittleren Fahrtzeit der Touren und der mittleren Anzahl notwendiger Routenzüge ersichtlich. Je höher die Fahrtzeit ist, desto mehr Transportressourcen sind erforderlich und umgekehrt. Zudem zeigt sich, dass weitere Einflüsse auf die Systemeffizienz bestehen.

Einer dieser Effekte ist die durchschnittliche Stauzeit der Touren (siehe Abbildung 7-19). Die mittlere Stauzeit je Tour ist für alle Steuerungsstrategien gering, für die dynamischeren Steuerungsstrategien sogar leicht erhöht. Generell beeinflussen die mittleren Stauzeiten die Effizienz der Produktionsversorgung nicht. Dennoch können bei einzelnen Steuerungsstrategien deutlich erhöhte Stillstandzeiten der Routenzüge durch die Behinderung von anderen Routenzügen entstehen (siehe Abbildung 7-15, S. 193). Im konkreten Szenario kann durch eine Vermeidung von Stau deshalb ein effizienterer Betrieb sichergestellt werden.

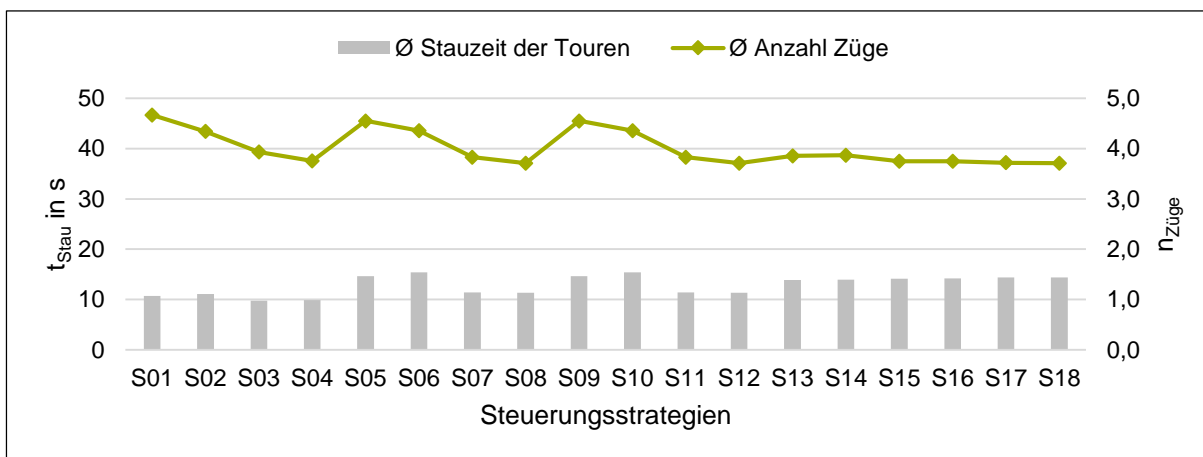


Abbildung 7-19: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

Auch im Mittel liegt die Kapazitätsauslastung der Touren bei den getakteten Steuerungsstrategien höher als bei den dynamischeren. Eine Korrelation zwischen Kapazitätsauslastung und Anzahl notwendiger Routenzüge ist in den Haupteffekten allerdings kaum wahrnehmbar. Lediglich innerhalb der dynamischen Strategien S15 bis S18 sinkt die mittlere Anzahl an Routenzügen leicht mit steigender mittlerer Kapazitätsauslastung der Touren (siehe Abbildung 7-20).

Wie schon bei der Analyse des exemplarischen Szenarios lässt sich auch bei den mittleren Werten der Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge über alle Szenarien, bei denen alle Steuerungsstrategien eine robuste Produktionsversorgung im jeweiligen WIP-Bereich ermöglichen, für den WIP-Bereich 25 % keine Korrelation zwischen

der Wiederbeschaffungszeit und der Anzahl notwendiger Züge erkennen (siehe Abbildung 7-21).

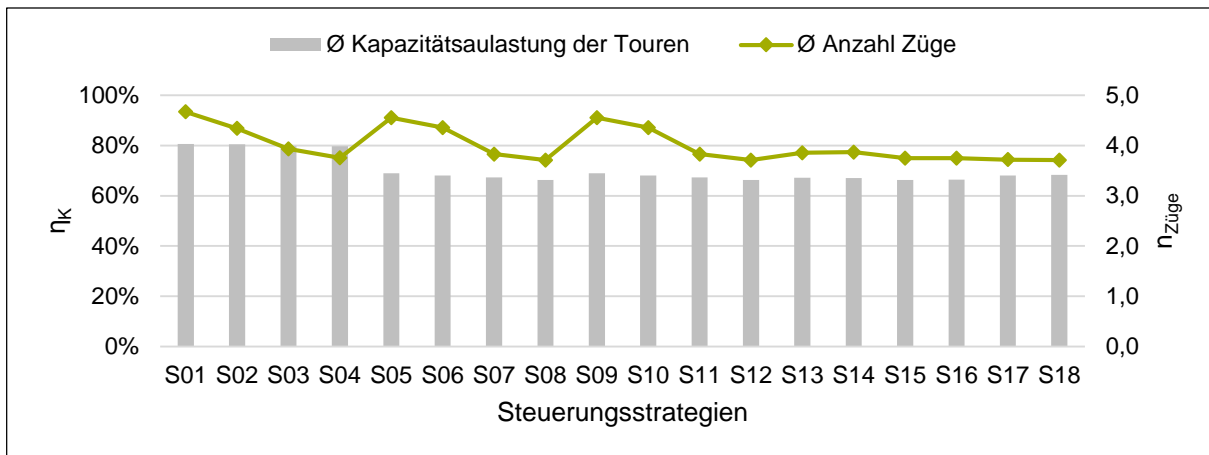


Abbildung 7-20: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

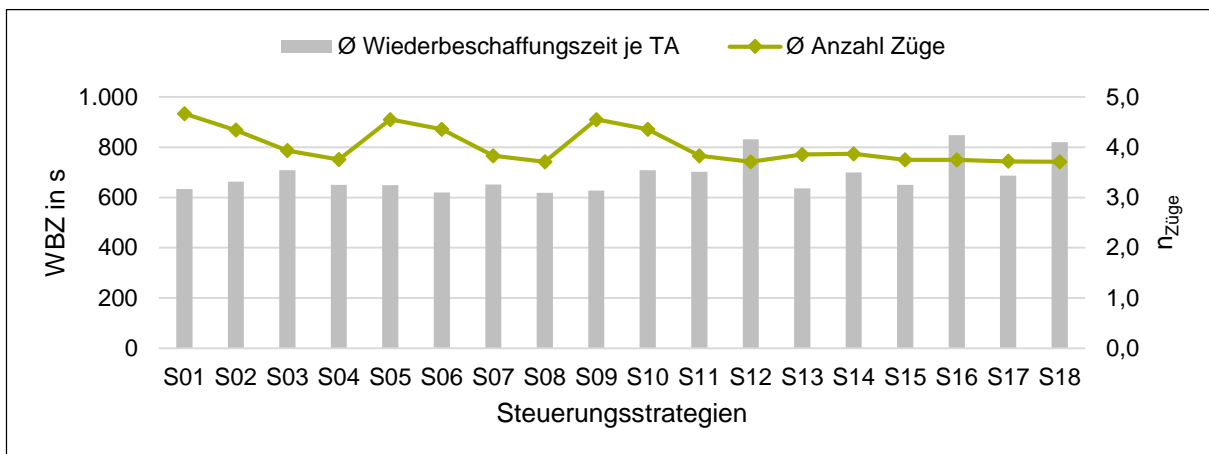


Abbildung 7-21: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

Dies liegt daran, dass alle mittleren Wiederbeschaffungszeiten auf einem insgesamt niedrigen Niveau liegen. Ist in einem Routenzugsystem mehr WIP zulässig, steigen besonders die Wiederbeschaffungszeiten der getakteten Steuerungsstrategien (S01 bis S04) sowie der Strategien S05, S06, S09 und S10 an, welche zudem generell zu einem ineffizienteren Systembetrieb führen. Dagegen bleiben die mittleren Wiederbeschaffungszeiten der anderen dynamischen Steuerungsstrategien stabil auf einem niedrigen Niveau.

Insgesamt bewirken die dynamischeren Steuerungsstrategien einen effizienteren Systembetrieb. Im Mittel kann das Effizienzpotential besonders dann ausgeschöpft

werden, wenn eine Steuerungsstrategie möglichst kurze Touren bei relativ hoher Kapazitätsauslastung bildet. Dadurch kann im Mittel ein Routenzug eingespart werden.

Bei der Betrachtung eines konkreten Szenarios werden des Weiteren Einflüsse der Stauzeiten auf die Effizienz des Systembetriebs ersichtlich. Die Wiederbeschaffungszeit ist v. a. ein Kriterium für die Beurteilung der Effektivität. Beim Effizienzvergleich können nur Szenarien verglichen werden, die von allen Steuerungsstrategien robust bedient werden. Die Wiederbeschaffungszeiten liegen dann bereits in einem tolerierbaren Bereich. Dennoch zeigt sich bei Routenzugsystemen mit mehr zulässigem WIP, dass die Wiederbeschaffungszeiten im Mittel durch die dynamischen Steuerungsstrategien deutlich reduziert werden können.

In Abbildung 7-22 ist für die vier am besten bewerteten dynamischen Steuerungsstrategien jeweils eine Häufigkeitsverteilung der Routenzugeinsparung gegenüber der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 25 % dargestellt. Ist die Einsparung negativ, werden mehr Routenzüge benötigt.

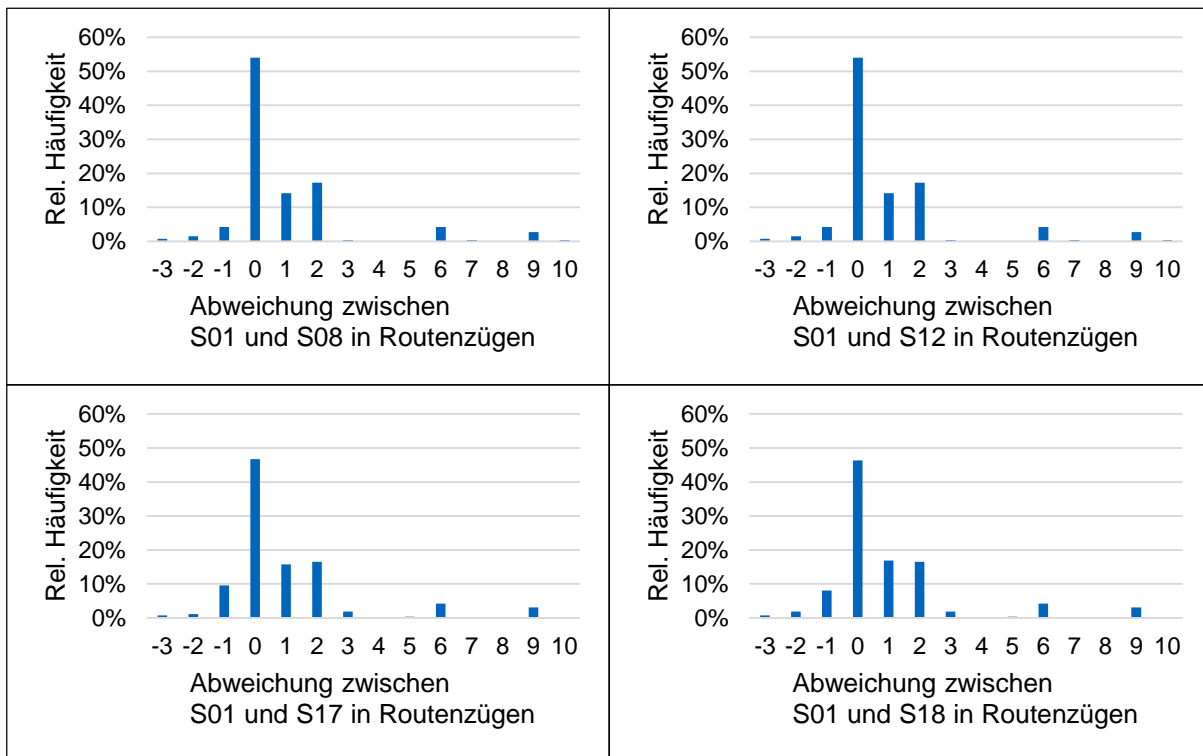


Abbildung 7-22: Effizienzpotentiale der Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 gegenüber der Referenzstrategie S01

Bei der Auswahl einer Steuerungsstrategie für ein konkretes Routenzugsystem muss immer die Kombination der individuellen Systemausprägungen betrachtet werden. Die Analyse der simulierten Einzelszenarien ergibt, dass die relativ statische

Referenzstrategie S01 nur in wenigen Experimenten hauptsächlich mit dem Layout *Rundkurs* und einer mittleren Systemlast eine effizientere Produktionsversorgung als die Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18, die im Mittel am besten bewertet wurden, erreicht. Die Ergebnisse dieser Steuerungsstrategien weichen dann ein bis drei Routenzüge vom Optimum ab. Bei den flexibleren Layouts *Montage* und *Werkstatt* sowie bei mittlerer oder hoher Systemlast können diese vier Strategien hingegen über alle WIP-Bereiche jeweils bis zu zehn Routenzüge gegenüber der Steuerungsstrategie S01 bei einer robusten Produktionsversorgung einsparen.

7.4.4 Effizienzpotentiale der Steuerungsmodule

Die einzelnen Module der konzipierten Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme enthalten jeweils statischere bzw. dynamischere oder restriktivere bzw. flexiblere Ausprägungen. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die einzelnen Ausprägungen der Steuerungsmodule die Effizienz einer robusten Produktionsversorgung beeinflussen. Dazu werden wiederum die Szenarien ausgewertet, für die alle Steuerungsstrategien eine robuste Produktionsversorgung je WIP-Bereich ermöglichen (siehe Abbildung 7-23).



Abbildung 7-23: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 25 %

Die Analyse der mittleren Effizienz in Abhängigkeit der Modulusprägungen ergibt für alle Steuerungsmodule, dass Routenzüge eingespart werden können, wenn eine dynamischere bzw. flexiblere anstatt einer statischeren bzw. restriktiveren Ausprägung in der Steuerungsstrategie verwendet wird. So werden für den WIP-Bereich 25 % jeweils im Mittel über vier Routenzüge bei der statischeren bzw. restriktiveren Ausprägung benötigt. Durch die Flexibilisierung und Dynamisierung sind im Mittel unter vier Routenzüge erforderlich. Die größte mittlere Einsparung ergibt sich durch die Flexibilisierung des Fahrwegs. Der geringste Unterschied zwischen den unterschiedlichen Ausprägungen besteht in den Haupteffekten im Modul *Abfahrtszeit*.

Um die Effizienzvorteile der dynamischen und flexiblen Ausprägungen der Steuerungsmodule statistisch zu belegen, werden Signifikanztests durchgeführt. Die Signifikanz der Haupteffekte wird durch eine einfaktorische Varianzanalyse (ANOVA²³) überprüft. Dabei wird für jedes Modul auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,1$ getestet, ob die Nullhypothese, dass es keine Effizienzunterschiede hinsichtlich der Anzahl an für eine robuste Produktionsversorgung notwendige Routenzüge zwischen den Modulusprägungen gibt, zutrifft. Die Voraussetzungen für die ANOVA, dass die Werte der Modulusprägungen voneinander unabhängig und die Varianzen der Modulusprägungen jeweils ähnlich sind, können als erfüllt betrachtet werden. Durch eine Zerlegung der Varianzen lassen sich Abweichungen vom Mittelwert danach klassifizieren, ob sie aufgrund einer Modulusprägung zu Stande gekommen sind. Als Ergebnis der ANOVA wird der p-Wert bestimmt. Dieser drückt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese zutrifft. Liegt der p-Wert unterhalb des Signifikanzniveaus α , muss die Nullhypothese abgelehnt werden. Dann gilt ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Modulusprägungen (vgl. [Sie-2017, S. 111 ff.]). Die ANOVA wurde in dieser Arbeit mit MS Excel durchgeführt. In Tabelle 7-19 ist exemplarisch die ANOVA für den Unterschied der Modulusprägungen fester und flexibler Fahrweg für den WIP-Bereich 25 % dargestellt. Varianzanalysen für alle Steuerungsmodule und WIP-Bereiche sind in Anhang I.2 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Möglichkeit einer flexiblen Fahrwegbildung innerhalb einer Steuerungsstrategie zu einer signifikanten Einsparung von Routenzügen bei einer robusten Produktionsversorgung führt, denn der resultierende p-Wert liegt deutlich unterhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,1$. Im Vergleich zu den anderen Modulen ist dieser Effekt am stärksten. Jedoch sind für alle Module mit Ausnahme des Moduls *Abfahrtszeit* für alle WIP-Bereiche signifikante Effizienzverbesserungen durch die Anwendung dynamischer und flexibler Modulusprägungen möglich.

²³ ANOVA: engl. analysis of variance

Durch die in Abschnitt 7.4 bewerteten Ergebnisse wird die zweite Forschungsunterfrage, inwiefern der Dynamisierungsgrad einer Steuerungsstrategie die Effektivität und Effizienz der Produktionsversorgung beeinflusst, als beantwortet erachtet.

Tabelle 7-19: ANOVA des Einflusses der Flexibilität der Fahrwegbildung einer Steuerungsstrategie für den WIP-Bereich 25 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Fester Fahrweg	1.566	7.002	4,47	16,26
Flexibler Fahrweg	3.132	11.855	3,79	11,69

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	491,51	1	491,51	37,20	1,15E-09	2,71
Innerhalb der Gruppen	62.042,59	4.696	13,21			
Gesamt	62.534,10	4.697				

7.5 Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Systemausprägungen

In den vorangehenden Abschnitten wurden die Effektivität und Effizienz der konzipierten Steuerungsstrategien im Vergleich zueinander bewertet. Für Routenzugsysteme, in denen nur ein geringer WIP zulässig ist, erzielte die Strategie S18 die besten Ergebnisse. Touren werden bei dieser Steuerungsstrategie auf Basis der aktuellen Transportauftragslage des Gesamtsystems durch eine integrierte Optimierung der Auftragsbündelung, der Reihenfolge der Klienten und eines flexiblen Fahrwegs gebildet. Der Tourenstart erfolgt, wenn die maximale Transportkapazität der Transportmittel erreicht ist oder ein Transportauftrag der Tour dringend wird. Als relativ statische Referenzstrategie wurde die Steuerungsstrategie S01 identifiziert. Dabei werden die Touren innerhalb von statischen Clustern gebildet. Die Transportaufträge werden nach dem FIFO-Prinzip zusammengefasst und in einer festen Reihenfolge auf einem vordefinierten Fahrweg bereitgestellt. Die Startzeitpunkte der Touren eines Clusters folgen in einem statischen Takt.

Um die dritte Forschungsunterfrage zu beantworten, wird anhand dieser beiden Steuerungsstrategien im Folgenden erläutert, wie sich die Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems auf die Effektivität und Effizienz der individuellen

Steuerungsstrategie auswirken. Dazu werden je Faktor des Versuchsplans die Haupteffekte der Stufen ausgewertet und für die WIP-Bereiche 25 % und 100 % dargestellt. Die Bewertung aller achtzehn Steuerungsstrategien ist in Anhang J aufgeführt. Die Effektivität einer Steuerungsstrategie für eine Systemausprägung wird durch den Anteil der stabilen Szenarien an allen im Versuchsplan untersuchten Szenarien, die die jeweilige Ausprägung aufweisen, beurteilt. Ein Szenario ist dann stabil, wenn die betrachtete Steuerungsstrategie eine robuste Produktionsversorgung im zulässigen WIP-Bereich ermöglicht. Die Anzahl der zugrundeliegenden Szenarien je Merkmalsausprägung ist für alle Steuerungsstrategien und WIP-Bereiche einheitlich. Deshalb können die unterschiedlichen Auswertungen bei der Betrachtung der Effektivität gegenübergestellt werden. Die Effizienz wird durch die Anzahl an, für eine robuste Produktionsversorgung notwendigen, Transportmittel bewertet. Um diese in Abhängigkeit der Ausprägungen eines Systemmerkmals zu beurteilen, wird jeweils der Mittelwert aller Szenarien betrachtet, für die die jeweilige Steuerungsstrategie für alle Ausprägungen des Merkmals eine stabile Lösung im WIP-Bereich erzielt. Aus diesem Grund kann der Trend innerhalb eines Merkmals sowie im Unterschied zu anderen Strategien und WIP-Bereichen analysiert werden. Da die jeweils zugrundeliegenden Szenarien jedoch variieren, kann kein strategie- oder WIP-bereichsübergreifender Vergleich der absoluten Mittelwerte der Merkmalsausprägungen getroffen werden.

In Abbildung 7-24 sind die Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 25 % in Abhängigkeit der Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems dargestellt.

Die höchste layoutabhängige Effektivität erreicht diese Steuerungsstrategie für Routenzugsysteme, deren Transportlayout aus einem restriktiven *Rundkurs* besteht. Je flexibler das Layout wird, desto seltener erreicht die Steuerungsstrategie S01 eine stabile Lösung im WIP-Bereich und desto mehr Routenzüge werden im Mittel benötigt, um eine robuste Produktionsversorgung zu ermöglichen. Dies liegt daran, dass die Ausmaße der Layouts *Montage* und *Werkstatt* größer sind als die des Layouts *Rundkurs*. Des Weiteren sind beim Layout *Werkstatt* Überholvorgänge aufgrund der zahlreichen Kreuzungsbereiche unwahrscheinlicher als beim Layout *Montage*. Der Unterschied dieser beiden Layouts ist jedoch gering.

Eine deutliche Abweichung in der Effektivität der Steuerungsstrategie ergibt sich für eine unterschiedliche Anzahl an Klienten. Verteilt sich die vorgegebene Systemlast auf mehr Klienten und Haltestellen, ist die gegenseitige Behinderung der Routenzüge beim Bereitstellen von Transporteinheiten im Produktionsbereich unwahrscheinlicher als bei einer geringeren Anzahl an Klienten, aber einer im Routenzugsystem gleich hohen Nachschubfrequenz. Die Effizienz wird durch dieses Merkmal kaum beeinflusst.

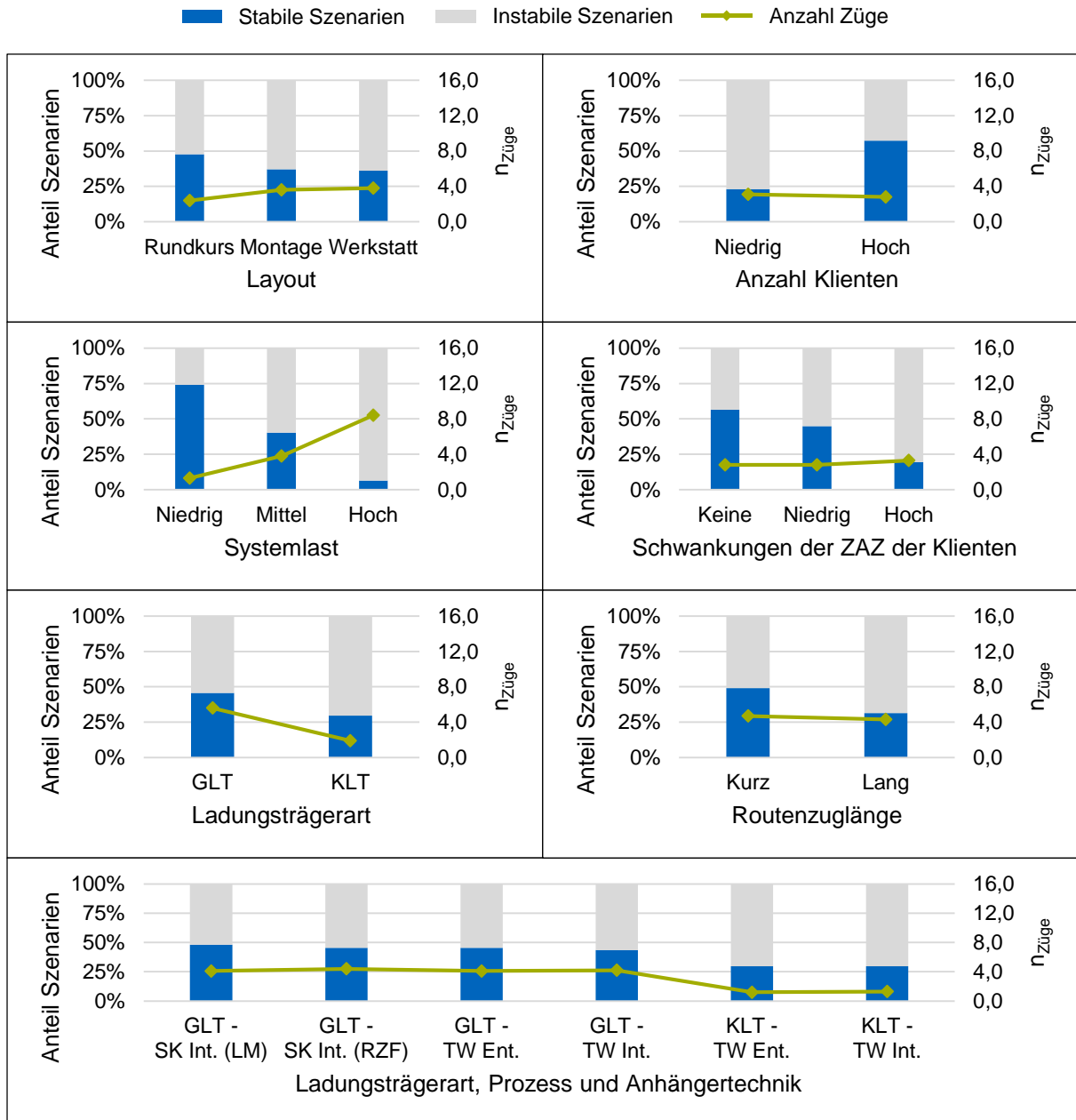


Abbildung 7-24: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 25 %

Der Zusammenhang zwischen der Systemlast und der Effektivität sowie Effizienz ist klar ersichtlich. Je höher die Nachfrage der Klienten nach Material ist, desto mehr Routenzüge werden im Mittel für eine robuste Produktionsversorgung benötigt, und desto seltener sind stabile Lösungen. Durch die gegenseitige Behinderung der Routenzüge auf den gemeinsamen statischen Fahrwegen nimmt besonders die Effektivität der Strategie S01 bei höherer Systemlast stark ab.

Ein ähnlicher, jedoch nicht so deutlicher Effekt, besteht in Abhängigkeit der Schwankungen der Zwischenabrufrzeiten der Klienten. Je höher die Schwankungen sind, desto ineffektiver ist der getaktete Nachschub, der auf durchschnittlichen Plan-Bedarfen

basiert. Die Effizienz des Routenzugsystems nimmt bei höheren Schwankungen kaum merklich ab. Dies kann u. a. daran liegen, dass sich die Schwankungen der Klienten gegenseitig nivellieren und zu einem ausgeglichenen Systembedarf führen.

Die Ladungsträgerart beeinflusst u. a. einerseits die Bereitstellzeiten und andererseits die Transportkapazität der Routenzüge. Die Handhabung eines KLT benötigt erheblich weniger Zeit als die eines GLT. Dafür ist die Tourenkapazität beim KLT-Transport deutlich höher. Dies führt beim getakteten Tourenstart dazu, dass die gut ausgelasteten Touren für KLT im Mittel wesentlich längere Zykluszeiten aufweisen als für GLT. Daher erreicht die Steuerungsstrategie S01 beim KLT-Transport eine geringere Effektivität. Für die Szenarien, in denen eine robuste Produktionsversorgung möglich ist, ergibt sich bei der KLT-Bereitstellung jedoch eine deutlich höhere Effizienz.

Die Länge eines Routenzugs bedingt die Transportkapazität einer Tour. Lange Routenzüge können mehr Transporteinheiten aufnehmen und haben daher im Mittel längere Zykluszeiten als kurze Routenzüge. Dadurch sinkt wiederum die Effektivität der getakteten Steuerungsstrategie S01 mit zunehmender Routenzuglänge. Dennoch benötigt die Strategie, falls eine robuste Produktionsversorgung möglich ist, weniger lange als kurze Routenzüge für ein ansonsten identisches Szenario.

Da die mittleren Zykluszeiten der GLT-Kombinationen für die Prozess- und Anhänger-technikausprägungen ähnlich sind, ergeben sich keine Effektivitäts- und Effizienzunterschiede der Ausprägungen. KLT-Kombinationen führen zu einer im Mittel kürzeren Zykluszeit mit stärkeren Ausreißern. Durch die Extremwerte sinkt die Effektivität. Ist allerdings eine stabile Lösung ohne starke Ausreißer in der Zykluszeit möglich, erreichen die KLT-Kombinationen eine höhere Effizienz. Die Unterschiede ergeben sich jedoch größtenteils aus der Ladungsträgerart sowie deren Auswirkungen und sind nur in geringem Umfang vom Prozess und der Anhängertechnik abhängig.

Die erläuterten Verläufe der Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 des WIP-Bereichs 25 % gelten ebenso für Routenzugsysteme, in denen mehr WIP zulässig ist. In Abbildung 7-25 sind zum Vergleich die Auswertungen für den WIP-Bereich 100 % dargestellt.

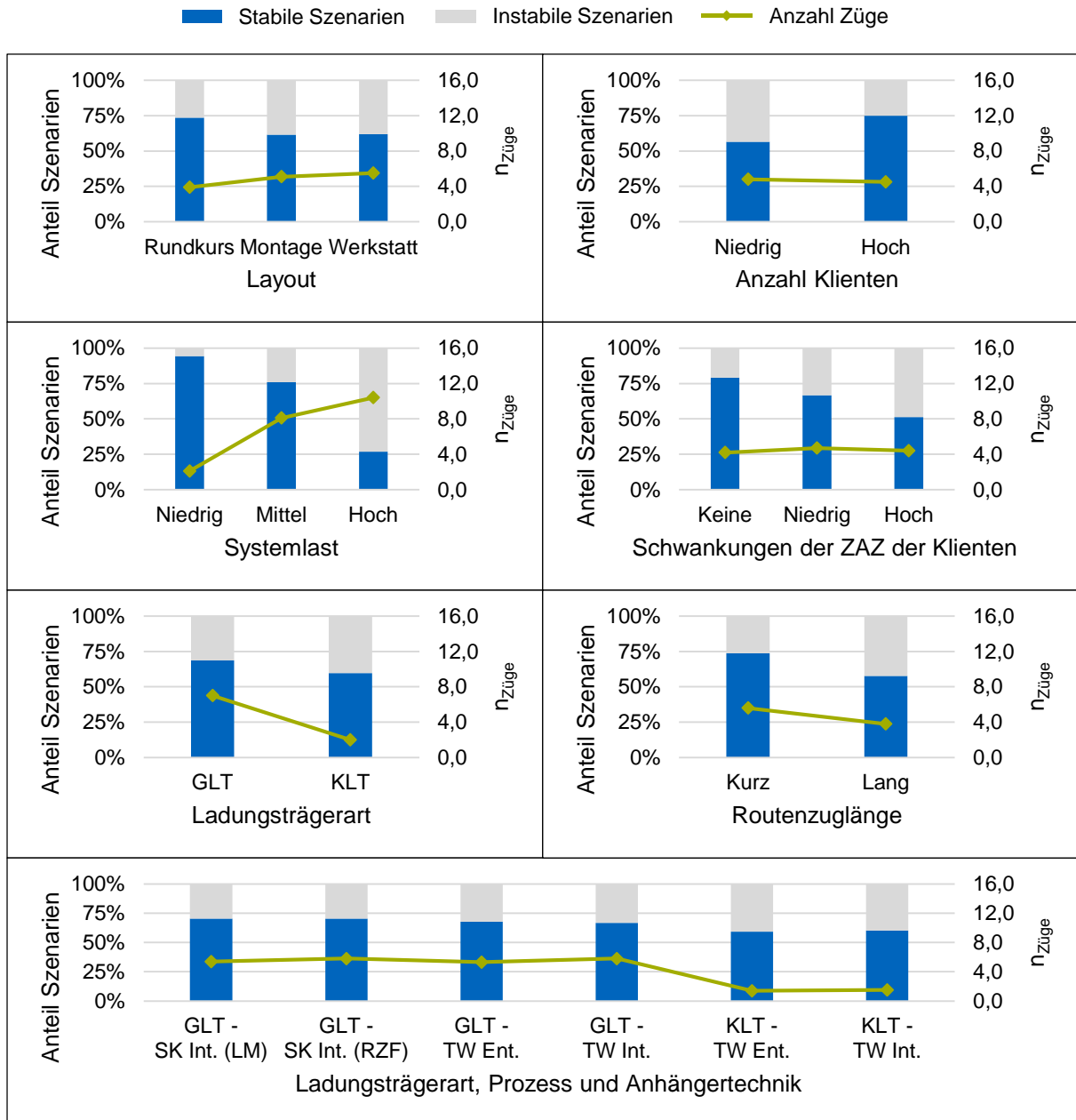


Abbildung 7-25: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 100 %

Da die Anforderung an einen geringen WIP dort niedriger ist, ist die Steuerungsstrategie S01 für jede Merkmalsausprägung effektiver als im WIP-Bereich 25 %. Dennoch wird nur bei niedriger Systemlast oder keinen Schwankungen eine Effektivität von über 75 % erzielt. Die Effizienzverläufe entsprechen denen des WIP-Bereichs 25 %, fallen je nach Merkmal aber leicht schwächer oder stärker aus.

In Abbildung 7-26 sind die Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 25 % in Abhängigkeit der Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems dargestellt.

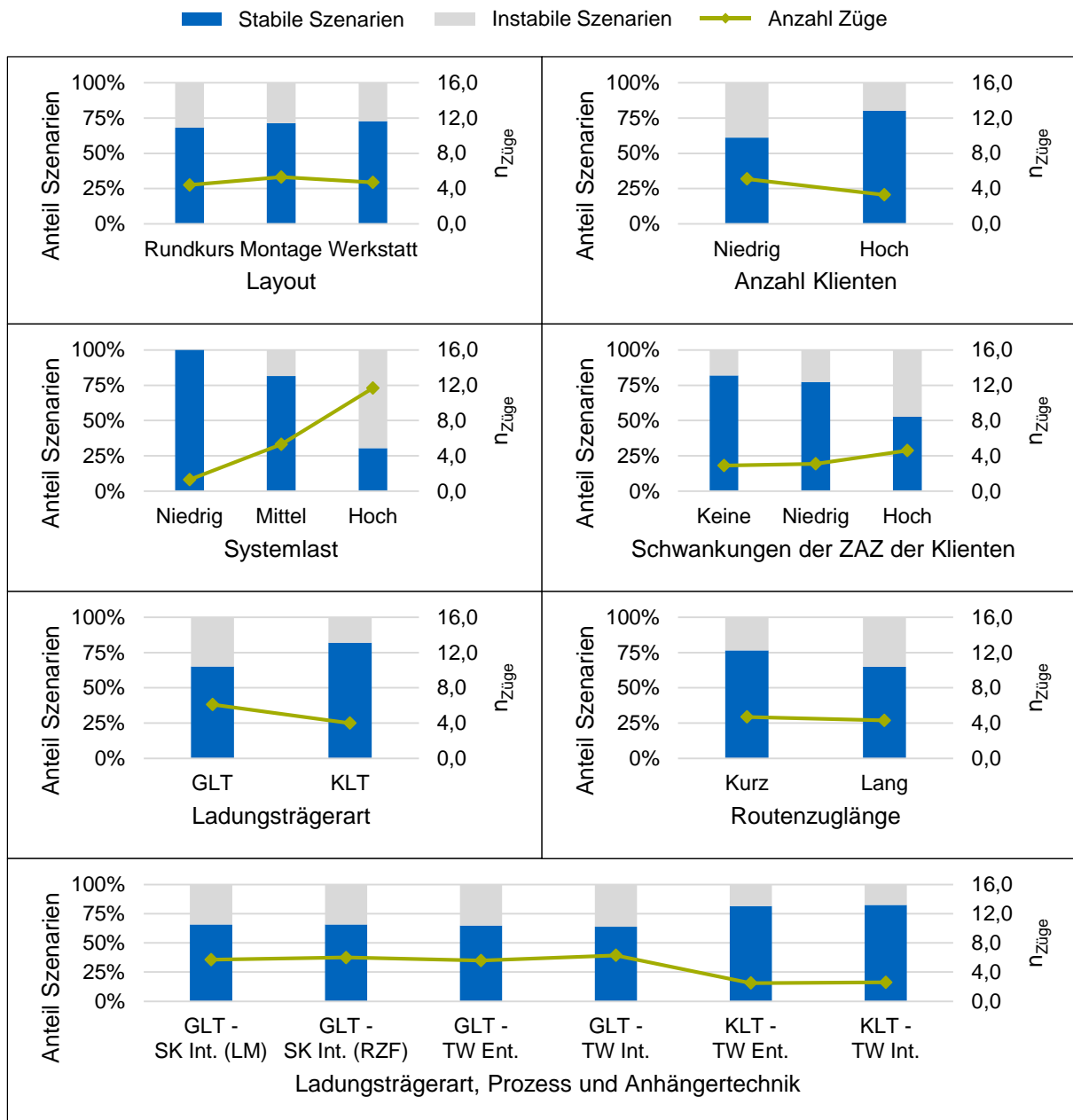


Abbildung 7-26: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 25 %

Im Gegensatz zur Strategie S01 ermöglichen die flexiblen und dynamischen Touren dieser Steuerungsstrategie eine effektivere und effizientere Produktionsversorgung, wenn auch das Layout des Transportnetzwerks flexibler ist. Zudem liegt das generelle Effektivitätsniveau deutlich über dem der Referenzstrategie.

In Abhängigkeit der Anzahl an Klienten, der Systemlast sowie der Schwankungen der Zwischenabruflzeit der Klienten und der Routenzuglänge zeigt sich wiederum die höhere Effektivität dieser Strategie. So wird z. B. für alle untersuchten Szenarien mit niedriger Systemlast eine stabile Lösung gefunden. Ansonsten entsprechen die Verläufe dieser Merkmale denen der Steuerungsstrategie S01.

Während der Effizienzverlauf der dynamischen Steuerungsstrategie S18 dem der Referenzstrategie entspricht, führt diesmal die Anwendung der Strategie in KLT-Systemen zu einer höheren Effektivität als in GLT-Systemen. Dies kann damit erklärt werden, dass die Extremwerte der KLT-Zykluszeiten, die bei einem getakteten Tourenstart möglich sind, durch die dynamischeren Tourenstartlogiken vermieden werden. Entweder führt der permanente Tourenstart zu einer hochfrequenten Abfahrt, oder die auslastungsorientierte Tourenstartlogik vermeidet aufgrund der implementierten Zeitgrenze Touren mit einer sehr hohen Anzahl an Transportaufträgen. Je mehr Aufträge auf einer Tour sind, desto eher werden die Bereitstellzeitpunkte der Aufträge in Richtung der spätesten Bereitstellzeitpunkte verschoben und desto wahrscheinlicher ist eine frühe Abfahrt mit einer gering ausgelasteten Tour. Dadurch ergeben sich kürzere Zykluszeiten und eine höhere Tourenfrequenz.

Wie bei der Referenzstrategie überträgt sich der Einfluss der Ladungsträgerart auch bei der Steuerungsstrategie S18 auf die Kombination aus Prozess und Anhängertechnik in Abhängigkeit der Ladungsträgerart. Die Strategie ist für die KLT-Szenarien effektiver und betreibt deren Routenzugsysteme effizienter als bei den GLT-Szenarien. Der reine Einfluss der Prozesse und Anhängertechniken auf die Effizienz wird durch leicht schwankende Werte sichtbar. Kombinationen mit einer längeren Zykluszeit führen zu einem höheren mittleren Bedarf an Routenzügen, um eine robuste Produktionsversorgung sicherzustellen.

Die erläuterten Verläufe der Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 des WIP-Bereichs 25 % gelten ebenso für Routenzugsysteme, in denen mehr WIP zulässig ist. In Abbildung 7-27 sind zum Vergleich die Auswertungen für den WIP-Bereich 100 % dargestellt. Da die Anforderung an einen geringen WIP dort niedriger ist, erzielt die Steuerungsstrategie S18 für jede Merkmalsausprägung eine höhere Effektivität als im WIP-Bereich 25 %. Im Gegensatz zur Steuerungsstrategie S01 erreicht die dynamischere Strategie S18 für die meisten Merkmalsausprägungen eine Effektivität von über 75 %. Die Effizienzverläufe entsprechen denen des WIP-Bereichs 25 %, fallen je nach Merkmal aber leicht schwächer oder stärker aus.

Die anderen konzipierten Steuerungsstrategien verhalten sich ähnlich. Da für diese ebenso keine Auswirkungen der Effizienzverläufe für unterschiedliche WIP-Bereiche bestehen, sind in Anhang J nur die Auswertungen des WIP-Bereichs 25 % für alle 18 Steuerungsstrategien aufgeführt. Ist mehr WIP zulässig, erreicht jede Strategie ein höheres Effektivitätsniveau (siehe auch Abschnitt 7.4.1).

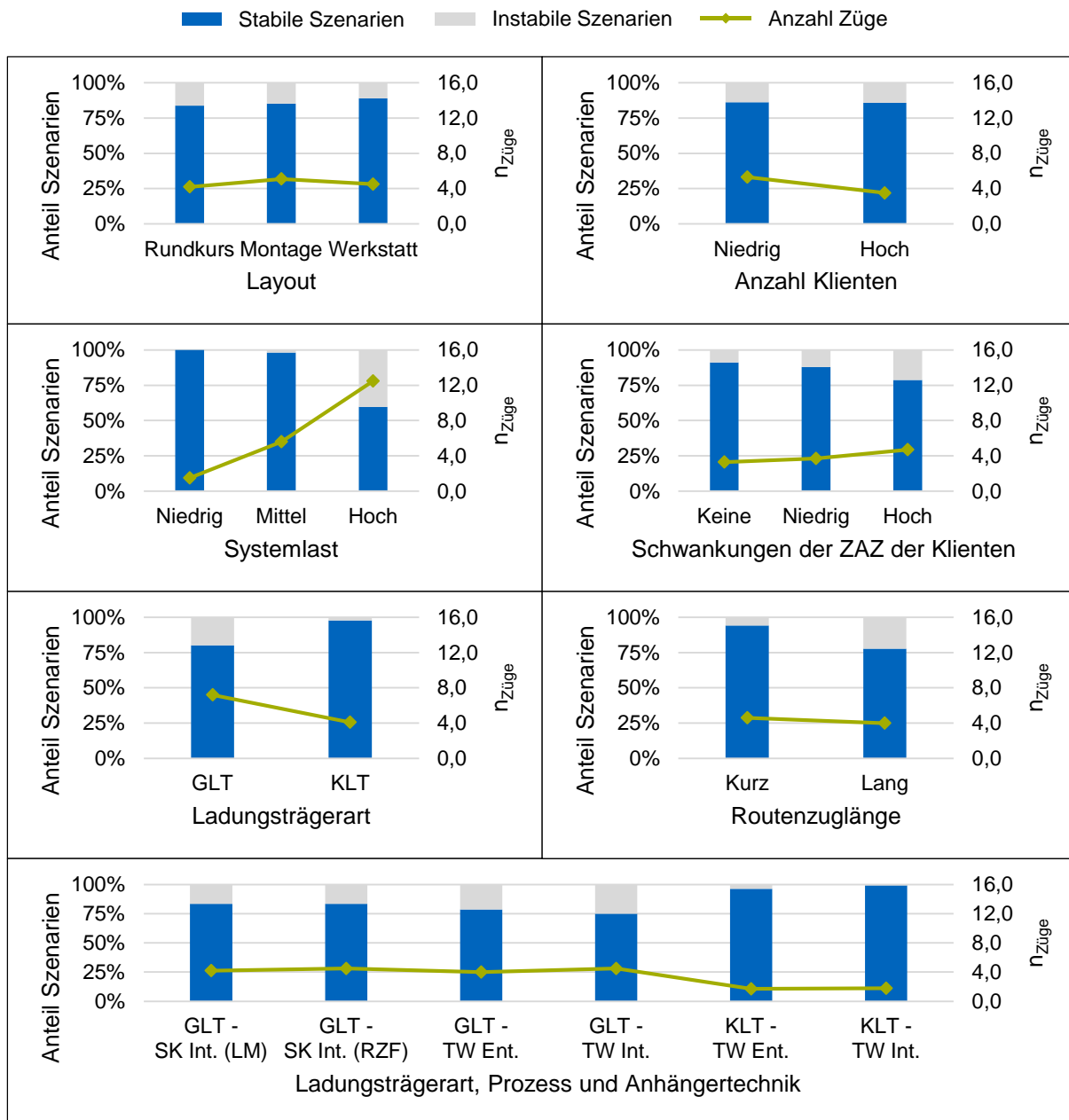


Abbildung 7-27: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 100 %

Durch die in Abschnitt 7.5 bewerteten Ergebnisse wird die dritte Forschungsunterfrage, inwiefern die steuerungsrelevanten Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems die Effektivität und Effizienz der konzipierten dynamischen Steuerungsstrategien beeinflussen, als beantwortet erachtet.

8 Kritische Betrachtung der dynamischen Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 8.1 zunächst die Erwartungen an dynamische Steuerungsstrategien den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit gegenübergestellt. Anschließend wird in Abschnitt 8.2 diskutiert, inwiefern Potential besteht, den bisherigen Anwendungsbereich von Routenzugsystemen durch den Einsatz von dynamischen Steuerungsstrategien zu erweitern. Schließlich werden Handlungsempfehlungen zur Steuerung von Routenzugsystemen gegeben (Abschnitt 8.3)

8.1 Erwartungen und Ergebnisse

Durch die simulative Untersuchung der konzipierten Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der identifizierten Routenzugreferenzsysteme konnte die Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten dynamischen Steuerungsstrategien die Effektivität und die Effizienz einer robusten Produktionsversorgung deutlich verbessern können. Im Mittel erreichen eine Dynamisierung und Flexibilisierung der Entscheidungen in jedem Steuerungsmodul eine statistisch signifikante Verbesserung im Vergleich zu statischen und restriktiven Entscheidungen. Dennoch hängt die Bewertung einer Steuerungsstrategie vom konkreten Routenzugsystem und Einsatzszenario ab. Für einzelne Szenarien erzielen die statischen und restriktiven Strategien auch genauso gute oder bessere Ergebnisse als dynamischere Varianten.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden in Abschnitt 1.2 Erwartungen an die Effektivität und Effizienz von dynamischen Steuerungsstrategien vorgestellt, die im Rahmen der in der Forschungstätigkeit dieser Arbeit durchgeführten Studie von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) erfasst wurden. Für die Kriterien *Versorgungssicherheit*, *Stau der Transportmittel*, *kapazitive Auslastung* und *Bestände im Produktionsbereich* wurden von den Studienteilnehmern die Auswirkungen einer dynamischen Routenzugsystemsteuerung, die flexible Touren auf Basis des aktuellen Systemzustands bildet, im Vergleich zu einem statisch gesteuerten Referenzsystem beurteilt. Die unterschiedlichen Erwartungen an die dynamische Steuerung von Routenzugsystemen spiegeln sich auch in den Forschungsergebnissen dieser Arbeit wider. Im Folgenden werden für jedes Kriterium die Erwartungen der Studienteilnehmer den gefundenen Ergebnissen gegenübergestellt.

Um die simulierten Auswirkungen der dynamischen Routenzugsystemsteuerung auf die Kriterien zu bewerten, werden die Ergebnisse der Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18, die insgesamt die höchste Effektivität und Effizienz in den Untersuchungen erzielen, gemeinsam mit den Ergebnissen der Referenzstrategie S01 verglichen.

In Abbildung 8-1 sind die Erwartungen an dynamische Steuerungsstrategien den Ergebnissen der Effektivität der Strategien für den WIP-Bereich 25 % gegenübergestellt. Je effektiver eine Steuerungsstrategie ist, desto mehr Szenarien werden unter Verwendung dieser Strategie robust versorgt und desto höher ist die Versorgungssicherheit, die von dieser Strategie insgesamt ausgeht.

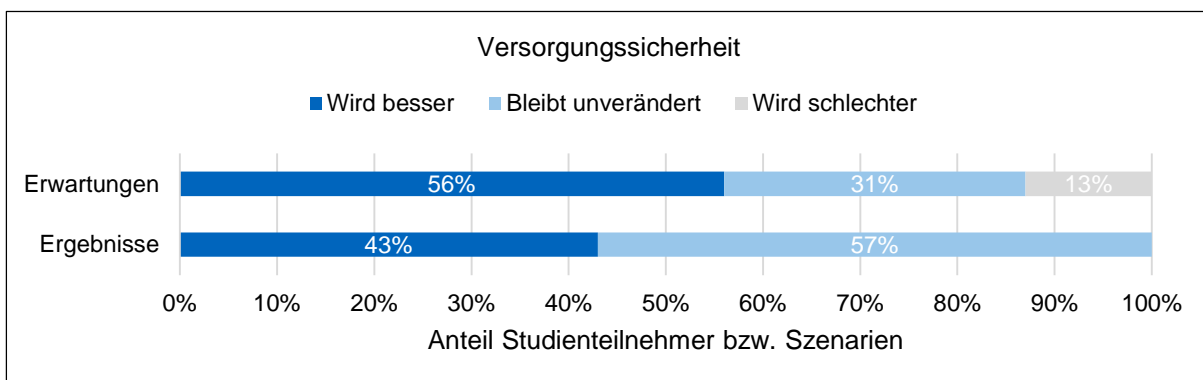


Abbildung 8-1: *Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der Versorgungssicherheit in Routenzugsystemen*

Während 56 % der Studienteilnehmer erwarten, dass die Versorgungssicherheit mit einer dynamischen Steuerungsstrategie steigt, gehen 31 % davon aus, dass diese unverändert bleibt. 13 % geben zudem an, dass die Versorgungssicherheit abnimmt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Effektivität der dynamischen Steuerungsstrategien in keinem Szenario schlechter ist als bei der Referenzsteuerungsstrategie S01. In 57 % der Szenarien erzielen sowohl die dynamischen Strategien als auch die Steuerungsstrategie S01 eine robuste Lösung. In 43 % der untersuchten Szenarien mit einer stabilen Lösung ermöglichen nur die dynamischen Steuerungsstrategien eine robuste Produktionsversorgung.

Die Erwartungen und die Ergebnisse hinsichtlich des Staus der Transportmittel sind in Abbildung 8-2 dargestellt. Als Ergebnisse werden die mittleren Stauzeiten der vier dynamischen Strategien mit der Strategie S01 für jedes Szenario verglichen, für das sowohl die dynamischeren Strategien als auch die Referenzstrategie eine stabile Lösung im WIP-Bereich 25 % erreichen. Im Gegensatz zu den hohen Erwartungen wird die Stausituation nur in 18 % der untersuchten Szenarien durch die dynamischen Steuerungsstrategien verbessert und bleibt in weiteren 18 % unverändert, falls auch die Strategie S01 eine robuste Versorgung ermöglicht. In 64 % dieser Szenarien erhöht

sich dann sogar der Stauanteil durch eine dynamischere Steuerungsstrategie. Dies lässt darauf schließen, dass ein erhöhtes Stauaufkommen bei der Referenzstrategie S01 zügig zu einem instabilen System führt. Generell ist der Stauanteil in den untersuchten robusten Szenarien unabhängig von der Steuerungsstrategie im Mittel gering.

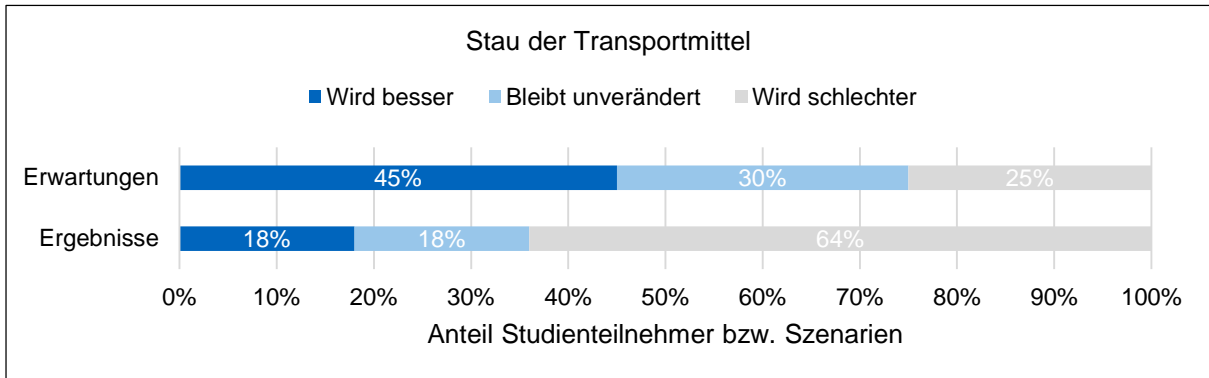


Abbildung 8-2: *Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich des Staus der Transportmittel in Routenzugsystemen*

Hinsichtlich der kapazitiven Auslastung der Touren des Routenzugsystems übertreffen die Erwartungen an die dynamischen Steuerungsstrategien deutlich die Ergebnisse (siehe Abbildung 8-3). Während 69 % der Studienteilnehmer eine Verbesserung erwarten, wird diese nur in 10 % der Szenarien erreicht. In 48 % der Fälle verschlechtert sich zudem die Tourenauslastung. Als Grundlage der Auswertung dienen je stabilem Szenario des WIP-Bereichs 25 % wiederum der Mittelwert der Strategien S08, S12, S17 und S18 im Vergleich zur durchschnittlichen Kapazitätsauslastung der Steuerungsstrategie S01. Die geringere Kapazitätsauslastung der Touren der dynamischen Steuerungsstrategien ergibt sich aus der Tourenstartlogik. Während beim getakteten Tourenstart die Transportaufträge über mindestens einen Takt gesammelt und dann gemeinsam auf einer Tour kombiniert werden können, starten Touren beim permanenten Tourenstart und bei der auslastungsorientierten Tourenstartlogik mit Zeitgrenze im Schnitt deutlich eher.

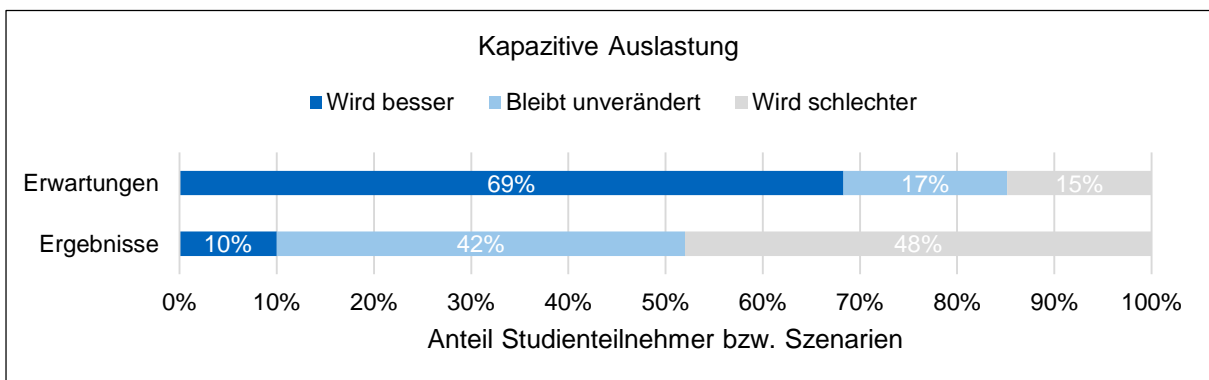


Abbildung 8-3: *Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der kapazitiven Auslastung der Transportmittel in Routenzugsystemen*

Die Effizienz einer Produktionsversorgung ergibt sich insbesondere aus den beiden Kenngrößen *Bestände im Produktionsbereich* und *Anzahl notwendiger Routenzüge*, um eine robuste Produktionsversorgung zu erreichen. Die gleichzeitige Minimierung beider Größen führt zu einem Zielkonflikt. 48 % der Studienteilnehmer erwarten, dass die Bestände im Produktionsbereich durch eine dynamische Routenzugsystemsteuerung abnehmen, und weitere 44 % gehen davon aus, dass die Bestände unabhängig von einer Dynamisierung der Steuerungsstrategie sind. Um die Simulationsergebnisse den Erwartungen gegenüberzustellen, wird jeweils unabhängig von den WIP-Bereichen für jede festgesetzte Anzahl an Routenzügen im Intervall ein bis 20 Züge ermittelt, ob eine stabile Produktionsversorgung durch eine Strategie für ein Szenario erzielt wird und wieviel WIP dazu notwendig ist. Die Veränderung der Bestände im Produktionsbereich wird schließlich je Szenario durch einen Vergleich der Referenzstrategie S01 mit den dynamischen Strategien bewertet. In Abbildung 8-4 ist dargestellt, dass die Ergebnisse der Untersuchungen den Erwartungen ähneln. In 40 % der Szenarien wird eine Reduzierung des WIP durch dynamische Steuerungsstrategien erreicht, in 41 % bleiben die Bestände im Produktionsbereich unverändert. Jedoch erzielt die statische Referenzstrategie in 19 % der stabilen Szenarien eine Produktionsversorgung mit weniger WIP bei gleicher Anzahl an Zügen. Durch die Einsparung von Beständen im Produktionsbereich können besonders bei KLT-Prozessen die höchsten absoluten Kosten reduziert werden (vgl. [Mar-2015]).

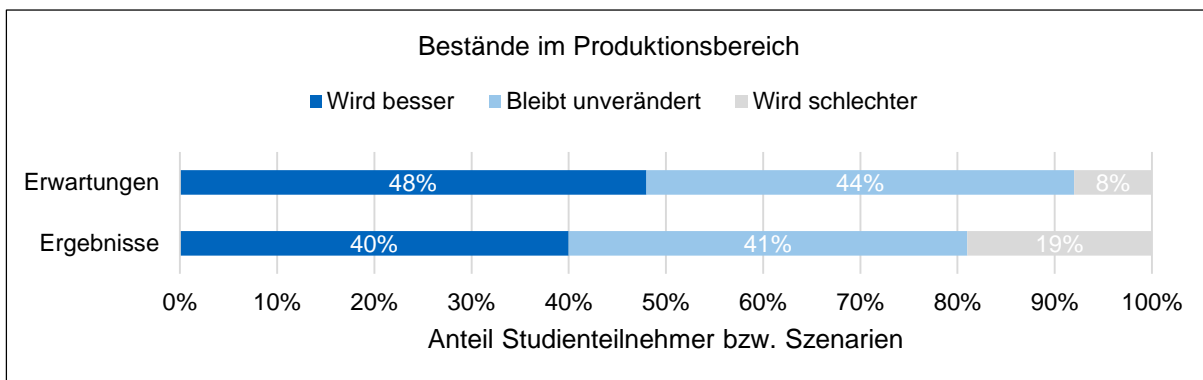


Abbildung 8-4: *Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der Bestände im Produktionsbereich in Routenzugsystemen*

Der große Vorteil der dynamischen Steuerungsstrategien besteht in 44 % der untersuchten stabilen Szenarien für den WIP-Bereich 25 % des Weiteren darin, dass weniger Routenzüge zum Erreichen einer robusten Produktionsversorgung notwendig sind als bei der Referenzstrategie S01 (siehe Abbildung 8-5). In 42 % wird dieselbe Anzahl an Transportressourcen benötigt. 13 % der simulierten stabilen Szenarien erreichen allerdings eine effizientere Produktionsversorgung durch Anwendung der Steuerungsstrategie S01. Erwartungen hinsichtlich der Einsparung von Transportressourcen wurde in der Studie von *Lieb et al.* (vgl. [Lie-2017a]) nicht erfasst. Je nach simuliertem

Szenario ist der erhöhte Bedarf an Transportressourcen einer Steuerungsstrategie entweder regelmäßig oder zeitlich punktuell erforderlich. Auch falls die Transportbedarfsspitzen nur selten auftreten, sind dafür in bestehenden Systemen kostenintensive Sondertransporte notwendig, für die Ressourcen vorgehalten werden müssen. Durch die Wahl der effizienteren Steuerungsstrategie können diese Sondertransporte reduziert bzw. sogar vermieden werden. Dynamische Steuerungsstrategien vereinfachen zudem die Einplanung dieser Transporte, da sie implizit in den Steuerungsalgorithmen berücksichtigt sind.

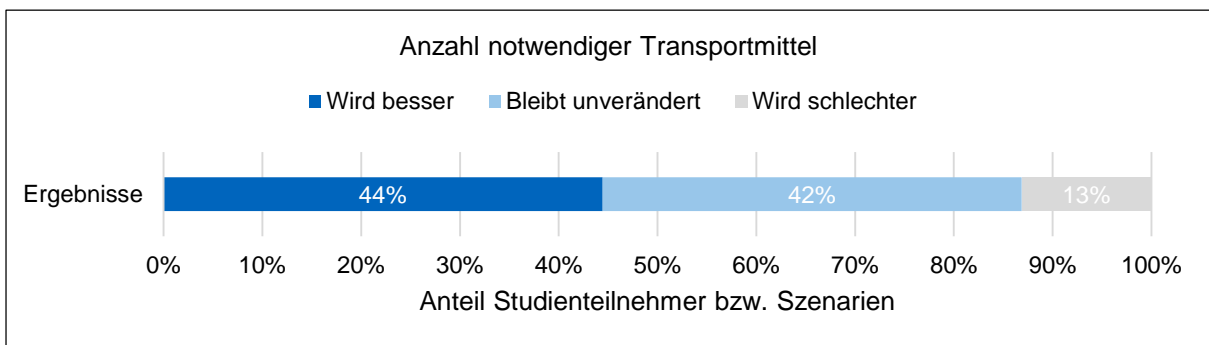


Abbildung 8-5: Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der Anzahl an notwendigen Transportmitteln in Routenzugsystemen

8.2 Erweiterung des Anwendungsbereichs von Routenzugsystemen

In Abschnitt 2.3 wurde auf Basis der Literatur der bisherige Anwendungsbereich von Routenzugsystemen zusammengefasst. Die Einflussfaktoren auf die Entscheidung, ob ein Routenzugsystem die geeignete Wahl zur Produktionsversorgung darstellt, lassen sich zunächst in die Kategorien *Layout*, *Transporteinheiten* und *Teilespektrum* einteilen. Daneben werden in der Literatur Einflussfaktoren mit dem Fokus auf die Bewältigung von kurzfristigen Transportbedarfsschwankungen diskutiert, die sich in die Kategorien *Tourenbildung* und *Prozesse* unterteilen.

Im Folgenden wird für jeden Einflussfaktor (siehe Tabelle 2-13, S. 33) überprüft, ob die bisherige Tendenz unter der Anwendung von dynamischen Steuerungsstrategien Bestand hat oder ob Potential zu einer Erweiterung des Anwendungsbereichs von Routenzugsystemen besteht.

Für die Kategorie *Layout* werden in der Literatur die Einflussfaktoren *Anzahl an Klienten*, *Entfernung der Haltepunkte* und *Flexibilität des Transportnetzwerks* beschrieben. Routenzugsysteme eignen sich besonders dann zur Produktionsversorgung, wenn viele Klienten, deren Haltepunkte weit voneinander entfernt sind, in einem flexiblen

Transportnetzwerk bedient werden. Die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit bestätigen diesen Anwendungsbereich. Während es beim kleinen Layout *Rundkurs* häufiger zu gegenseitigen Behinderungen der Routenzüge kommt, kann bei den größeren Layouts, deren Haltepunkte weiter voneinander entfernt sind, eine insgesamt effektivere Produktionsversorgung ermöglicht werden. Ebenso steigt die Effizienz der dynamischen Steuerungsstrategien beim Layout *Werkstatt*, da die Fahrwegmöglichkeiten flexibler sind als beim Layout *Montage*. Eine deutlich höhere Effektivität und Effizienz ergibt sich des Weiteren bei den Szenarien mit mehr Klienten im Vergleich zu den Systemen mit weniger Klienten und Haltestellen, da sich der Bedarf gleichmäßiger im Transportnetzwerk verteilt und dadurch die gegenseitige Behinderung der Routenzüge reduziert wird. Zudem verteilt sich die Systemlast auf mehrere Klienten, wodurch die notwendige Versorgungsfrequenz je Klienten abnimmt.

Die Kategorie *Transporteinheiten* setzt sich in der Literatur aus den Einflussfaktoren *Vielfalt, Ladungsträger, Gewicht* und *Transportkapazität je Tour* zusammen. Da in dieser Arbeit nur Routenzugsysteme mit homogenen Transporteinheiten untersucht wurden, kann im Vergleich zu heterogenen Transporteinheiten keine Aussage getroffen werden. Für die weiteren Faktoren eignen sich Routenzugsysteme nach dem Stand der Wissenschaft besonders dann, wenn kleine Ladungsträger mit einem niedrigen Gewicht auf Touren bereitgestellt werden, deren Transportkapazität hoch ist. Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass die Zykluszeit bei KLT-Touren im Mittel zwar kleiner ist, jedoch auch Extremwerte durch die hohe Tourenkapazität auftreten. Eine robuste Produktionsversorgung ist dann gefährdet. Durch die dynamischen Steuerungsstrategien können allerdings die Effektivität der Produktionsversorgung sowohl für KLT als auch GLT deutlich verbessert werden. Jedoch wird auch ersichtlich, dass kurze Routenzüge mit geringerer Transportkapazität einen effektiveren und effizienteren Systembetrieb ermöglichen. Die Transportkapazität muss so gewählt werden, dass möglichst viele Transporteinheiten gebündelt werden können und gleichzeitig die Zykluszeit der Tour gering bleibt. Dabei beeinflusst besonders die mittlere Fahrtzeit einer Tour die Effizienz des Routenzugsystems. Durch die dynamischen Steuerungsstrategien können wesentlich bessere Lösungen dieses Zielkonflikts erreicht werden als durch statische, getaktete Systeme.

Das Teilespektrum beeinflusst die Eignung eines Routenzugsystems in Abhängigkeit des Durchsatzes und der Schwankungen der Transportbedarfe der Klienten. Ein Routenzugsystem ist laut der Literatur dann besonders geeignet, wenn keine Extremwerte im Durchsatz auftreten und die Schwankungen gering bleiben. Die dynamischen Steuerungsstrategien erreichen im Vergleich zur Referenzstrategie für alle untersuchten Systemlasten eine deutlich höhere Effektivität. Bei sehr hoher Systemlast ist diese jedoch nach wie vor geringer. Dies gilt ähnlich für die Schwankungen der

Zwischenabrufzeiten der Klienten. Je höher diese sind, desto geringer ist die Effektivität der dynamischen Steuerungsstrategien. Der Abwärtstrend verläuft im Vergleich zur relativ statischen Referenzstrategie jedoch nicht so steil. Generell ist das Effektivitätsniveau der dynamischen Strategien wiederum höher. Je nach Einsatzszenario können die hohen Schwankungen an den Klienten zudem zu einer Nivellierung der Transportbedarfsschwankungen des Gesamtsystems führen. Von daher ändert sich der in der Literatur beschriebene Trend für die Eignung in Abhängigkeit des Teilspektrums durch den Einsatz einer dynamischen Steuerungsstrategie nicht. Die Eignung an sich steigt jedoch insgesamt.

Mit dem Fokus auf kurzfristige Transportbedarfsschwankungen werden Routenzugsysteme in der Literatur besonders dann als geeignet eingestuft, wenn der Tourenstartabstand niedrig ist. Dieser Trend wird durch die Ergebnisse dieser Arbeit klar bestätigt, da die Reaktionsfähigkeit des Systems steigt. Des Weiteren beschreibt der Stand der Wissenschaft lange Routen als geeigneter als kurze Routen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch, dass besonders im Zusammenhang mit den dynamischen Steuerungsstrategien Touren, die eine kurze Fahrtzeit und damit einen kurzen Fahrweg haben, zu einer effektiveren und effizienteren Produktionsversorgung führen, da wiederum die Reaktionsfähigkeit des Routenzugsystems zunimmt.

Entkoppelte Prozesse bei der Handhabung der Transporteinheiten in Routenzugsystemen werden als geeigneter zur Bewältigung von kurzfristigen Transportbedarfsschwankungen beurteilt als integrierte Prozesse. Dies liegt daran, dass bei einem von der Tour entkoppelten Prozess bestimmte Schritte zeitlich parallel zur eigentlichen Tour stattfinden und die Zykluszeit in Folge verkürzt wird. Die Bereitstellung des Materials an den Klienten findet jedoch in allen untersuchten Routenzugsystemen in die Tour integriert statt. Der zeitliche Vorteil eines an der Quelle entkoppelten Prozesses wird in der Effizienz der Produktionsversorgung ersichtlich, die Effektivität der Steuerungsstrategien ist von den untersuchten Prozessvarianten jedoch unabhängig. Generell erreichen die dynamischen Steuerungsstrategien für alle Prozesse wiederum eine höhere Gesamteffektivität als die Referenzsteuerung.

Insgesamt behalten die meisten der in der Literatur beschriebenen Trends auch bei der Anwendung einer dynamischen Routenzugsystemsteuerung ihre Gültigkeit. Lediglich die Eignung in Abhängigkeit der Tourenkapazität und Tourenlänge kehrt sich durch die Ergebnisse dieser Arbeit um. Für alle Einflussfaktoren wird durch die dynamischen Steuerungsstrategien jedoch eine höhere Effektivität als durch eine Steuerung, die Touren getaktet auf vordefinierten Routen bildet, erreicht. Dadurch kann der Anwendungsbereich von Routenzugsystemen erweitert werden. Da beinahe jedes Routenzugsystem in den Systemausprägungen und Einsatzszenarien individuell ist, muss

besonders die Effizienz einer Steuerungsstrategie und damit die Effizienz des Routenzugsystems immer unter Betrachtung des konkreten Einsatzszenarios beurteilt werden. Denn je nach Szenario benötigt die Referenzstrategie, besonders bei sehr restriktiven Layouts und mittlerem Durchsatz, weniger Transportressourcen als eine dynamischere Routenzugsystemsteuerung.

8.3 Handlungsempfehlungen zur Steuerung von Routenzugsystemen

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen die Potentiale der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich einer effektiven und im Mittel effizienten, robusten Produktionsversorgung nach. Dennoch können je nach Einsatzszenario statischere Steuerungsstrategien zu einem effizienteren Systembetrieb führen. Daher gilt:

Handlungsempfehlung 1

Die Auswahl einer Steuerungsstrategie für ein innerbetriebliches Routenzugsystem zur Produktionsversorgung muss immer in Abhängigkeit des individuellen Systems sowie des zeitabhängigen Einsatzszenarios erfolgen. Eine Simulation kann dabei unterstützen. Die Ergebnisse dieser Arbeit können als Grundlage zur Vorauswahl der für ein konkretes Szenario zu betrachtenden Steuerungsstrategien verwendet werden.

Sofern deterministische Transportbedarfe in einem Routenzugsystem bekannt sind, und diese auch mit absoluter Sicherheit eintreten, wird eine globale Optimierung, die für den gesamten Betrachtungszeitraum individuelle Touren nach einem festen Fahrplan bildet, immer eine effizientere Produktionsversorgung ermöglichen als die in dieser Arbeit konzipierten dynamischen Steuerungsstrategien. Diese können nur für den aktuellen Systemzustand ein lokales Effizienzoptimum erreichen.

Deterministische Einsatzszenarien sind in realen Routenzugsystemen allerdings höchst selten. Bisher wurden daher häufig Strategien empfohlen und auch verwendet, bei denen statische Routen mit festen Fahrwegen und getakteten Touren aufgrund durchschnittlicher Transportbedarfe gebildet werden (vgl. [VDI-5586b]). Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass diese Strategien in manchen Einsatzszenarien zu einer optimal effizienten und robusten Produktionsversorgung führen können. In einem überwiegenden Teil der Routenzugsysteme führen diese Steuerungsstrategien aber zu keiner stabilen Lösung, oder es gibt Strategien, mit denen das Routenzugsystem effizienter betrieben werden könnte. Dabei haben die dynamischen Steuerungsstrategien nicht nur für große Routenzugsysteme erhebliches Effizienzpotential, sondern

auch gerade bei KMU, bei denen aufgrund fehlender Transparenz Transportaufträge häufig nicht deterministisch bekannt sind. Daher gilt:

Handlungsempfehlung 2

Die derzeit häufig empfohlene Steuerung von Routenzugsystemen, bei der getaktete Touren auf statisch vordefinierten Routen operieren, sollte nicht als Standardlösung dienen. In einem Großteil der Routenzugsysteme und Einsatzszenarien wird durch eine dynamischere Routenzugsystemsteuerung eine effizientere robuste Produktionsversorgung ermöglicht.

Grundlage für jede der in dieser Arbeit konzipierten dynamischen Steuerungsstrategien ist die elektronische Erfassung der Transportaufträge direkt nach dem Auftreten des Transportbedarfs. Während im Jahr 2013 erst 40 % der Teilnehmer einer Studie angaben, die Transportaufträge elektronisch zu erfassen (vgl. [Inf-2013]), erhöhte sich der Anteil bis 2017 auf 87 % (vgl. [Lie-2017a, S. 74]). Je nach dynamischer Steuerungsstrategie sind weitere Informationen zu den Transportaufträgen notwendig. In 47 % der Routenzugsysteme werden u. a. Bereitstellzeitfenster mit dem Transportauftrag übermittelt [Lie-2017a, S. 74]. Des Weiteren werden in vielen bestehenden Routenzugsystemen die Transportaufträge zwar elektronisch erfasst, aber erst mit einem Zeitverzug zur Bedarfsentstehung durch den Routenzugfahrer oder einen weiteren Mitarbeiter nachgefragt [Lie-2017a, S. 29]. Daher gilt:

Handlungsempfehlung 3

Um eine dynamische Routenzugsystemsteuerung einsetzen zu können, muss zuerst die elektronische Erfassung der Transportaufträge sichergestellt werden. Zudem darf zwischen der Entstehung des Transportbedarfs und dem Materialabruf kein Zeitverzug entstehen. Dies kann entweder durch einen automatischen Abruf per Sensor oder durch einen zügigen elektronischen Abruf durch einen Produktionsmitarbeiter oder einen weiteren Logistikmitarbeiter geschehen. Ein Abruf durch den Routenzugfahrer sollte vermieden werden. Durch eine weitere digitale Vernetzung der Informationen im Routenzugsystem können zudem die Transparenz für die Steuerungsentscheidungen verbessert und komplexere Strategien umgesetzt werden.

Die in dieser Arbeit konzipierten Steuerungsstrategien sowie die Beschreibung deren algorithmischer Ausgestaltung stellen die Basis für die Implementierung in ein Transportleitsystem dar. Dennoch wurden bei der Entwicklung der Strategien Annahmen getroffen, die die Randbedingungen in realen Routenzugsystemen nur abstrakt berücksichtigen. Diese sind u. a.:

- Ein Transportauftrag entspricht einer Transporteinheit.
- Jede Transporteinheit beansprucht die gleiche Kapazität auf einer Tour.
- Abgerufene Transporteinheiten sind im Lager verfügbar und werden bis zum Tourenstart rechtzeitig an der Materialflussquelle bereitgestellt.
- Es werden nur ladungsträgerhomogene Touren gebildet.
- Be- und Entladestationen sind an der Materialflussquelle in ausreichender Anzahl vorhanden. Es entsteht deshalb kein Engpass bei der Be- oder Entladung an der Materialflussquelle.
- Die Abfahrt verschiedener Touren wird nicht aufeinander abgestimmt. Es stehen aber ausreichend Be- und Entladestationen an der Quelle zur Verfügung (siehe oben).

Für die Implementierung der Steuerungsstrategien in einem Transportleitsystem gilt daher:

Handlungsempfehlung 4

Um die konzipierte Steuerungsstrategien in einem realen Routenzugsystem anwenden zu können, müssen die im Rahmen der Simulation getroffenen Annahmen für die Implementierung in einem Transportleitsystem überprüft werden. Zum einen müssen die oben aufgeführten Punkte entweder im Betrieb sichergestellt oder durch eine Anpassung der Strategien berücksichtigt werden. Zum anderen muss die Rechenzeit durch eine Parallelisierung der Algorithmen optimiert werden, um Entscheidungen rechtzeitig treffen zu können.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die erreichten Ergebnisse zusammen (Abschnitt 9.1) und gibt einen Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen zur dynamischen Routenzugsystemsteuerung (Abschnitt 9.2) sowie auf den Einfluss der zunehmenden Automatisierung der Produktionsversorgung auf Routenzugsysteme im Allgemeinen (Abschnitt 9.3).

9.1 Zusammenfassung

Individuelle Variantenproduktion, der Anspruch an kurze Lieferzeiten, flexible Produktionsstrukturen sowie die Autonomisierung von Transportmitteln führen zu einem Wandel in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung. Gleichzeitig bereiten innovative Automatisierungslösungen und eine zunehmende Digitalisierung von Prozessinformationen sowie deren durchgängige Vernetzung den Weg, um den Anforderungen, die durch den Wandel entstehen, mit intelligenten Systemlösungen zu begegnen (siehe Abschnitt 1.1).

Im Rahmen einer schlanken Produktionsversorgung ermöglichen Routenzugsysteme eine hochfrequente, transparente und effiziente Materialbereitstellung. Zentrale Fragestellungen sind in diesen Systemen, welche Transportaufträge zusammen auf einer Tour bewegt werden und wann diese Tour startet. Um die Steuerungsentscheidungen während des Systembetriebs gering zu halten, werden in den meisten Routenzugsystemen sowie in einem Großteil der routenzugspezifischen Literatur und den VDI-Richtlinien statische Routen mit festen Fahrwegen in der Systemplanung gebildet. Auf diesen Routen verkehren dann zyklische Touren, häufig nach einem festen Takt, der aufgrund durchschnittlicher Plan-Transportbedarfe festgelegt wurde. Sofern deterministische Systeme betrachtet werden, können auch individuelle Touren nach einem Fahrplan über die Suche eines globalen Optimums kalkuliert werden. Der beschriebene Wandel in der Produktionsversorgung führt häufig jedoch zu nicht-deterministischen Routenzugsystemen. Des Weiteren bedingen die flexiblen Anforderungen an die Materialbereitstellung, dass die klassische, relativ statische Steuerung der Routenzugsysteme keinen gleichzeitig robusten und effizienten Systembetrieb ermöglicht. Eine Dynamisierung der Routenzugsystemsteuerung verspricht dagegen eine höhere Reaktionsfähigkeit (siehe Abschnitt 1.2).

Aus dieser Problemstellung wurde folgende Forschungsfrage abgeleitet (siehe Abschnitt 1.3).

Wie müssen dynamische Steuerungsstrategien der innerbetrieblichen Materialversorgung durch ein Routenzugsystem konzipiert sein, damit kurzfristig bekannte Transportbedarfe unter der Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands robust und effizient bearbeitet werden?

Um die Komplexität der Fragestellung zu strukturieren, wurden zudem drei Forschungsunterfragen formuliert, die zunächst steuerungsrelevante Merkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen untersuchen und anschließend die Effektivität und Effizienz von Steuerungsstrategien in Abhängigkeit deren Dynamisierungsgrad für eine robuste Produktionsversorgung betrachten. Des Weiteren wurde ein Fokus der Arbeit darauf gelegt, die Auswirkungen der Systemausprägungen auf die jeweiligen Steuerungsstrategien zu analysieren.

Auf Basis der Forschungsfragen wurden anschließend in Kapitel 2 die grundlegenden Begriffe der Routenzugsysteme sowie der Betrachtungsbereich dieser Arbeit erläutert. Zudem wurden in der Literatur bestehende Beschreibungsmodelle zu Routenzugsystemen recherchiert und der grundsätzliche Anwendungsbereich dieses Transportprinzips zur Produktionsversorgung vorgestellt. Um die Forschungslücke zwischen den Forschungsfragen und dem Stand der Wissenschaft zu detaillieren, wurden in Kapitel 3 die Entscheidungsprobleme zur Steuerung von Routenzugsystemen sowie die darin enthaltenen Dimensionen der Dynamik analysiert. Dazu wurde der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit einerseits zur bestehenden routenzugspezifischen Literatur abgegrenzt. Andererseits wurden bestehende Strategien und Algorithmen als Basis für die weiteren Untersuchungen aufgeführt.

Da jedes Routenzugsystem in Kombination der Merkmalsausprägungen und Einsatzszenarien individuell ist, wurde darauffolgend in Kapitel 4 die erste Forschungsunterfrage beantwortet:

Welche steuerungsrelevanten Merkmale und Merkmalsausprägungen sind für Routenzugsysteme repräsentativ?

Dazu wurden auf der Grundlage einer umfassenden Befragung von 241 Planern und Betreibern von Routenzugsystemen (vgl. [Lie-2017a]) repräsentative steuerungsrelevante Merkmale und Merkmalsausprägungen von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung identifiziert. Zur späteren Evaluation der Steuerungsstrategien wurden diese Ausprägungen zudem zu Routenzugreferenzsystemen kombiniert.

Als Basis für die Konzipierung der dynamischen Steuerungsstrategien wurde dann die Formalisierung der Routenzugsysteme erläutert (siehe Kapitel 5). Dazu erfolgte zum einen die Modellierung der Transportnetzwerke als gerichtete Graphen mit Knoten und Kanten. Zum anderen wurde die Entstehung der Transportaufträge, als initiales Element der Produktionsversorgung, sowie die Verteilung und Schwankung der Transportbedarfe in Abhängigkeit von Systemparametern vorgestellt. Des Weiteren wurden die formale Beschreibung der Transportressourcen sowie der Zykluszeiten in Abhängigkeit der technischen Konzepte, der Handhabungsprozesse sowie Randbedingungen der Routenzugsysteme erläutert.

Die Entwicklung der dynamischen Steuerungsstrategien erfolgte in Kapitel 6. Dazu wurden zunächst ein modulares, generisches Konzept der Routenzugsystemsteuerung sowie die Einbettung der Module in den Systemzusammenhang konzipiert. Anschließend wurden für jedes Modul der Systemzusammenhang sowie dessen Ausprägungen mit jeweils unterschiedlichem Dynamisierungsgrad beschrieben und algorithmisch ausgestaltet sowie parametrisiert. Unter der Beachtung von Restriktionen bei der Kombination von Modulausprägungen wurden schließlich 18 Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme identifiziert, die jeweils einen unterschiedlichen Dynamisierungsgrad aufweisen. Die Steuerungsstrategie S01, bei der Touren in einem festen Takt gebildet werden und auf statischen Routen mit festen Fahrwegen verkehren, wurde als Referenzstrategie zur Beurteilung der Effektivität und Effizienz der dynamischeren Steuerungsvarianten ausgewählt. Die Strategie S01 repräsentiert zugleich die in der Praxis am häufigsten verwendete relativ statische Routenzugsystemsteuerung.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden die 18 entwickelten Steuerungsstrategien anschließend im Hinblick auf die Routenzugreferenzsysteme evaluiert. Dazu wurden zunächst der WIP in der Produktionsversorgung und die Anzahl an erforderlichen Routenzügen zum Sicherstellen einer robusten Materialbereitstellung als Hauptzielgrößen vorgestellt. Darauffolgend wurden die ereignisdiskrete Simulation als Untersuchungsmethodik ausgewählt und die Faktoren sowie Faktorstufen des vollständigen Versuchsplans und die Durchführung der Experimente beschrieben (siehe Abschnitte 7.1 und 7.2). Um einerseits das Vorgehen zur Auswertung der Experimente zu erläutern und andererseits die Formalisierung der Routenzugreferenzsysteme abzusichern, erfolgte anschließend eine Verifikation der Modellierung der Routenzugsysteme (siehe Abschnitt 7.3). Durch eine vergleichende Bewertung der Steuerungsstrategien wurden die Effektivität und Effizienz der robusten Produktionsversorgung durch Anwendung der Steuerungsstrategien schließlich beurteilt (siehe Abschnitt 7.4). Dadurch konnte die zweite Forschungsunterfrage beantwortet werden:

Inwiefern beeinflusst der Dynamisierungsgrad einer Steuerungsstrategie die Effektivität und Effizienz der Produktionsversorgung?

Dynamischere Modulausprägungen der Steuerungsstrategien führen im Mittel immer zu einer Steigerung der Effektivität und Effizienz im Vergleich zu statischeren Ausprägungen. Mit Ausnahme des Moduls *Abfahrtszeit* ist die Verbesserung statistisch signifikant. Eine höhere Effektivität einer Steuerungsstrategie bedeutet, dass diese für mehr Szenarien eine robuste Produktionsversorgung ermöglicht. Effizienz wird durch den minimalen Einsatz an WIP und Routenzügen beurteilt. Die Effizienz einer Steuerungsstrategie variiert jedoch je nach den Ausprägungen des Routenzugsystems sowie den betrachteten Einsatzszenarien. V. a. bei sehr restriktiven Transportnetzwerken, bei denen wenig Flexibilität in der Fahrwegbildung besteht, kommen die Vorteile der dynamischeren Steuerungsstrategien kaum oder gar nicht zum Tragen. Die relativ statische Referenzstrategie S01 kann dann sogar die effizienteste Produktionsversorgung ermöglichen. Für den Großteil der untersuchten Szenarien erzielen die dynamischeren Steuerungsstrategien jedoch häufiger eine stabile Lösung und im Vergleich zu den stabilen Lösungen der Referenzstrategie auch eine effizientere robuste Produktionsversorgung. Besonders bei sehr flexiblen Transportnetzwerken können bis zu zehn Routenzüge (59 %) durch die Steuerungsstrategien S08 und S12 bzw. bis zu neun Routenzüge (53 %) durch die Strategien S17 und S18 eingespart werden. Diese vier Steuerungsstrategien erzielen im Gesamtvergleich zudem die besten Ergebnisse. Bei den Strategien S08 und S12 werden die Transportaufträge innerhalb von Clustern nach dem FIFO-Prinzip zu Touren gebündelt. Die Bearbeitungsreihenfolge innerhalb der Tour sowie der Fahrweg werden durch eine Optimierung der Tourenkosten bestimmt, und die Transportressourcen werden clusterübergreifend den Touren zugeteilt. Zudem erfolgt der Tourenstart entweder permanent (S08) oder nach einer auslastungsorientierten Startlogik mit Zeitgrenze (S12). Die Steuerungsstrategien S17 und S18 weisen dagegen keine statischen Cluster auf. Die Bildung der Touren erfolgt dann nach einer integrierten Optimierung der Auftragsdisposition, Bearbeitungsreihenfolge und des flexiblen Fahrwegs. Die Abfahrtszeit der Touren erfolgt wiederum permanent (S17) oder auslastungsorientiert mit Zeitgrenze (S18).

Im Anschluss wurde in Abschnitt 7.5 die dritte Forschungsunterfrage beantwortet, indem die Haupteffekte der Systemausprägungen auf die Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategien bewertet wurde:

Inwiefern beeinflussen die steuerungsrelevanten Merkmalsausprägungen eines Routenzugsystems die Effektivität und Effizienz der konzipierten dynamischen Steuerungsstrategien?

Im Gegensatz zur Strategie S01 ermöglichen flexible und dynamische Touren einer Steuerungsstrategie eine effektivere und effizientere Produktionsversorgung, wenn auch das Layout des Transportnetzwerks flexibler ist. Eine deutliche Abweichung in der Effektivität der Steuerungsstrategie ergibt sich für eine unterschiedliche Anzahl an Klienten. Verteilt sich die vorgegebene Systemlast auf mehr Klienten und Haltestellen, ist die gegenseitige Behinderung der Routenzüge beim Bereitstellen von Transporteinheiten im Produktionsbereich unwahrscheinlicher als bei einer geringeren Anzahl an Klienten, aber einer im Routenzugsystem gleich hohen Nachschubfrequenz. Die Effizienz wird durch dieses Merkmal kaum beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen der Systemlast und der Effektivität sowie Effizienz ist klar ersichtlich. Je höher die Nachfrage der Klienten nach Material ist, desto mehr Routenzüge werden im Mittel für eine robuste Produktionsversorgung benötigt, und desto seltener sind stabile Lösungen. Ein ähnlicher, jedoch nicht so deutlicher Effekt, besteht in Abhängigkeit der Schwankungen der Zwischenabrufzeiten der Klienten. Je höher die Schwankungen sind, desto ineffektiver ist der Nachschub. Die Effizienz des Routenzugsystems nimmt bei höheren Schwankungen kaum merklich ab. Aufgrund der höheren Tourenkapazität werden in KLT-Systemen weniger Routenzüge zum Bedienen der gleichen Systemlast als in GLT-Systemen benötigt. In statisch gesteuerten Systemen können jedoch gerade bei KLT-Systemen extreme Zykluszeiten auftreten, wodurch die Effektivität sinkt. Dynamische Steuerungsstrategien erreichen bei KLT-Systemen zudem eine höhere Effektivität als bei GLT-Systemen, da aufgrund der höheren Tourenfrequenz die extremen Zykluszeiten vermieden werden. Dieser Effekt überträgt sich auch auf die Kombination aus Prozess und Anhängertechnik in Abhängigkeit der Ladungsträgerart. Der reine Einfluss der Prozesse und Anhängertechniken auf die Effizienz wird durch leicht schwankende Werte sichtbar. Kombinationen mit einer längeren Zykluszeit führen zu einem höheren mittleren Bedarf an Routenzügen, um eine robuste Produktionsversorgung sicherzustellen.

Im Anschluss an die Evaluation erfolgte in Kapitel 8 eine kritische Diskussion der dynamischen Steuerungsstrategien. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Auswahl einer Steuerungsstrategie für ein Einsatzszenario immer in Abhängigkeit des konkreten Routenzugsystems und Einsatzszenarios erfolgen muss. In den meisten Einsatzszenarien erzielen die dynamischen Steuerungsstrategien aber eine effizientere oder genauso effiziente Produktionsversorgung wie die relativ statische Referenzstrategie S01.

In einem Abgleich der Erwartungen an die dynamische Routenzugsystemsteuerung mit den Ergebnissen der Evaluation zeigt sich, dass besonders die Versorgungssicherheit, besser als erwartet, durch eine dynamischere Steuerungsstrategie immer mindestens genauso gut wie die Referenzstrategie S01 ist. Hinsichtlich der Effizienz

werden zwar häufig Verbesserungen im Vergleich zur Referenzstrategie erzielt, jedoch werden die Erwartungen in Bezug auf die Kapazitätsauslastung und Staureduzierung in Summe nicht erreicht. Allerdings decken sich die Ergebnisse hinsichtlich der Bestandsentwicklung im Produktionsbereich annähernd mit den Erwartungen. In Bezug auf die Effizienz erreichen dynamische Steuerungsstrategien oft insbesondere eine Einsparung von Transportressourcen gegenüber statischeren Strategien (siehe Abschnitt 8.1).

Anschließend wurde in Abschnitt 8.2 eine Erweiterung des Anwendungsbereichs von Routenzugsystemen unter der Anwendung von dynamischen Steuerungsstrategien diskutiert. Der Trend hinsichtlich der Eignung ändert sich kaum, d. h., wenn bei der Betrachtung einer bestimmten Merkmalsausprägung ein Routenzugsystem laut der Literatur bisher eher geeignet war als bei einer anderen Ausprägung, gilt dies überwiegend nach wie vor. Allerdings ermöglichen die dynamischen Steuerungsstrategien generell eine Erhöhung der Effektivität, d. h. Routenzugsysteme können durch die dynamischen Steuerungsstrategien in insgesamt mehr Einsatzszenarien zu einer robusten und effizienten Produktionsversorgung führen.

Zum Abschluss der kritischen Diskussion der dynamischen Routenzugsystemsteuerung wurden die Implementierungsvoraussetzungen betrachtet und Handlungsempfehlungen für den Einsatz der Strategien gegeben (siehe Abschnitt 8.3).

Nachdem die Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Arbeit in diesem Abschnitt zusammengefasst wurden, folgt in den nächsten beiden Abschnitten zunächst ein Ausblick zu weiterem Forschungsbedarf hinsichtlich der dynamischen Routenzugsystemsteuerung (siehe Abschnitt 9.2) und letztlich eine Abwägung des Einflusses der zunehmenden Automatisierung in der Produktionsversorgung auf den generellen Einsatz von Routenzügen, besonders im Vergleich zu automatisierten Direkttransporten (siehe Abschnitt 9.3).

9.2 Ausblick zur dynamischen Routenzugsystemsteuerung

Wie bereits in den Handlungsempfehlungen in Abschnitt 8.3 erwähnt, sind für die dynamischen Steuerungsstrategien in Routenzugsystemen weitere Fragen zu beantworten.

Diese betreffen zum einen die technische Umsetzung der Steuerungsstrategien im physischen Routenzugsystem. Zuallererst werden Konzepte benötigt, die die optimale elektronische Erfassung der Transportaufträge beschreiben. In der Praxis existieren

dazu bereits einzelne Lösungen (vgl. [Got-2019]), wie der automatische Abruf auf Basis von mechanischen Wippen oder RFID sowie manuell zu betätigende Call-Buttons. Ganzheitliche Untersuchungen, v. a. außerhalb von Lernfabriken, in Verbindung mit der dynamischen Produktionsversorgung durch Routenzugsysteme sind nicht bekannt. Des Weiteren werden technische Konzepte zur Integration der Steuerungsstrategien in ein Transportleitsystem benötigt. Je nach Dynamisierungsgrad der Produktionsversorgung sind zudem geeignete Verfahren zur Lokalisierung der Routenzüge auszuwählen (vgl. [Hor-2019]). Durch die dynamischen Strategien sind die Abläufe im Routenzugsystem flexibler und für die Mitarbeiter zunächst weniger intuitiv abschätzbar. Damit eine hohe Transparenz in der Produktionsversorgung erreicht wird, müssen die durch die Steuerung getroffenen Entscheidungen zudem den Mitarbeitern in geeigneter Weise kommuniziert werden (vgl. [Tak-2018]). V. a. der Routenzugfahrer muss rechtzeitig informiert werden, welche Touren zu bilden sind und wann diese starten sollen. Um die Transparenz für die Produktionsmitarbeiter zu erhöhen, können außerdem an den Bereitstellorten Ankunftsinformationen zu den offenen Transportaufträgen mitgeteilt werden. Durch die digitale Vernetzung der Informationen und ein geeignetes Kommunikationskonzept kann die Systemtransparenz zu statisch gesteuerten Systemen letztlich sogar erhöht werden (vgl. [Zim-2015]).

Zum anderen sind die bei der Entwicklung der Steuerungsstrategien getroffenen Annahmen bei der Implementierung zu überprüfen. Je nach individuellem Routenzugsystem können Annahmen ihre Gültigkeit verlieren, wodurch die Ausgestaltung der Steuerungsmodule angepasst werden muss. Das modulare Konzept ist jedoch generisch übertragbar. Des Weiteren müssen die vorgestellten Algorithmen durch eine Parallelisierung der Optimierung zum Finden von nahezu echtzeitfähigen Entscheidungen verbessert werden. Ebenso kann die Selbstkalibrierung des MACS detailliert evaluiert und optimiert werden. Im Zuge dessen können auch weitere Verfahren zur Lösung des VRPTW (siehe Abschnitt 3.2.2) getestet werden.

Neben der Implementierung und Optimierung der entwickelten Steuerungsstrategien kann zudem der Anwendungsbereich der dynamischen Steuerung bei der Produktionsversorgung erweitert werden. In dieser Arbeit wurde die Produktionsversorgung durch ein Routenzugsystem aus einer zentralen Quelle mit einer homogenen Fahrzeugflotte betrachtet. Forschungsbedarf besteht in der Weiterentwicklung der dynamischen Strategien zur Steuerung von heterogenen Fahrzeugflotten, die einerseits unterschiedliche Ladungsträgerarten gemeinsam transportieren, aber andererseits auch flexible Transportkapazitäten je Tour haben. Außerdem kann die Integration mehrerer Materialflussquellen in eine Tour betrachtet werden. Dadurch liegt im Extremfall das *Pick-up and Delivery*-Problem zugrunde. Dabei dient jede Senke im Transportnetzwerk auch gleichzeitig als Materialflussquelle. Die Steuerung muss dann auch wieder

für jeden Transportauftrag eine geeignete Tour finden. Der Unterschied zu den in dieser Arbeit entwickelten Konzepten besteht jedoch darin, dass eine Tour im Prinzip kein Anfang und kein Ende hat. Die Zusammensetzung einer Tour ändert sich daher wesentlich öfter, und die Anforderung an Echtzeitinformationen zur Position der Transportressourcen im System steigt. Für diese Problemstellung müssen einerseits geeignete Zeitpunkte untersucht werden, wann eine bestehende Tour im Routenzugsystem um einen Transportauftrag erweitert werden darf. Andererseits sind besonders rechenzeiteffiziente Algorithmen zu entwickeln, die die Transportaufträge einer Tour so zuweisen, dass insgesamt eine robuste Produktionsversorgung und -entsorgung mit geringem Ressourcenbedarf entsteht. Für das *Pick-up and Delivery*-Problem mit Zeitfenstern können ebenso unterschiedliche Heuristiken verwendet werden. *Kalayci und Kaya* verwenden für dieses Problem, allerdings nicht zur Produktionsversorgung, auch Ameisenkolonien und stellen zudem weitere Lösungsverfahren vor [Kal-2016].

9.3 Ausblick zur Automatisierung in der Produktionsversorgung

Die steigende Digitalisierung von Prozessinformationen sowie Fortschritte in den Bereichen Robotik und Sensorik ermöglichen eine zunehmende Automatisierung sowie Autonomisierung der Transportmittel in der Produktionsversorgung (vgl. [Sch-2019]). Die Flexibilitätsvorteile, die der Mensch bei der Materialhandhabung gegenüber bestehenden Systemen hat, werden dadurch geringer (vgl. [Urr-2018a]). Die Systemleistung kann dann durch die Automatisierung gesteigert werden (vgl. [Hru-2019]).

Die zunehmende Vernetzung von Informationen im Rahmen der Digitalisierung begünstigt zunächst die dynamischen Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme, da Informationen, z. B. zu den Transportaufträgen und zum aktuellen Status der Fahrzeuge, elektronisch erfasst und ohne Zeitverzug in Echtzeit ausgetauscht werden können. Des Weiteren werden Prozesszeiten durch die Automatisierung besser prognostizierbar.

Bei der manuellen Produktionsversorgung ergibt sich die ökonomische Effizienz der Routenzugsysteme unabhängig von der Steuerungsstrategie v. a. dadurch, dass Transporteinheiten im Vergleich zum Direkttransport gebündelt bewegt werden. Durch die Einsparung von Fahrwegen ist der kostentreibende Mitarbeiter beim gebündelten Transport insgesamt kürzer an den Prozess gebunden als beim Direkttransport, der z. B. per Stapler stattfindet. Dadurch sinken die Betriebskosten der Produktionsversorgung.

Werden die Transportmittel und Prozesse automatisiert, sinkt der Anteil der Betriebskosten an den Gesamtkosten des Systems. Die Investitionskosten werden dagegen höher gewichtet (vgl. [Mar-2014a]). Bei der Automatisierung der Direkttransporte durch FTF korrelieren die Anzahl an notwendigen FTF und damit die Investitionskosten direkt mit der Anzahl der zuvor benötigten manuellen Transportressourcen. Aufgrund langsameerer Zykluszeiten werden evtl. etwas mehr FTF als manuelle Fahrzeuge benötigt. Wird die Produktionsversorgung durch ein Routenzugsystem automatisiert, müssen hingegen entweder die Infrastruktur an der Quelle und den Senken des Systems für eine automatische Be- und Entladung gerüstet werden, wodurch ein relativ unflexibles System entsteht, oder jeder Anhänger des Routenzugs wird mit Automatisierungstechnik ausgestattet. In diesem Fall hängen die Investitionskosten maßgeblich von der Anzahl der Anhänger im System ab.

Um die beiden Transportprinzipien Direkttransport und gebündelter Transport bei der automatisierten Produktionsversorgung miteinander zu vergleichen, wird abstrahiert angenommen, dass die Investitionskosten für ein System mit n FTF denen eines Systems mit einem Routenzug mit n Anhängern entspricht. Bei ähnlichen Investitions- und Betriebskosten wie bei einem automatischen Routenzug ermöglicht die FTF-Produktionsversorgung daher n parallele Direkttransporte. Die Gesamtzykluszeit, um die gleiche Anzahl an Aufträgen mit ähnlichen Kosten zu bearbeiten, ist bei FTF im Vergleich zu automatischen Routenzugsystemen dann niedriger. Die Vorteile der automatischen Produktionsversorgung per Routenzug beschränken sich im Wesentlichen auf einen geordneten Materialfluss, wodurch im Transportnetzwerk ein besserer Verkehrsfluss entstehen kann. Sofern die Investitionskosten eines automatisierten Routenzugs mit n Anhängern nicht deutlich unter den Kosten von n FTF für den Direkttransport liegen, ist die reine Produktionsversorgung durch automatische Routenzüge ineffizient im Vergleich zum automatischen Direkttransport per FTF.

In der von *Lieb et al.* durchgeführten Studie geben daher über 30 % der Teilnehmer an, dass eine hohe oder sehr hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass Routenzüge in Zukunft durch kleine Transportmittel, die jeden Transportauftrag einzeln transportieren, abgelöst werden [Lie-2017a, S. 84].

Durch die Verknüpfung beider automatischen Transportprinzipien können Wegstrecken, Zykluszeiten und dadurch Pufferbestände jedoch weiter reduziert werden. In Abbildung 9-1 ist das Prinzip der kollaborativen, automatischen Produktionsversorgung dargestellt (vgl. [Sch-2017]). Die automatischen Routenzüge legen die längeren Wege zwischen der Materialquelle und den Produktionsbereichen zurück. Für die Nahversorgung im Produktionsbereich sind FTF per Direkttransport zuständig. Dazu übernehmen diese die Transporteinheiten von den Routenzügen an Kollaborationsflächen.

Zunächst steigen die Investitionskosten, da sowohl Routenzüge als auch FTF benötigt werden. Sofern die FTF aber in der Lage sind, die Routenzuganhänger zu be- und entladen, können bei der Automatisierung des Routenzugs Kosten gespart werden. Der mögliche Systemdurchsatz kann je nach Einsatzszenario jedoch deutlich erhöht werden.

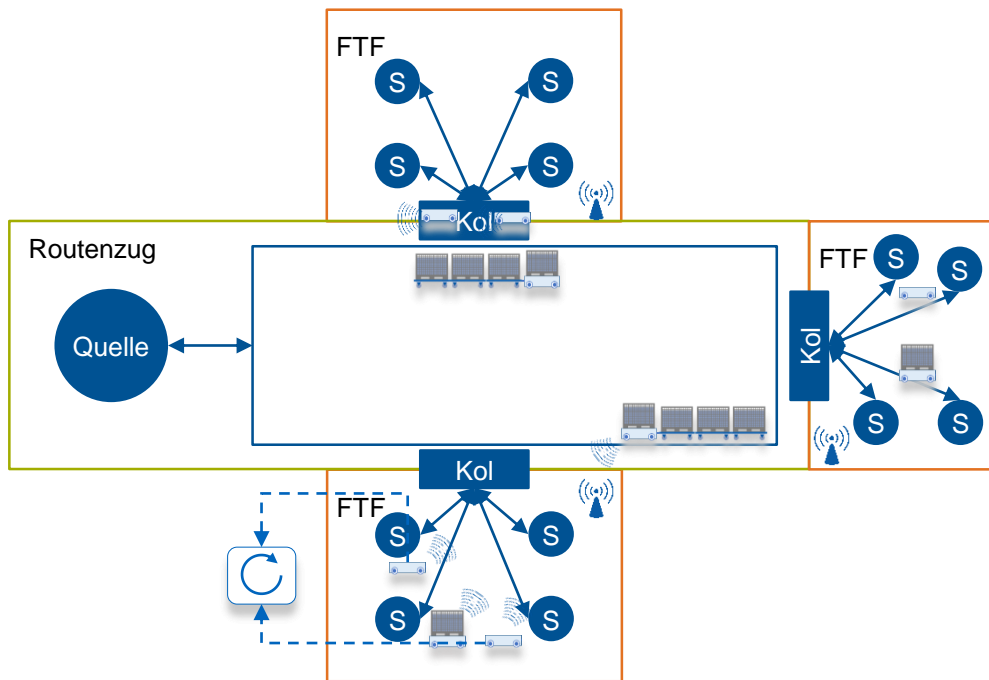
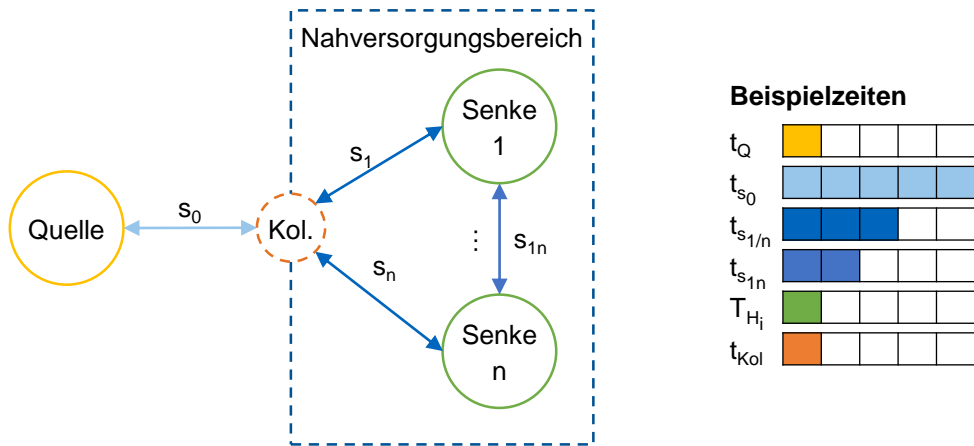


Abbildung 9-1: Prinzipische Skizze der kollaborativen automatischen Produktionsversorgung

Neben der Lage der Kollaborationsflächen, die auch dynamisch im Systembetrieb autonom festgelegt werden können, beeinflussen v. a. die Handhabungszeiten t_Q an der Quelle und $t_{H,i}$ an den Senken i sowie die Fahrzeiten $t_{s,j}$ für die Strecken j und die Kollaborationszeit t_{Kol} zwischen Routenzug und FTF die Effizienz der Produktionsversorgung.

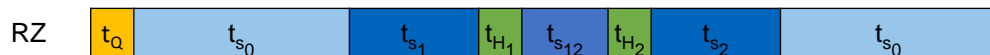
Der Effekt der kollaborativen, automatischen Produktionsversorgung auf die Zykluszeit ist im Vergleich zu den individuellen, automatischen Transportprinzipien in Abbildung 9-2 an einem Beispiel verdeutlicht, in dem zwei Transporteinheiten an zwei Senken bereitgestellt werden. Die Aufnahme der Transporteinheiten findet an einer zentralen Quelle statt. Es wird ersichtlich, dass zunächst durch den Einsatz von zwei FTF (B) die gesamte Versorgungszeit für einen Zyklus gegenüber einem Routenzug (A) reduziert werden kann. Des Weiteren ermöglicht die kollaborative Produktionsversorgung (C) gegenüber beiden individuellen Szenarien eine deutliche Verkürzung des Versorgungsintervalls. Die Kollaboration lohnt sich besonders dann, wenn weite Wege zwischen der Quelle und den Versorgungsbereichen zurückgelegt werden müssen. Zudem ist die Nahversorgung in engen Produktionsbereichen durch einen Routenzug

häufig schwierig. Steuerungsstrategien für die kollaborative, automatische Produktionsversorgung können auf den dynamischen Strategien dieser Arbeit aufbauen.

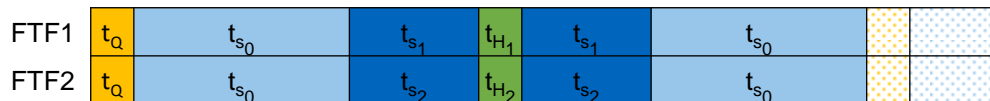


Beispielszenario: Belieferung von zwei Senken aus einer Quelle

A 1 Routenzug mit Kapazität 2, konsekutive Versorgung von 2 Senken



B 2 FTF, jedes für einen Direkttransport zu einer Senke



C 1 Routenzug mit Kapazität 2, Übergabe an 2 FTF (Kollaboration) in der Nähe der Senken

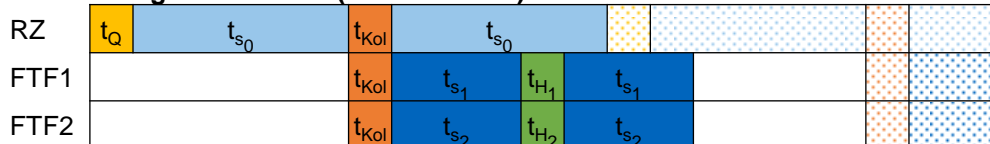


Abbildung 9-2: Zykluszeitvergleich für unterschiedliche Konzepte der automatischen Produktionsversorgung

Insgesamt können Routenzugsysteme durch die Anwendung von dynamischen und kollaborativen Steuerungsstrategien die Herausforderungen des Wandels in der Produktionsversorgung bewältigen und eine robuste sowie gleichzeitig effiziente Materialbereitstellung ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [Abe-2009] Abele, E.; Brungs, F.: Optimierung der innerbetrieblichen Materialversorgung mittels Milkrun – Vorgehensweise zur Erstausslegung und kontinuierlichen Verbesserung. In: *Industrie-Management*, Jg. 25 (2009), 5, S. 61–64.
- [Ado-2016] Adolph, S.; Metternich, J.: Materialbereitstellung in der Montage - Eine empirische Analyse zur Identifikation der Anforderungen an zukünftige Planungsvorgehen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 111 (2016), 1-2, S. 15–18.
- [Aln-2013] Alnahhal, M.; Noche, B.: Efficient material flow in mixed model assembly lines. In: *SpringerPlus*, Jg. 2 (2013), 415, S. 1–12.
- [Aln-2014a] Alnahhal, M.; Noche, B.: Capacity planning in in-plant milk run system. In: *International Journal of Service and Computing Oriented Manufacturing*, Jg. 1 (2014), 3, S. 197–210.
- [Aln-2014b] Alnahhal, M.; Ridwan, A.; Noche, B.: In-plant milk run decision problems. In: Benadada, Y. (Hrsg.): *2014 International Conference on Logistics and Operations Management (GOL)*. Rabat, Morocco, 2014, S. 85–92.
- [Aln-2015a] Alnahhal, M.; Noche, B.: A genetic algorithm for supermarket location problem. In: *Assembly Automation*, Jg. 35 (2015), 1, S. 122–127.
- [Aln-2015b] Alnahhal, M.; Noche, B.: Dynamic material flow control in mixed model assembly lines. In: *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 85 (2015), 7, S. 110–119.
- [Aln-2015c] Alnahhal, M.: Efficient material flow in mixed model assembly lines. Dissertation. Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2015.
- [Aln-2016] Alnahhal, M.; Ramadan, M.; Noche, B.: Static versus dynamic control of material flow in in-plant milk run system. In: Kotzab, H.; Pannek, J.; Thoben, K. (Hrsg.): *Dynamics in Logistics*. Springer, Cham, Switzerland, 2016, S. 1–10.

- [Álv-2009] Álvarez, R.; Calvo, R.; Pena, M.; Domingo, R.: Redesigning an assembly line through lean manufacturing tools. In: *Int J Adv Manuf Technol* (2009), 43, S. 949–958.
- [Bae-2011] Baerwolff, C.: Routenzüge – Ein prozessorientierter Ansatz. In: *VDI-Berichte Nr. 2136* (2011), S. 159–168.
- [Bae-2016] Bae, K.; Evans, L.; Summers, A.: Lean design and analysis of a milk-run delivery system. In: Huschka, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*. Arlington, Virginia, 2016, S. 2855–2866.
- [Bal-2009] Balzert, H.: *Lehrbuch der Softwaretechnik – Basiskonzepte und Requirements Engineering*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2009.
- [Bat-2013] Battini, D.; Boysen, N.; Emde, S.: Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. In: *J Manag Control* (2013), 24, S. 209–217.
- [Bat-2015] Battini, D.; Gamberi, M.; Persona, A.; Sgarbossa, F.: Part-feeding with supermarket in assembly systems: transportation mode selection model and multi-scenario analysis. In: *Assembly Automation*, Jg. 35 (2015), 1, S. 149–159.
- [Bel-1958] Bellman, R.: On a routing problem. In: *Quarterly of Applied Mathematics*, Jg. 16 (1958), 1, S. 87–90.
- [Ber-2004] Berger, J.; Barkaoui, M.: A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. In: *Computers & Operations Research*, Jg. 31 (2004), 12, S. 2037–2053.
- [Boc-2019a] Bocewicz, G.; Bożejko, W.; Wójcik, R.; Banaszak, Z.: Milk-run routing and scheduling subject to a trade-off between vehicle fleet size and storage capacity. In: *Management and Production Engineering Review*, Jg. 10 (2019), 3, S. 41–53.
- [Boc-2019b] Bocewicz, G.; Nielsen, I.; Banaszak, Z.: Reference Model of a Milk-Run Delivery Problem. In: Hamrol, A.; Kujawińska, A.; Barraza, M. F. S. (Hrsg.): *Advances In Manufacturing II*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019, S. 150–160.

- [Boc-2020] Bocewicz, G.; Nielsen, I.; Banaszak, Z.: Blockage-Free Route Planning for In-Plant Milk-Run Material Delivery Systems. In: Bożejko, W. (Hrsg.): Modelling and performance analysis of cyclic systems. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2020, S. 105–132.
- [Bor-2015] Bortolini, M.; Ferrari, E.; Gamberi, M.; Manzini, R.; Regattieri, A.: New Kanban model for tow-train feeding system design. In: Assembly Automation, Jg. 35 (2015), 1, S. 128–136.
- [Boy-2015] Boysen, N.; Emde, S.; Hoeck, M.; Kauderer, M.: Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. In: European Journal of Operational Research, Jg. 242 (2015), 1, S. 107–120.
- [Boz-2013] Bozer, Y. A.; Ciemsoczolowski, D. D.: Performance evaluation of small-batch container delivery systems used in lean manufacturing – Part 1: system stability and distribution of container starts. In: International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013), 2, S. 555–567.
- [Brä-2003] Bräysy, O.: A Reactive Variable Neighborhood Search for the Vehicle-Routing Problem with Time Windows. In: INFORMS Journal on Computing, Jg. 15 (2003), 4, S. 347–368.
- [Bra-2016] Braekers, K.; Ramaekers, K.; van Nieuwenhuysse, I.: The vehicle routing problem – State of the art classification and review. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 99 (2016), S. 300–313.
- [Bru-2012] Brungs, F.: Der Milkrun in der Produktionslogistik. Dissertation. PTW: "Innovation Fertigungstechnik", Technische Universität Aachen, Aachen, 2012.
- [Buy-2019] Buyukozkan, K.; Bal, A.; Oksuz, M. K.; Kapukaya, E. N.; Satoglu, S. I.: A Mathematical Model and a Matheuristic for In-Plant Milk-Run Systems Design and Application in White Goods Industry. In: Calisir, F.; Cevikcan, E.; Camgoz Akdag, H. (Hrsg.): Industrial Engineering in the Big Data Era. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019, S. 99–112.

- [Buy-2020] Buyukozkan, K.; Satoglu, S. I.: A Mathematical Model and an Artificial Bee Colony Algorithm for In-Plant Milk-Run Design. In: Calisir, F.; Korhan, O. (Hrsg.): Industrial Engineering in the Digital Disruption Era. Springer Nature, Berlin Heidelberg, 2020, S. 106–118.
- [Cab-2019] Caballero-Barrera, A. F.; Valdivia-Castillo, J. P.; Quiroz-Flores, J. C.; Alvarez-Merino, J. C.: Development and Application of Kanban and Milk-Run in Production Process of a Metalworking Company. In: Song, Y. (Hrsg.): 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Macao, Macao, 2019, S. 1250–1254.
- [Cac-2015] Caceres-Cruz, J.; Arias, P.; Guimarans, D.; Riera, D.; Juan, A. A.: Rich Vehicle Routing Problem. In: ACM Computing Surveys, Jg. 47 (2015), 2, S. 1–28.
- [Cap-2017] Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.; Salini, P.: Modeling errors in parts supply processes for assembly lines feeding. In: Industrial Management & Data Systems, Jg. 117 (2017), 6, S. 1263–1294.
- [Che-2016] Chen, J.: Parameters Evaluation of Ant Colony Algorithm based on TSP. In: Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia, Jg. 39 (2016), 4, S. 121–126.
- [Chi-1996] Chiang, W.-C.; Russell, R. A.: Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. In: Annals of Operations Research, Jg. 63 (1996), 1, S. 3–27.
- [Cho-2002] Choi, W.; Lee, Y.: A dynamic part-feeding system for an automotive assembly line. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 43 (2002), 1-2, S. 123–134.
- [Cie-2013] Ciemnoczowski, D. D.; Bozer, Y. A.: Performance evaluation of small-batch container delivery systems used in lean manufacturing – Part 2: number of Kanban and workstation starvation. In: International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013), 2, S. 568–581.
- [Cla-1964] Clarke, G.; Wright, J. W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. In: Operations Research, Jg. 12 (1964), 4, S. 568–581.

- [Col-1991] Colorni, A.; Dorigo, M.; Maniezzo, V.: Distributed Optimization by Ant Colonies. In: Varela, F. J.; Bourgine Paul (Hrsg.): Proceedings of ECAL91 - European Conference on Artificial Life. Paris, France, 1991, S. 134–142.
- [Coo-1999] Cook, W.; Rich, J. L.: A parallel cutting-plane algorithm for the vehicle routing problem with time windows. Technical report TR99-04. Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Houston, Texas, 1999.
- [Cos-2008] Costa, B.; Dias, L. S.; Oliviera, J. A.; Pereira, G.: Simulation as a tool for planning a material delivery system to manufacturing lines. In: Fernandes, A. S. C. (Hrsg.): 2008 IEEE International Engineering Management Conference. Estoril, Portugal, 2008, S. 1–5.
- [Dan-1954] Dantzig, G.; Fulkerson, R.; Johnson, S.: Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. In: Journal of the Operations Research Society of America, Jg. 2 (1954), 4, S. 393–410.
- [Dan-1959] Dantzig, G. B.; Ramser, J. H.: The Truck Dispatching Problem. In: Management Science, Jg. 6 (1959), 1, S. 80–91.
- [Des-2014] Desaulniers, G.; Madsen, O. B.G.; Ropke, S.: The Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): The vehicle routing problem. SIAM, Philadelphia, Pa., 2014, S. 119–159.
- [Dew-2012] Dewitz, M.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Drive-Thru Loading Concept for In-Plant Milk Runs. In: Rašuo, B. (Hrsg.): Proceedings of the XX International Conference MHCL'12. Belgrade, Serbia, 2012, S. 237–242.
- [Dew-2014] Dewitz, M.; Günthner, W. A.; Arlt, T.: Fahrplanoptimierung für innerbetriebliche Routenverkehre. In: Logistics Journal : Proceedings, Jg. 2014 (2014), 1, S. 1–14.
- [Dew-2015] Dewitz, M.; Günthner, W. A.; Arlt, T.: Der Verbrauch bestimmt den Takt – Erstellung von Fahrplänen für getaktete Routenzüge. In: F+H - Fördern und Heben, Jg. 65 (2015), 1-2, S. 16–19.
- [Dew-2020] Dewitz, M.: Fahrplanoptimierung für getaktete Routenzugsysteme. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.

- [Dia-2012] Dias, L. S.; Vik; Oliviera, J. A.; Pereira, G.: Simulation in the design of an internal logistic system. In: EUROSIS (Hrsg.): ISC 2012, Industrial Simulation Conference. Brno, Czech Republic, 2012, S. 1–9.
- [Die-2020] Diefenbach, H.; Emde, S.; Glock, C. H.: Loading tow trains ergonomically for just-in-time part supply. In: European Journal of Operational Research, Jg. 284 (2020), 1, S. 325–344.
- [Dij-1959] Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik, Jg. 1 (1959), 1, S. 269–271.
- [Dom-2007] Domingo, R.; Alvarez, R.; Pena, M.; Calvo, R.: Materials flow improvement in a lean assembly line – a case study. In: Assembly Automation, Jg. 27 (2007), 2, S. 141–147.
- [Don-2008] Donati, A. V.; Montemanni, R.; Casagrande, N.; Rizzoli, A. E.; Gambardella, L. M.: Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system. In: European Journal of Operational Research, Jg. 185 (2008), 3, S. 1174–1191.
- [Dor-1991] Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A.: Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process. Technical Report 91-016. Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Milano, Italy, 1991.
- [Dor-1996] Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A.: Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), Jg. 26 (1996), 1, S. 29–41.
- [Dor-1997] Dorigo, M.; Gambardella, L. M.: Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Jg. 1 (1997), 1, S. 53–66.
- [Dor-2005] Dorigo, M.; Blum, C.: Ant colony optimization theory – A survey. In: Theoretical Computer Science, Jg. 344 (2005), 2-3, S. 243–278.
- [Dör-2016] Döring, N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Dre-2009] Dreher, S.; Nürnberger, A.; Kulus, D.: Routenoptimierung in der Produktionslogistik. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 104 (2009), 3, S. 131–135.

- [Dro-2011] Droste, M.; Deuse, J.: A planning approach for in-plant milk run processes to optimize material provision in assembly systems. In: EIMaraghy H. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, S. 604–610.
- [Dro-2013a] Droste, M.; Deuse, J.: Mathematische Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Optimierung der produktionsbezogenen Materialversorgung. IGF-Forschungsvorhaben 17159 N. Nr. 1, Professur für Arbeits- und Produktionssysteme, TU Dortmund, Dortmund, 2013.
- [Dro-2013b] Droste, M.: Parameterbasierte Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Shaker, Aachen, 2013.
- [Dud-o. J.a] Dudenredaktion: "Route" auf Duden online. <https://www.duden.de/node/123337/revision/123373>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Dud-o. J.b] Dudenredaktion: "Routing" auf Duden online. <https://www.duden.de/node/123353/revision/123389>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Dud-o. J.c] Dudenreaktion: "Zug" auf Duden online. <https://www.duden.de/node/211501/revision/211537>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Eks-2009] Eksioglu, B.; Vural, A. V.; Reisman, A.: The vehicle routing problem – A taxonomic review. In: Computers & Industrial Engineering, Jg. 57 (2009), 4, S. 1472–1483.
- [Ele-2012] Eley, M.: Simulation in der Logistik – Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Emd-2011] Emde, S.; Boysen, N.: Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. In: European Journal of Operational Research, Jg. 217 (2011), 2, S. 287–299.
- [Emd-2012a] Emde, S.; Flieder, M.; Boysen, N.: Optimally loading two trains for JIT-supply of mixed-modell assembly lines. In: IIE Transactions, Jg. 44 (2012), 2, S. 121–135.
- [Emd-2012b] Emde, S.; Boysen, N.: Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-modell assembly lines. In: International Journal of Production Economics, Jg. 135 (2012), 1, S. 393–402.

- [Emd-2017] Emde, S.; Gendreau, M.: Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines. In: *European Journal of Operational Research*, Jg. 260 (2017), 1, S. 255–267.
- [Emd-2018] Emde, S.; Schneider, M.: Just-In-Time Vehicle Routing for In-House Part Feeding to Assembly Lines. In: *Transportation Science*, Jg. 52 (2018), 3, S. 657–672.
- [Emd-2019] Emde, S.; Polten, L.: Sequencing assembly lines to facilitate synchronized just-in-time part supply. In: *Journal of Scheduling*, Jg. 49 (2019), 15, S. 4483.
- [Eri-2008] Eriksson, K. M.; Hanson, R.: Performance impact of options for routing and delivery initiation in tugger train delivery systems. In: *Swedish Production Academy (Hrsg.): Proceedings of SPS08, Swedish Production Symposium*. Stockholm, Sweden, 2008, S. 1–7.
- [Fac-2013] Faccio, M.; Gamberi, M.; Persona, A.; Regattieri, A.; Sgarbossa, F.: Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using supermarket, kanbans and tow trains – a general framework. In: *Journal of Management Control*, Jg. 24 (2013), 2, S. 187–208.
- [Fat-2014] Fathi, M.; Alvarez, M. J.; Mehraban, F. H.; Rodríguez, V.: A Multiobjective Optimization Algorithm to solve the part feeding problem in mixed-model assembly lines. In: *Mathematical Problems in Engineering*, Jg. 2014 (2014), 1, S. 1–12.
- [Fed-2018] Fedorko, G.; Molnar, V.; Honus, S.; Neradilova, H.; Kampf, R.: The Application of Simulation Model of a Milk Run to Identify the Occurrence of Failures. In: *International Journal of Simulation Modelling*, Jg. 17 (2018), 3, S. 444–457.
- [Fir-2013] Firlbeck, G.; Isensee, R.; Becker, T.: Überraschend deutliche Ergebnisse beim Planen der Montagebandversorgung mit Zügen. In: *VDI-Berichte Nr. 2207* (2013), S. 87–98.
- [Flo-1962] Floyd, R. W.: Algorithm 97: Shortest path. In: *Communications of the ACM*, Jg. 5 (1962), 6, S. 345.

- [fml-2019a] Straub, S.: Entwicklung eines Algorithmus zur dynamischen Steuerung von Routenzugsystemen mit Hilfe von selbstorganisierten Netzen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [fml-2019b] Yuanzheng, T.: Implementierung des Ameisenalgorithmus zur Tourenplanung und Simulation für das Routenzugsystem. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [For-1956] Ford, L. R., JR.: Network flow theory. The RAND Corporation, Technischer Bericht p-925, 1956.
- [Fot-2018] Fottner, J.: Herausforderungen in der Logistikbranche, Interviewt von: Schneider, T., am: 09.10.2018. All about sourcing, 2018.
- [Fre-1987] Fredman, M. L.; Tarjan, R. E.: Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. In: Journal of the ACM, Jg. 34 (1987), 3, S. 596–615.
- [Gal-2015] Galka, S.; Klenk, E.; Günthner, W. A.; Trautzsch, D.; Vogel-Daniel, C.: Exakt im Takt. In: Industrie Management, Jg. 2015 (2015), 2, S. 57–60.
- [Gal-2016] Galka, S.; Klenk, E.; Günthner, W. A.: Teuerung der Steuerung. In: Logistik heute, Jg. 38 (2016), 1-2, S. 64–65.
- [Gam-1999] Gambardella, L.; Taillard, E.; Agazzi, G.: MACS-VRPTW – a multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. In: Corne, D.; Dorigo, M.; Glover, F. (Hrsg.): New ideas in optimization. McGraw-Hill Companies, London, Burr Ridge, Ill., New York, 1999, S. 63–76.
- [Gha-2006] Ghaziri, H.; Osman, I. H.: Self-organizing feature maps for the vehicle routing problem with backhauls. In: Journal of Scheduling, Jg. 9 (2006), 2, S. 97–114.
- [Gol-2012] Golz, H.; Gujjula, R.; Günther, H.-O.; Rinderer, S.; Ziegler, M.: Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. In: Flexible Services and Manufacturing Journal, Jg. 24 (2012), 2, S. 119–141.

- [Gol-2013] Golz, J.: Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage. Dissertation. D 83, Technische Universität Berlin, Berlin, 2013.
- [Gon-2012] Gong, Y.-J.; Zhang, J.; Liu, O.; Huang, R.-Z.; Chung, H. S.-H.; Shi, Y.-H.: Optimizing the Vehicle Routing Problem With Time Windows – A Discrete Particle Swarm Optimization Approach. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Jg. 42 (2012), 2, S. 254–267.
- [Got-2019] Gotthardt, S.; Hulla, M.; Eder, M.; Karre, H.; Ramsauer, C.: Digitalized milk-run system for a learning factory assembly line. In: Procedia Manufacturing, Jg. 31 (2019), S. 175–179.
- [Gui-2012] Guizzi, G.; Revetria, R.; Chiocca, D.; Romano, E.: A dynamic milk run in weee reverse logistics. In: Yenduri, S. (Hrsg.): 6th WSEAS European Computing Conference (ECC '12). Prague, Czech Republic, 2012, S. 478–484.
- [Gün-2006a] Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Rudolf, H.: Planung von Produktionsprozessen und Materialflusssteuerung. In: Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, S. 151–161.
- [Gün-2006b] Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Aull, F.; Rudolf, H.: Produktion individualisierter Produkte. In: Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, S. 63–87.
- [Gün-2012] Günthner, W. A.; Klenk, E.; Galka, S.: Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport – Ergebnisse einer Studie. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2012.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E.; Boppert, J.: Schlanke Logistikprozesse – Handbuch für den Planer. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.

- [Gün-2016] Günthner, W. A.; Keuntje, C.: IntegRoute - Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugssysteme zur Produktionsversorgung – Integrierte Bewertung von Prozess und Technik. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2016.
- [Gut-2017] Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Gyu-2013a] Gyulai, D.; Pfeiffer, A.; Sobottka, T.; Vánza, J.: Milkrun Vehicle Routing Approach for Shop-floor Logistics. In: Procedia CIRP, Jg. 7 (2013), S. 127–132.
- [Gyu-2013b] Gyulai, D.; Monostori, L.: Vehicle routing approach for lean shop-floor logistics. In: Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Jg. 41 (2013), S. 1–6.
- [Hag-2009] Haghghi, M. S.; Hadi Zahedi, M.; Mojtaba Rouhani, S.: A multi level priority clustering NN based approach for solving heterogeneous vehicle routing problem. In: Er, M.-H. (Hrsg.): 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Singapore, 2009, S. 224–229.
- [Han-2014] Hanson, R.; Finnsgard, C.: Impact of unit load size on in-plant materials supply efficiency. In: International Journal of Production Economics, Jg. 147, Part A (2014), 1, S. 46–52.
- [Har-1968] Hart, P.; Nilsson, N.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Jg. 4 (1968), 2, S. 100–107.
- [Hei-2019] Heinemann, S.: Digitalisierung in der Industrie 4.0 - Chancen und Risiken. <https://www.haufe-akademie.de/blog/themen/digital-business/digitalisierung-in-der-industrie-4-0-chancen-und-risiken/>, Aufruf am 06.04.2020.
- [Her-2013] Herzog, M.; Riedl, W. F.; Stotz, R.: Der Bellman-Ford - Algorithmus. <https://www-m9.ma.tum.de/graph-algorithms/spp-bellman-ford>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Her-2014a] Herzog, M.; Riedl, W. F.; Velden, L.: Der A* - Algorithmus. <https://www-m9.ma.tum.de/graph-algorithms/spp-a-star>, Aufruf am 21.07.2020.

- [Her-2014b] Herzog, M.; Riedl, W. F.; Velden, L.: Der Dijkstra - Algorithmus. <https://www-m9.ma.tum.de/graph-algorithms/spp-dijkstra>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Her-2015] Herzog, M.; Riedl, W. F.; Voroncovs, A.: Der Floyd-Warshall Algorithmus. <https://www-m9.ma.tum.de/graph-algorithms/spp-floyd-warshall>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Hor-2017] Hormes, F.; Lieb, C.; Fottner, J.; Günthner, W. A.: Steuerung von Routenzugsystemen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 112 (2017), 11, S. 778–782.
- [Hor-2019] Hormes, F.; Behling, M.; Fottner, J.; Intra, C.: Development of a Context-Sensitive Navigation System for In-plant Milk-runs Based on Real-time Localization. In: Bont, C. de (Hrsg.): 2019 6th International Conference on Frontiers of Industrial Engineering (ICFIE). London, United Kingdom, S. 16–22.
- [Hru-2019] Hrušecká, D.; Lopes, R.; Juříčková, E.: Challenges in the introduction of AGVS in production lines – Case studies in the automotive industry. In: Serbian Journal of Management, Jg. 14 (2019), 1, S. 233–247.
- [Inf-2013] Inform: Intelligente Transportleitsysteme sind mehrheitlich gefragt. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 2013 (2013), 11-12, S. 49.
- [Irn-2014] Irnich, S.; Toth, P.; Vigo, D.: Chapter 1: The Family of Vehicle Routing Problems. In: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): The vehicle routing problem. SIAM, Philadelphia, Pa., 2014, S. 1–33.
- [Kal-2016] Kalayci, C. B.; Kaya, C.: An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. In: Expert Systems with Applications, Jg. 66 (2016), S. 163–175.
- [Kan-2020] Kanz, A.: Robuste Milkrun-Prozesse – Simulation als Planungswerkzeug für den optimalen Nachschubprozess mit Routenzügen. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 2020 (2020), 01-02, S. 48–49.
- [Keu-2016] Keuntje, C.; Thomaser, P.; Günthner, W. A.: Calculation of the Cycle Time of Tugger Trains. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 111 (2016), 10, S. 618–621.

- [Keu-2017] Keuntje, C.; Kelterborn, M.; Günthner, W. A.: Considering Ergonomics in the Planning of Tugger Train Systems for Production Supply. In: MATEC Web of Conferences, Jg. 95 (2017), 3, S. 1–4.
- [Keu-2019] Keuntje, C.: Integrierte Detailgestaltung von Technik und Prozess innerbetrieblicher Routenzugsysteme für den Transport von Großladungsträgern. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [Kil-2012] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.; Baskak, M.: Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. In: Int J Adv Manuf Technol, Jg. 62 (2012), S. 1135–1146.
- [Kil-2013] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.: A Mathematical Model and a Heuristic Approach for Periodic Material Delivery in Lean Production Environment. In: Int J Adv Manuf Technol, Jg. 69 (2013), S. 977–992.
- [Kil-2015] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.: Advances in assembly line parts feeding policies – a literature review. In: Assembly Automation, Jg. 35 (2015), 1, S. 57–68.
- [Kle-2012] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Dimensioning of taktet in-plant milk-run systems for material delivery. In: Ivanov, D.; Sokolov, B.; Käschel, J. (Hrsg.): Flexibility and adaptability of global supply chains - Proceedings of the 7th German-Russian Logistics Workshop (DR-LOG 2012). Sankt Petersburg, Russia, 2012, S. 374–380.
- [Kle-2014] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Analysis Of Parameters Influencing In-Plant Milk Run Design For Production Supply. In: Montreuil, B., et al. (Hrsg.): 12th International Material Handling Research Colloquium. Charlotte, NC, 2014, S. 251–267.
- [Kle-2015a] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Operating Strategies for In-Plant Milk-Run Systems. In: IFAC - International Federation of Automatic Control (Hrsg.): 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015. Ottawa, Canada, 2015, S. 1962–1967.
- [Kle-2015b] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Potenziale einer flexiblen Routenzugsteuerung - Strategien zum besseren Umgang mit schwankenden Transportbedarfen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 110 (2015), 12, S. 805–809.

- [Kle-2017] Klenk, E.: Ein analytisches Modell zur Bewertung der Leistung von Routenzugsystemen bei schwankenden Transportbedarfen. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2017.
- [Kle-2019] Klenk, E.; Galka, S.: Analysis of real-time tour building and scheduling strategies for in-plant milk-run systems with volatile transportation demand. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 52 (2019), 13, S. 2110–2115.
- [Kli-2013] Klibi, W.; Martel, A.: The design of robust value-creating supply chain networks. In: OR Spectrum, Jg. 35 (2013), 4, S. 867–903.
- [Klu-2013] Klug, F.: The internal bullwhip effect in car manufacturing. In: International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013), 1, S. 303–322.
- [Klu-2018] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie – Grundlagen der Logistik Im Automobilbau. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Klu-2019a] Kluska, K.; Zwolankiewicz, A.: Hybrid Approach for Simulation Modeling of the Milk-Run Systems with Ergonomic Analysis. In: La Prieta, F. de, et al. (Hrsg.): Highlights of Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019, S. 27–38.
- [Klu-2019b] Kluska, K.; Hoffa-Dąbrowska, P.: Implementation of Calculation for Simulation of Milk-run Intralogistics System. In: Pawlewski, P., et al. (Hrsg.): FlexSim in Academe: Teaching and Research. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2019, S. 115–129.
- [Kon-1995] Kontoravdis, G.; Bard, J. F.: A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: ORSA Journal on Computing, Jg. 7 (1995), 1, S. 10–23.
- [Kor-2016] Korytkowski, P.; Karkoszka, R.: Simulation-based efficiency analysis of an in-plant milk-run operator under disturbances. In: Int J Adv Manuf Technol, Jg. 82 (2016), S. 827–837.

- [Kra-2014] Krause, A.; Müller, E.; Strauch, J.: Methodischer Ansatz zur ganzheitlichen Planung von Routenzugsystemen im Rahmen des Produktentstehungsprozesses im Automobilbau. In: Schenk, M., et al. (Hrsg.): 19. Magdeburger Logistiktage »Sichere und nachhaltige Logistik«. Magdeburg, 2014, S. 99–104.
- [Kra-2015] Krause, A.; Müller, E.; Strauch, J.: Routenzüge in der variantenreichen Großserienfertigung. In: Schenk, M., et al. (Hrsg.): 20. Magdeburger Logistiktage »Sichere und nachhaltige Logistik«. Magdeburg, 2015, S. 97–103.
- [Lap-2014] Lappe, D.; Veigt, M.; Franke, M.; Kolberg, D.; Schlick, J.; Stephan, P.; Guth, P.; Zimmerling, R.: Vernetzte Steuerung einer schlanken Intralogistik. In: wt Werkstattstechnik online, Jg. 104 (2014), 3, S. 112–117.
- [Las-2015] Laschinger, K.; Maas, C.; Günthner, W. A.: Flexible Container Filling Quantities. In: Storsjö, I. (Hrsg.): 2015 Annual Conference of Nordic Logistics Research Network (NOFOMA). Molde, Norway, 2015, S. 1–16.
- [Law-1991] Law, A. M.; McComas, M. G.: Secrets of successful simulation studies. In: Nelson, B. L.; Kelton, W. D.; Clark, G. M. (Hrsg.): 1991 Winter Simulation Conference Proceedings. Phoenix, Arizona, 1991, S. 21–27.
- [Len-1981] Lenstra, J. K.; Kan, A. H. G. R.: Complexity of vehicle routing and scheduling problems. In: Networks, Jg. 11 (1981), 2, S. 221–227.
- [Lie-2017a] Lieb, C.; Klenk, E.; Galka, S.; Keuntje, C.: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung – Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2017.
- [Lie-2017b] Lieberoth-Leden, C.; Röschinger, M.; Lechner, J.; Günthner, W. A.: Logistik 4.0 – Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 451–512.

- [Lie-2018a] Lieb, C.; Hormes, F.; Günthner, W. A.; Fottner, J.: Modellierung und Analyse von Bedarfsschwankungen in Routenzugsystemen zur Versorgung von getakteten Variantenproduktionen. In: *Logistics Journal: Proceedings*, Jg. 2018 (2018), 1, S. 1–16.
- [Lie-2018b] Liebetruh, T.; Merkl, L.: *Routenzugplanung – Ein Fallbeispiel*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2018.
- [Lie-2019] Lieb, C.; Prinz, T.; Günthner, W. A.; Fottner, J.: Modeling and Simulation of Generic Handling Operations in In-Plant Milk-Run Systems. In: Ariwa, E.; Galantucci, L. M. (Hrsg.): *2019 8th International Conference on Industrial Engineering and Management (ICITM)*. Cambridge, UK, 2019, S. 218–223.
- [Lin-1965] Lin, S.: Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. In: *Bell System Technical Journal*, Jg. 44 (1965), 10, S. 2245–2269.
- [Mar-2011] Martin, H.: *Unternehmen und Logistik*. In: Martin, H. (Hrsg.): *Transport- und Lagerlogistik*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011, S. 1–21.
- [Mar-2014a] Martini, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Automatisierung von Routenzugsystemen. In: *F+H - Fördern und Heben*, Jg. 64 (2014), 11, S. 10–13.
- [Mar-2014b] Martini, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Planung von Routenzugsystemen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 109 (2014), 1-2, S. 50–55.
- [Mar-2015] Martini, A.; Rohe, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Einflussfaktoren in Routenzugsystemen – Verfahren zur Berechnung der Einflussstärke von Dimensionierungsparametern. In: *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 105 (2015), 1/2, S. 65–71.
- [Mar-2017] Martini, A.: *Anwendungsorientierte und modellgestützte Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen*. Dissertation. Logistik für Produktionsunternehmen, Universität Siegen, Siegen, 2017.
- [Mar-2018] Martini, A.; Mauksch, T.; Stache, U.: Application-Oriented Optimization of Internal Milk-Run Systems. In: Viles, E.; Lleó, A.; Ormazábal, M. (Hrsg.): *Closing the gap between practice and research in industrial engineering*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2018, S. 141–151.

- [Mei-2011] Meinhardt, I.; Schmidt, T.; Daferner, M.: Einsatzplanung von Routenzügen ohne Simulation planen – Grundlagen für eine analytische Berechnung. In: Hebezeuge und Fördermittel, Jg. 50 (2011), S. 512–515.
- [Mei-2012] Meinhardt, I.; Schmidt, T.: Einsatzplanung für Routenzugsysteme. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Information als Veränderungstreiber – Technische & Organisatorische Aspekte: Tagungsband zum Institutskolloquium. Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme. Dresden, 2012, S. 58–73.
- [Mei-2018] Meinhardt, I.; Schmidt, T.; Doernbrack, M.; Wustmann, D.: Routenzug – Nach Plan wie die Bahn! In: VDI-Berichte Nr. 2325 (2018), S. 279–294.
- [MTM-2004] Deutsche MTM-Vereinigung e. V.: MTM-UAS. Deutsche MTM-Vereinigung e. V., 2004.
- [MTM-2007] Deutsche MTM-Vereinigung e. V.: Handbuch MTM-Logistik. Deutsche MTM-Vereinigung e. V., 2007.
- [Mül-2016] Müller, G.; Bressner, M.; Görzig, D.; Röber, T.: Industrie 4.0: Entwicklungsfelder für den Mittelstand – Aktuelle Hemmnisse und konkrete Bedarfe. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierungstechnik IPA, Stuttgart, 2016.
- [Nou-2018] Nourmohammadi, A.; Eskandari, H.; Fathi, M.; Aghdasi, M.: A mathematical model for supermarket location problem with stochastic station demands. In: Procedia CIRP, Jg. 72 (2018), S. 444–449.
- [o. -2017] o. A.: 3-opt move. <http://tsp-basics.blogspot.com/2017/03/3-opt-move.html>, Aufruf am 21.07.2020.
- [Paw-2018] Pawlewski, P.: Methodology for layout and intralogistics redesign using simulation. In: Johansson, B. (Hrsg.): 2018 Winter Simulation Conference (WSC). Gothenburg, Sweden, 2018, S. 3193–3204.
- [Pen-2020] Peng, Y.; Zeng, T.; Han, Y.; Xia, B.: Scheduling Just-in-Time Transport Vehicles to Feed Parts for Mixed Model Assembly Lines. In: Discrete Dynamics in Nature and Society, Jg. 2020 (2020), S. 1–13.

- [Psa-1983] Psaraftis, H. N.: k-Interchange procedures for local search in a precedence-constrained routing problem. In: *European Journal of Operational Research*, Jg. 13 (1983), 4, S. 391–402.
- [Psa-1995] Psarafatis, H. N.: Dynamic vehicle routing: Status and prospects. In: *Annals of Operations Research*, Jg. 61 (1995), S. 143–164.
- [Rap-2009] Raposo, R.; Pereira, G.; Dias, L. S.: Simulation of a milk run material transportation system in the semiconductors industry. In: Bushan Das, D.; Nassehi, V.; Deka, L. (Hrsg.): *ISC'2009 Industrial Simulation Conference'2009*. Loughborough, UK, 2009, S. 144–151.
- [Rei-2017] Reinhart, G.; Knoll, D.; Teschemacher, U.; Lux, G.; Schnell, J.; Endres, F.; Distel, F.; Seidel, C.; Berger, C.; Klöber-Koch, J.; Pielmeier, J.; Braunreuther, S.: Anwendungsfeld Automobilindustrie. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0*. Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 709–722.
- [Roe-2017] Roessler, M. P.; Wiegel, F.; Abele, E.; Metternich, J.: Simulation-Based Assessment of Lean Production Methods: Approaches to Increase Volume and Variant Flexibility. In: Abele, E.; Boltze, M.; Pfohl, H.-C. (Hrsg.): *Dynamic and Seamless Integration of Production, Logistics and Traffic*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2017, S. 83–104.
- [Rus-2006] Russell, R. A.; Chiang, W.-C.: Scatter search for the vehicle routing problem with time windows. In: *European Journal of Operational Research*, Jg. 169 (2006), 2, S. 606–622.
- [Sat-2012] Satoglu, S. I.; Sahin, I. E.: Design of a just-in-time periodic material supply system for the assembly lines and an application in electronics industry. In: *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 65 (2012), S. 319–332.
- [Sat-2018] Satoglu, S.; Sipahioglu, A.: An Assignment Based Modelling Approach for the Inventory Routing Problem of Material Supply Systems of the Assembly Lines. In: *Sigma J Eng & Nat Sci*, Jg. 36 (2018), 1, S. 161–177.
- [Sav-1985] Savelsbergh, M. W. P.: Local search in routing problems with time windows. In: *Annals of Operations Research*, Jg. 4 (1985), 1, S. 285–305.

- [Sch-2017] Scholz, M.; Serno, M.; Franke, J.; Schuderer, P.: A Hybrid Transport Concept for the Material Supply of a Modular Manufacturing Environment. In: *Procedia Manufacturing*, Jg. 11 (2017), S. 1448–1453.
- [Sch-2019] Schuhmacher, J.; Hummel, V.: Self-organization of changeable intralogistics systems at the ESB Logistics Learning Factory. In: *Procedia Manufacturing*, Jg. 31 (2019), S. 194–199.
- [Sie-2017] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Sim-2020] Simić, D.; Svirčević, V.; Corchado, E.; Calvo-Rolle, J. L.; Simić, S. D.; Simić, S.: Modelling material flow using the Milk run and Kanban systems in the automotive industry. In: *Expert Systems* (2020), e12546, S. 1–15.
- [Sol-1987] Solomon, M. M.: Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. In: *Operations Research*, Jg. 35 (1987), 2, S. 254–265.
- [Sta-2013a] Staab, T.; Galka, S.; Klenk, E.; Günthner, W. A.: Effizienzsteigerung für Routenzüge - Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2013, S. 167–176.
- [Sta-2013b] Staab, T.; Klenk, E.; Günthner, W. A.: Simulating Dynamic Dependencies And Blockages In In-plant Milk-run Traffic Systems. In: Rekdalsbakken, W.; Bye, R. T.; Zhang, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 27th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2013)*. Ålesund, Norway, 2013, S. 622–628.
- [Sta-2015] Staab, T.; Röschinger, M.; Dewitz, M.; Günthner, W. A.: Modelling and Simulating the Assembly Line Supply by Tugger Trains. In: Bruzzone, A. G., et al. (Hrsg.): *The 8th international Workshop on applied Modeling & Simulation*. Rende, Italy, 2015, S. 22–31.
- [Sta-2016] Staab, T.; Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Efficiency in in-plant milk-run systems - The influence of routing strategies on system utilization and process stability. In: *Journal of Simulation*, Jg. 10 (2016), S. 137–143.

- [Tai-1997] Taillard, É.; Badeau, P.; Gendreau, M.; Guertin, F.; Potvin, J.-Y.: A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. In: *Transportation Science*, Jg. 31 (1997), 2, S. 170–186.
- [Tak-2013] Takeda, H.: *Das synchrone Produktionssystem – Just-in-time für das ganze Unternehmen*. Vahlen, München, 2013.
- [Tak-2018] Takir, A.: "Milkrun 4.0" for Smart Manufacturing. In: *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, Jg. 3 (2018), 2, S. 125–127.
- [Tal-2009] Talbi, E.-G.: *Metaheuristics*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2009.
- [Tan-2006] Tan, X.; Zhuo, X.; Zhang, J.: Ant Colony System for Optimizing Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). In: Huang, D.-S.; Irwin, G. W.; Li, K. (Hrsg.): *Computational Intelligence and Bioinformatics*. Springer, Berlin Heidelberg, 2006, S. 33–38.
- [Tes-2017] Teschemacher, U.; Reinhart, G.: Ant Colony Optimization Algorithms to Enable Dynamic Milkrun Logistics. In: *Procedia CIRP*, Jg. 63 (2017), S. 762–767.
- [Tes-2019] Teschemacher, U. S.: *Dynamische Routenzugoptimierung bei kurzfristigen Materialabrufen*. Dissertation. Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München, Garching, 2019.
- [Tur-2015] Turau, V.; Weyer, C.: *Algorithmische Graphentheorie*. De Gruyter, Berlin, Boston, 2015.
- [Ull-2019] Ullrich, G.; Albrecht, T.: *Fahrerlose Transportsysteme*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2019.
- [Ulr-2014] Ulrich, S.; Bruns, R.; Krivenkov, K.: Simulationsgestützte Entwicklung eines Lenkkonzeptes für Routenzüge. In: *Logistics Journal : Proceedings*, Jg. 2014 (2014), 1, S. 1–11.

- [Urr-2018a] Urru, A.; Bonini, M.; Echelmeyer, W.: Fleet-sizing of multi-load autonomous robots for material supply. In: CHEN, Z. N. (Hrsg.): Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI 2018). Singapore, 2018, S. 244–249.
- [Urr-2018b] Urru, A.; Bonini, M.; Echelmeyer, W.: Planning and dimensioning of a milk-run transportation system considering the actual line consumption. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 51 (2018), 9, S. 404–409.
- [Urr-2018c] Urru, A.; Bonini, M.; Echelmeyer, W.: Planning of a Milk-Run Systems in High Constrained Industrial Scenarios. In: Szakál, A. (Hrsg.): 2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). Las Palmas de Gran Canaria, 2018, S. 231–238.
- [Vai-1999] Vaidyanathan, B. S.; Matson, J. O.; Miller, D.; Matson, J. E.: A capacitated vehicle routing problem for just-in-time delivery. In: IEE Transactions, Jg. 31 (1999), S. 1083–1092.
- [VDI-3633a] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. VDI Richtlinie, 3633 Blatt 3, 1997.
- [VDI-3633b] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. VDI Richtlinie, 3633 Blatt 1, 2014.
- [VDI-5586a] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Routenzugsysteme - Grundlagen, Gestaltung und Praxisbeispiele. VDI Richtlinie, 5586 Blatt 1, 2016.
- [VDI-5586b] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Routenzugsysteme - Planung und Dimensionierung. VDI Richtlinie, 5586 Blatt 2, 2016.
- [Wan-2012] Wanner, M.; Sender, J.; Herzig, O.: Schlanke Intralogistik bei ungeordneten Materialflüssen. In: ProductivITy Management, Jg. 17 (2012), 3, S. 47–50.
- [Wie-2013] Wiegel, F.; Immler, S.; Knobloch, D.; Abele, E.: Simulationsgestützte Optimierung innerbetrieblicher Milkruns – Entwicklung eines Simulationsmodells zur Planung und Optimierung der Materialbereitstellung. In: ProductivITy Management, Jg. 18 (2013), 1, S. 51–54.

- [Wil-2006] Williams, E. J.; Ulgen, O. M.; Baillif, S.; Lote, R.: Material handling resource utilization simulation study for stamping plant. In: Informs (Hrsg.): Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, CA, 2006, S. 1940–1945.
- [Zho-2020] Zhou, B.; Zhu, Z.: Optimally scheduling and loading tow trains of in-plant milk-run delivery for mixed-model assembly lines. In: Assembly Automation, Jg. 40 (2020), 3, S. 511–530.
- [Zim-2015] Zimmerling, R.; Hölscher, J. H.: Intelligente Intralogistik zur bedarfsgerechten Materialversorgung der Produktion vernetzt mit der Transportlogistik. In: Reinhart, G., et al. (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2015, S. 353–360.

Verzeichnis der durch den Autor betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen der durch diese Dissertation aufgegriffenen Forschungsthematik wurden nachfolgende Studienarbeiten erstellt. Die Anfertigung der Arbeiten wurde durch den Autor wissenschaftlich und inhaltlich angeleitet.

Kurzbeleg	Titel	Autor	Art	Abgabe
	Konzeption und Evaluierung einer modularen Steuerung für generische Routenzugsysteme	Koukal, Annika	Semesterarbeit	2017
	Auswirkungen der Volatilität von Bedarfen auf die Ziele der Steuerung von statischen Routenzugsystemen	Tarde, Christian	Masterarbeit	2017
	Bewertung des Layouteinflusses auf die Routenbildung in einem Routenzugsystem	Li, Rui	Semesterarbeit	2017
	Identifikation charakteristischer Einsatzszenarien von Routenzugsystemen	Wibowo, Maria Virginia Michella	Semesterarbeit	2017
	Modellierung und Implementierung eines Routenzugsystems in Plant Simulation	Prinz, Theresa	Bachelorarbeit	2018
	Entwicklung und Evaluierung eines Konzepts für ein Kennzahlen-Cockpit basierend auf einem Kennzahlensystem für Routenzugsysteme	Li, Rui	Masterarbeit	2018
	Deterministische Planung innerbetrieblicher Routenverkehre durch den Einsatz von Optimierungsalgorithmen	Göbel, Laura	Masterarbeit	2018
	Steuerung von Routenzügen - Design of Experiments	Reimer-Kern, Astrid	Masterarbeit	2018
	Dynamische Ablaufplanung von Routenzugsystemen	Procher, Jakob	Bachelorarbeit	2018

	Zentrale versus dezentrale Steuerung im Routenzugsystem	Suarez Major, Rodrigo	Bachelorarbeit	2018
	Dynamische Wegfindung in Routenzugsystemen	Grau Miarons, Artur	Bachelorarbeit	2018
[fml-2019a]	Entwicklung eines Algorithmus zur dynamischen Steuerung von Routenzugsystemen mit Hilfe von selbstorganisierten Netzen	Straub, Sebastian	Masterarbeit	2019
[fml-2019b]	Implementierung des Ameisenalgorithmus zur Tourenplanung und Simulation für das Routenzugsystem	Yuanzheng, Tian	Masterarbeit	2019
	Induktive Analyse von Routenzugsystemen	Grau Miarons, Artur	Semesterarbeit	2020

Abbildungsverzeichnis

Hauptteil

Abbildung 1-1:	Herausforderungen und Wegbereiter des Wandels in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung	3
Abbildung 1-2:	Erwartungen hinsichtlich Effektivität und Effizienz an eine dynamische Routenzugsystemsteuerung im Vergleich zu statisch geplanten Systemen (vgl. [Lie-2017a, S. 68 f.]	5
Abbildung 1-3:	Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit	9
Abbildung 2-1:	Schema der in dieser Arbeit betrachteten Routenzugsysteme	14
Abbildung 2-2:	Schematischer Aufbau des linearisierten Handhabungsprozesses in Routenzugsystemen	22
Abbildung 3-1:	Vorgehensweise zur Konzeptentwicklung bei der Planung von Routenzugsystemen (vgl. [Kle-2017, S. 28]) und Überschneidungen mit den Dimensionen einer ganzheitlichen Steuerungsstrategie	37
Abbildung 3-2:	Pseudocode des Dijkstra-Algorithmus (vgl. [Her-2014b])	44
Abbildung 3-3:	Gemittelte Bewertung der Metaheuristiken für Tourenplanungsprobleme auf Basis der Solomon-Klassen R1 und RC1 (vgl. [Tes-2019, S. 65])	49
Abbildung 3-4:	Lösungsmöglichkeiten des TSP im Routenzugsystem in Abhängigkeit der Problemgröße (ohne Berücksichtigung von Zeitfenstern)	50
Abbildung 3-5:	Schematische Funktionsweise eines 2-opt Austausches (vgl. [Psa-1983])	51
Abbildung 3-6:	Schematische Funktionsweise eines 3-opt Austausches (vgl. [o.-2017])	51
Abbildung 3-7:	Anzahl der in der Literatur vorgestellten Algorithmen zu den routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen kategorisiert nach Informationsevolution (IE) und Informationsqualität (IQ) der Transportbedarfe (vgl. Tabelle 3-3, S. 53 und Tabelle 3-4, S. 55)	66
Abbildung 3-8:	Anzahl der in der Literatur vorgestellten Vergleiche von Ausprägungen verschiedener Steuerungsentscheidungen (vgl. Tabelle 3-5, S. 61)	67
Abbildung 4-1:	Auswertung der Merkmalsausprägungskombinationen von Ladungsträgerart, Anhängerkonzept und Handhabungsprozess	85
Abbildung 4-2:	Übersicht der repräsentativen Routenzugreferenzsysteme	86
Abbildung 5-1:	Basiselemente eines Transportnetzwerks im Routenzugsystem	89

Abbildung 5-2:	Schematische Unterteilung des Transportnetzwerks in Hoch- und Tiefebene	90
Abbildung 5-3:	Schematische Darstellung der Tiefebene des Transportnetzwerks	91
Abbildung 5-4:	Schematische Darstellung der Hochebene des Transportnetzwerks	92
Abbildung 5-5:	Sensitivitätsanalyse des Einflussfaktors Produktionstaktzeit T auf die Verteilungen der Zwischenverbrauchs- und Zwischenabrufzeit	97
Abbildung 5-6:	Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren Verbraurate r , Distanzrestriktion d und Blockrestriktion b auf die Verteilungen der Zwischenverbrauchs- und Zwischenabrufzeit	98
Abbildung 5-7:	Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren Verbauzahl z , Ladungsträgerkapazität k , Füllmengenabweichung Δk und Qualitätsrate q auf die Verteilung der Zwischenabrufzeit	100
Abbildung 5-8:	Schematische Darstellung der Transportressource Routenzug mit Technikvarianten	102
Abbildung 5-9:	Bereitstellwege an der Senke in Abhängigkeit der Infrastruktur und Anfahrtrichtung	105
Abbildung 5-10:	Zustandsdiagramm des generischen Modellierungsansatzes der Handhabungsprozesse (vgl. [Lie-2019])	106
Abbildung 5-11:	UML-Diagramm des generischen Modellierungsansatzes der Handhabungsprozesse (vgl. [Lie-2019])	107
Abbildung 6-1:	Integration der Entscheidungsprobleme in eine Routenzugsystemsteuerung	111
Abbildung 6-2:	Systemzusammenhang des Moduls „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“	114
Abbildung 6-3:	Pseudocode für den Ablauf der Routenbildung im Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“	115
Abbildung 6-4:	Haupteffektdiagramme der Parametereinstellungen bei der Routenbildung für das Layout Montage bei mittlerem Transportbedarf	117
Abbildung 6-5:	Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl Routenzüge in Abhängigkeit des Parameters $\lambda_{max}/\lambda_{system}$ für $tF, max = 600 s$	117
Abbildung 6-6:	Systemzusammenhang des Moduls „Zeitfenster“	120
Abbildung 6-7:	Pseudocode für den Ablauf der Zeitfensterbestimmung aller Transportaufträge eines Clusters	120
Abbildung 6-8:	Systemzusammenhang der Modulusprägung „Prioritätsregeln“ des Moduls „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“	122
Abbildung 6-9:	Zusammenhang der Touren- und Reihenfolgebildung sowie Wegfindung bei der Modulusprägung „Prioritätsregeln“	123

Abbildung 6-10: Einfluss eines zusätzlichen Transportauftrags auf die Bereitstellzeiten der Tour	124
Abbildung 6-11: Systemzusammenhang der Modulausprägung „Integrierte Optimierung“ des Moduls „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“	125
Abbildung 6-12: Schematischer Ablauf der Modulausprägung „Integrierte Optimierung“ mittels MACS	127
Abbildung 6-13: Pseudocode des NNH-Algorithmus zur Bildung einer initialen Lösung für das MACS	128
Abbildung 6-14: Pseudocode der ACS: Touren zur Minimierung der notwendigen Touren	130
Abbildung 6-15: Pseudocode der ACS: Zeit zur Minimierung der Gesamtkosten des Tourensets	132
Abbildung 6-16: Pseudocode der Aktivierung einer Ameise zur Bestimmung eines Sets mit v Touren	133
Abbildung 6-17: Pseudocode zum Finden einer Ameisenlösung für das VRPTW (ACS_VRPTW)	134
Abbildung 6-18: Schematische Einordnung der MACS Kalibrierung	136
Abbildung 6-19: Pseudocode zur lernenden Selbstkalibrierung des MACS	137
Abbildung 6-20: Haupteffektdiagramme der Vergleiche der Heuristiken zur Tourenbildung und der Heuristiken zur lokalen Optimierung	139
Abbildung 6-21: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl an Zügen in Abhängigkeit der Heuristiken	139
Abbildung 6-22: Rechenzeiten der Heuristiken in Abhängigkeit der Problemgröße	140
Abbildung 6-23: Systemzusammenhang des Moduls „Abfahrtszeit“	141
Abbildung 6-24: Haupteffektdiagramme der Auswirkungen der geplanten kapazitiven Auslastung bei der Kalkulation des Routentakts	144
Abbildung 6-25: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl an Zügen in Abhängigkeit der geplanten kapazitiven Auslastung bei der Kalkulation des Routentakts für ein Szenario mit mittlerem Durchsatz und keinen Schwankungen der Zwischenabrufzeiten	145
Abbildung 6-26: Anteil optimaler Szenarien in der Parametrisierung der getakteten Tourenstartlogik in Abhängigkeit der kapazitiven Plan-Auslastung η_{soll}	145
Abbildung 6-27: Schematische Darstellung der Abfahrtszeitbestimmung bei der Modulausprägung „Auslastungsorientiert mit Zeitgrenze“	147
Abbildung 6-28: Haupteffektdiagramme der Auswirkungen des zeitlichen Sicherheitspuffers Δt_{SP} zur spätesten Bereitstellzeit eines Transportauftrags	147

Abbildung 6-29: Detailbetrachtung der Optimierungsgrößen WIP und Anzahl an Zügen in Abhängigkeit des zeitlichen Sicherheitspuffers bei der Bestimmung des Tourenstarts für ein Szenario mit niedrigem Durchsatz und hohen Schwankungen der Zwischenabrufzeiten	148
Abbildung 6-30: Anteil optimaler Szenarien in der Parametrisierung der auslastungsorientierten Tourenstarlogik mit Zeitgrenze in Abhängigkeit des zeitlichen Sicherheitspuffers Δt_{SP}	148
Abbildung 6-31: Systemzusammenhang des Moduls „Ressourcen“	149
Abbildung 6-32: Systemzusammenhang des Moduls „Intratour: Reihenfolge, Weg“	151
Abbildung 6-33: Auswirkungen der Ausprägungen der Reihenfolge und des Wegs sowie der Kosten und des Tourenverlaufs auf die möglichen Modulausprägungen	151
Abbildung 6-34: Prinzipien der Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens in den dynamischen Kosten der Kanten der Tiefebene des Transportnetzwerks	153
Abbildung 6-35: Durchschnittliche Mittelwerte sowie Minima und Maxima der Zykluszeit, Fahrtzeit und Stauzeit je Tour in Abhängigkeit der im Routenzugsystem eingesetzten Züge	155
Abbildung 6-36: Modulausprägungen der Steuerungsstrategien der Routenzugsysteme in dieser Arbeit	156
Abbildung 7-1: Exemplarische Ergebnisse der Hauptzielgrößen für die Bewertung der Effizienz eines Routenzugsystem-Szenarios	164
Abbildung 7-2: Tourenlänge in Abhängigkeit des Layouts und der Anzahl an Haltestellen	166
Abbildung 7-3: Zwischenabrufzeiten der Transportaufträge je Klienten und je System in Abhängigkeit des Systemdurchsatzes und der Transportbedarfsschwankungen je Klienten	169
Abbildung 7-4: Vollgut-LT je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart und Zuglänge	171
Abbildung 7-5: Fahrtzeit je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses	173
Abbildung 7-6: Handhabungszeit je Tour an der Materialflussquelle in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses	174
Abbildung 7-7: Handhabungszeit je Tour an den Senken in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses	174
Abbildung 7-8: \emptyset -Zykluszeitanteile in Abhängigkeit der Ladungsträgerart, der Anhängertechnik und des Prozesses	175
Abbildung 7-9: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 25 %	177

Abbildung 7-10: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 50 %	178
Abbildung 7-11: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 75 %	179
Abbildung 7-12: Effizienzoptimalität der dynamischen Steuerungsstrategien für den WIP-Bereich 100 %	179
Abbildung 7-13: Effektivität der untersuchten Steuerungsstrategien im Versuchsplan für den WIP-Bereich 25 %	191
Abbildung 7-14: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Fahrtzeit je Tour	193
Abbildung 7-15: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Stauzeit je Tour	193
Abbildung 7-16: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Kapazitätsauslastung je Tour	195
Abbildung 7-17: Effizienzbewertung der Steuerungsstrategien in einem Szenario über den Zusammenhang aus Anzahl notwendiger Züge und Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge	196
Abbildung 7-18: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	197
Abbildung 7-19: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	198
Abbildung 7-20: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	199
Abbildung 7-21: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	199
Abbildung 7-22: Effizienzpotentiale der Steuerungsstrategien S08, S12, S17 und S18 gegenüber der Referenzstrategie S01	200
Abbildung 7-23: Haupteffekte der Modulusprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 25 %	201
Abbildung 7-24: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 25 %	205
Abbildung 7-25: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 100 %	207
Abbildung 7-26: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 25 %	208
	261

Abbildung 7-27: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 100 %	210
Abbildung 8-1: Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der Versorgungssicherheit in Routenzugsystemen	212
Abbildung 8-2: Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich des Staus der Transportmittel in Routenzugsystemen	213
Abbildung 8-3: Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der kapazitiven Auslastung der Transportmittel in Routenzugsystemen	213
Abbildung 8-4: Erwartungen an und Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der Bestände im Produktionsbereich in Routenzugsystemen	214
Abbildung 8-5: Ergebnisse der dynamischen Steuerungsstrategien hinsichtlich der Anzahl an notwendigen Transportmitteln in Routenzugsystemen	215
Abbildung 9-1: Prinzipskizze der kollaborativen automatischen Produktionsversorgung	230
Abbildung 9-2: Zykluszeitvergleich für unterschiedliche Konzepte der automatischen Produktionsversorgung	231

Anhang

Abbildung A-1: Rechenzeitvergleich verschiedener Datenstrukturen für den Dijkstra-Algorithmus	A-3
Abbildung C-1: Layout Rundkurs mit 10 Klienten	C-1
Abbildung C-2: Layout Rundkurs mit 50 Klienten	C-1
Abbildung C-3: Layout Montage mit 10 Klienten	C-2
Abbildung C-4: Layout Montage mit 50 Klienten	C-2
Abbildung C-5: Layout Werkstatt mit 10 Klienten	C-3
Abbildung C-6: Layout Werkstatt mit 50 Klienten	C-3
Abbildung E-1: Häufigkeitsverteilungen der Parameterwerte nach der Selbstkalibrierung des MACS durch 177.245 Kalibrierungsläufe	E-1
Abbildung F-1: Haupteffekte der Gewichtung der dynamischen Kostenanteile auf den WIP und die Anzahl an Zügen je Ausprägung der Intratouroptimierung	F-2
Abbildung F-2: Haupteffekte der Ausprägungen der Intratouroptimierung auf den WIP und die Anzahl der Züge im Routenzugsystem	F-2

Abbildung F-3:	Haupteffekte der Ausprägungen der Intratouroptimierung auf den Stauzeitanteil an der gesamten Fahrtzeit je Tour im Routenzugsystem	F-3
Abbildung G-1:	Schematischer Aufbau der generischen Simulationsumgebung für Routenzugsysteme	G-1
Abbildung G-2:	Beispielhafte Ausschnitte aus der Routenzugsystemebene im Simulationsmodell	G-3
Abbildung I-1:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	I-1
Abbildung I-2:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	I-1
Abbildung I-3:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	I-2
Abbildung I-4:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %	I-2
Abbildung I-5:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %	I-2
Abbildung I-6:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %	I-3
Abbildung I-7:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %	I-3
Abbildung I-8:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %	I-3
Abbildung I-9:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %	I-4
Abbildung I-10:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %	I-4
Abbildung I-11:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %	I-4
Abbildung I-12:	Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %	I-5

Abbildung I-13: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %	I-5
Abbildung I-14: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %	I-5
Abbildung I-15: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %	I-6
Abbildung I-16: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %	I-6
Abbildung I-17: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 25 %	I-7
Abbildung I-18: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 50 %	I-10
Abbildung I-19: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 75 %	I-13
Abbildung I-20: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 100 %	I-16
Abbildung J-1: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 25 %	J-1
Abbildung J-2: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S02 für den WIP-Bereich 25 %	J-2
Abbildung J-3: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S03 für den WIP-Bereich 25 %	J-3
Abbildung J-4: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S04 für den WIP-Bereich 25 %	J-4
Abbildung J-5: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S05 für den WIP-Bereich 25 %	J-5
Abbildung J-6: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S06 für den WIP-Bereich 25 %	J-6
Abbildung J-7: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S07 für den WIP-Bereich 25 %	J-7
Abbildung J-8: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S08 für den WIP-Bereich 25 %	J-8
Abbildung J-9: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S09 für den WIP-Bereich 25 %	J-9
Abbildung J-10: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S10 für den WIP-Bereich 25 %	J-10
Abbildung J-11: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S11 für den WIP-Bereich 25 %	J-11

Abbildung J-12: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S12 für den WIP-Bereich 25 %	J-12
Abbildung J-13: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S13 für den WIP-Bereich 25 %	J-13
Abbildung J-14: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S14 für den WIP-Bereich 25 %	J-14
Abbildung J-15: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S15 für den WIP-Bereich 25 %	J-15
Abbildung J-16: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S16 für den WIP-Bereich 25 %	J-16
Abbildung J-17: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S17 für den WIP-Bereich 25 %	J-17
Abbildung J-18: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 25 %	J-18

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 2-1:	Randbedingungen eines Routenzugsystems (vgl. [Bru-2012, S. 22/ 75 f.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Gün-2016, S. 56 f.; Keu-2019, S. 189 f.] ₆ ; [Kle-2017] ₇ ; [Lie-2018a] ₉ ; [Gün-2012, S. 38] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 21 ff.] ₁₂)	20
Tabelle 2-2:	Organisatorische Gestaltung eines Routenzugsystems (vgl. [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Gün-2016, S. 56; Keu-2019, S. 189] ₆ ; [Kle-2017, S. 12] ₇ ; [Gün-2012, S. 39] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 29 ff/ 38 f./ 81] ₁₂)	21
Tabelle 2-3:	Vorbereitende Handhabungsprozesse an der Quelle (vgl. [Bru-2012, S. 54 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Kle-2017, S. 87 ff.] ₇ ; [Gün-2012, S. 41 ff.] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	23
Tabelle 2-4:	Durchführende Handhabungsprozesse an der Quelle (vgl. [Bru-2012, S. 54 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Gün-2016, S. 55 f.; Keu-2019, S. 188 f.] ₆ ; [Kle-2017, S. 87 ff.] ₇ ; [Lie-2019] ₁₀ ; [Gün-2012, S. 39 ff.] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	24
Tabelle 2-5:	Nachbereitende Handhabungsprozesse an der Quelle (vgl. [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Kle-2017, S. 87 ff.] ₇ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	24
Tabelle 2-6:	Vorbereitende Handhabungsprozesse an der Senke (vgl. [VDI-5586a] ₅ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	25
Tabelle 2-7:	Durchführende Handhabungsprozesse an der Senke (vgl. [Bru-2012, S. 68 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Kle-2017, S. 87 ff.] ₇ ; [Lie-2019] ₁₀ ; [Gün-2012, S. 41 ff.] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	25
Tabelle 2-8:	Nachbereitende Handhabungsprozesse an der Senke (vgl. [Bru-2012, S. 68 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Kle-2017, S. 87 ff.] ₇ ; [Gün-2012] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	26
Tabelle 2-9:	Durchführen der Fahrt einer Tour (vgl. [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [Kle-2017, S. 87 ff.] ₇ ; [Lie-2017a, S. 37 ff.] ₁₂)	26

Tabelle 2-10:	Transportmittel in einem Routenzugsystem (vgl. [Bru-2012, S. 64 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Gün-2016, S. 52; Keu-2019, S. 184 f.] ₆ ; [Kle-2017, S. 19 ff.] ₇ ; [Gün-2012, S. 38/ 46 ff.] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 44 f.] ₁₂)	27
Tabelle 2-11:	Allgemeine technische Konzepte der Anhänger (vgl. [Bru-2012, S. 64 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [Gün-2016, S. 52 f.; Keu-2019, S. 184 ff.] ₆ ; [Kle-2017, S. 19 ff.] ₇ ; [Lie-2019] ₁₀ ; [Gün-2012, S. 46 ff.] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 47 f.] ₁₂)	28
Tabelle 2-12:	Tourenbildung in Routenzugsystemen (vgl. [Bru-2012, S. 35 ff./ 72 ff.] ₁ ; [Gün-2013, S. 96 ff.] ₂ ; [Dro-2013b, S. 32 ff.; Dro-2013a, S. 22 ff.] ₃ ; [Mar-2014b; Mar-2017, S. 41 ff.] ₄ ; [VDI-5586a] ₅ ; [Gün-2016, S. 57] ₆ ; [Kle-2015b; Kle-2017, S. 21 ff.; Kle-2019] ₇ ; [Hor-2017] ₈ ; [Gün-2012, S. 38 ff.] ₁₁ ; [Lie-2017a, S. 41 ff./ 63 ff.] ₁₂)	30
Tabelle 2-13:	Eignung von Routenzugsystemen in Abhängigkeit von Einflussfaktoren (vgl. [Gün-2013, S. 99; Mar-2017, S. 19; Kle-2017, S. 237 ff.]	33
Tabelle 3-1:	Lösungsverfahren für Tourenplanungsproblem (vgl. [Tes-2019, S. 44; Cac-2015])	47
Tabelle 3-2:	Ausprägungen der Dynamik der Transportbedarfe klassifiziert nach Informationsevolution (IE) und Informationsqualität (IQ)	52
Tabelle 3-3:	Klassifikation der Literatur zur rein analytischen Lösung der routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen	53
Tabelle 3-4:	Klassifikation der Literatur zu Lösungsalgorithmen für die routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen mit integrierter Optimierung	55
Tabelle 3-5:	Klassifikation der Literatur zum Vergleich verschiedener Ausprägungen der Lösungsalgorithmen der routenzugspezifischen Steuerungsentscheidungen	61
Tabelle 4-1:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen der Randbedingungen eines Routenzugsystems	72
Tabelle 4-2:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen der organisatorischen Gestaltung eines Routenzugsystems	74
Tabelle 4-3:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen vorbereitender Handhabungsprozesse an der Quelle eines Routenzugsystems	76
Tabelle 4-4:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen durchführender Handhabungsprozesse an der Quelle eines Routenzugsystems	77
Tabelle 4-5:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen nachbereitender Handhabungsprozesse an der Quelle eines Routenzugsystems	77

Tabelle 4-6:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen vorbereitender Handhabungsprozesse an der Senke eines Routenzugsystems	78
Tabelle 4-7:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen durchführender Handhabungsprozesse an der Senke eines Routenzugsystems	79
Tabelle 4-8:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen nachbereitender Handhabungsprozesse an der Senke eines Routenzugsystems	79
Tabelle 4-9:	Auswahl der relevanten Durchführungsart der Fahrt einer Tour eines Routenzugsystems	80
Tabelle 4-10:	Auswahl der relevanten Merkmalsausprägungen der Transportmittel in einem Routenzugsystem	80
Tabelle 4-11:	Auswahl der relevanten Anhängerkonzepte in Routenzugsystemen	81
Tabelle 5-1:	Schrittweise Entstehung der diskreten empirischen Verteilung der Verbauereignisse eines Klienten an einem Beispiel (vgl. [Lie-2018a])	96
Tabelle 5-2:	Referenzwerte für die Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren auf die Transportbedarfe	97
Tabelle 6-1:	Parameter zur Kalibrierung des MACS	135
Tabelle 6-2:	Intervalle und Stufen der zu kalibrierenden Parameter des MACS	136
Tabelle 6-3:	Übersicht der Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme mit unterschiedlichem Dynamisierungsgrad	158
Tabelle 7-1:	Faktoren und Stufen des Versuchsplans	162
Tabelle 7-2:	\emptyset -Tourenlänge in Abhängigkeit des Layouts und der Anzahl an Haltestellen im Transportnetzwerk	167
Tabelle 7-3:	μ und σ der System-Zwischenabrufzeiten (ZAZ) in Abhängigkeit des Systemdurchsatzes, der Transportbedarfsschwankungen der Klienten und der Anzahl an zu versorgenden Klienten	170
Tabelle 7-4:	\emptyset Anzahl an Ladungsträgern je Tour in Abhängigkeit der Ladungsträgerart und der Routenzuglänge	172
Tabelle 7-5:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Layout“ für den WIP-Bereich 25 %: (\uparrow) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (\downarrow) unterdurchschnittlich	181
Tabelle 7-6:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Layout“ für den WIP-Bereich 100 %: (\uparrow) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (\downarrow) unterdurchschnittlich	182

Tabelle 7-7:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Anzahl Klienten“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	183
Tabelle 7-8:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Anzahl Klienten“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	183
Tabelle 7-9:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Systemlast“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	184
Tabelle 7-10:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Systemlast“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	184
Tabelle 7-11:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Schwankungen der Transportbedarfe“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	185
Tabelle 7-12:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Schwankungen der Transportbedarfe“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	186
Tabelle 7-13:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Ladungsträgerart“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	186
Tabelle 7-14:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Ladungsträgerart“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	187
Tabelle 7-15:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Prozess und Anhängertechnik“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	188
Tabelle 7-16:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Prozess und Anhängertechnik“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	189

Tabelle 7-17:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Routenzuglänge“ für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	189
Tabelle 7-18:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Stufen des Faktors „Routenzuglänge“ für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	190
Tabelle 7-19:	ANOVA des Einflusses der Flexibilität der Fahrwegbildung einer Steuerungsstrategie für den WIP-Bereich 25 %	203

Anhang

Tabelle B-1:	Gegenüberstellung der VRPTW-Lösungsverfahren anhand der Mittelwerte der Instanzen R1 und RC1 der Solomon-Benchmarks für 100 Knoten (NV: Anzahl an Fahrzeugen, TD: Gesamtdistanz, TIME: Rechenzeit in s)	B-1
Tabelle D-1:	Grenzwerte $\lambda_{max}/\lambda_{system}$ und tF, max der Clusterbildung in Abhängigkeit der Ausprägungen des Routenzugsystems	D-1
Tabelle H-1:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	H-1
Tabelle H-2:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 50 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	H-2
Tabelle H-3:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 75 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	H-3
Tabelle H-4:	Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich	H-4
Tabelle I-1:	ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 25 %	I-7
Tabelle I-2:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 25 %	I-8
Tabelle I-3:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 25 %	I-8
Tabelle I-4:	ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 25 %	I-9
Tabelle I-5:	ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 25 %	I-9

Tabelle I-6:	ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 50 %	I-10
Tabelle I-7:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 50 %	I-11
Tabelle I-8:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 50 %	I-11
Tabelle I-9:	ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 50 %	I-12
Tabelle I-10:	ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 50 %	I-12
Tabelle I-11:	ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 75 %	I-13
Tabelle I-12:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 75 %	I-14
Tabelle I-13:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 75 %	I-14
Tabelle I-14:	ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 75 %	I-15
Tabelle I-15:	ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 75 %	I-15
Tabelle I-16:	ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 100 %	I-16
Tabelle I-17:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 100 %	I-17
Tabelle I-18:	ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 100 %	I-17
Tabelle I-19:	ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 100 %	I-18
Tabelle I-20:	ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 100 %	I-18

Anhang A Exkurs zum Problem des kürzesten Pfades

Die Lösung des Problems des kürzesten Pfades erfolgt in dieser Arbeit mit dem Dijkstra-Algorithmus (vgl. [Dij-1959]). Die Effizienz des Algorithmus wird u. a. durch die Datenstrukturen der Knotenbeziehungen und Kantengewichte sowie der Warteschlange bestimmt (vgl. [Tur-2015, S. 307]).

A.1 Datenstrukturen und Lösungskomplexität

Die Effizienz von Datenstrukturen in Verbindung mit Algorithmen kann durch die Komplexitätstheorie²⁴ unabhängig von Hardwarekonfigurationen und ohne eine Implementierung verglichen werden [Tur-2015, S. 38].

Im Folgenden werden für die Verwaltung der Knotenbeziehungen und Kantengewichte eine bewertete Adjazenzmatrix sowie eine bewertete Adjazenzliste verglichen.

Bei der bewerteten Adjazenzmatrix wird ein Graph G mit n Knoten durch eine $n \times n$ Matrix $A(G)$ repräsentiert. Falls keine Verbindung zwischen zwei Knoten i und j besteht, ist der Eintrag a_{ij} von $A(G)$ gleich Null. Anderenfalls entspricht a_{ij} dem Kantengewicht $c_{(i,j)}$. Um die Nachfolger eines Knotens zu finden, müssen alle n Zeilen- bzw. n Spalteneinträge überprüft werden, d. h. die Komplexität dieser Operation ist $O(n)$ [Tur-2015, S. 30].

Die bewertete Adjazenzliste speichert für jeden Knoten nur die Beziehungen zu den direkten Nachfolgern als verkettete Listen oder mittels Zeiger. Die m Nachfolger eines Knotens können direkt abgelesen werden ($O(m)$). [Tur-2015, S. 30 f.].

Sofern nicht jeder Knoten jedem anderen Knoten folgt, ist die Verwendung von bewerteten Adjazenzlisten für den Dijkstra-Algorithmus folglich effizienter als der Einsatz einer bewerteten Adjazenzmatrix.

²⁴ Zur Darstellung der Lösungskomplexität wird die O -Notation verwendet. Eine Erklärung dazu ist in *Turau und Weyer* (vgl. [Tur-2015, S. 38 ff.]) enthalten.

Eine wichtige Operation, die auf die Warteschlange im Dijkstra-Algorithmus angewandt wird, ist das Finden eines Minimums der darin enthaltenen Knoten. Für die Datenstruktur der Warteschlange werden vier Alternativen untersucht.

Zunächst erfolgt eine intuitive Implementierung als unsortierte Warteschlange (WS). Diese stellt eine einfache Liste der wartenden Knoten inkl. deren Kosten dar. In der verwendeten Software Plant Simulation wurden dazu zwei Varianten implementiert. Die erste Variante bildet die Liste als doppeltes Array innerhalb einer Methode ab. Die zweite Variante nutzt den softwareeigenen Baustein der Warteschlange. Zum Finden des minimalen Eintrags müssen bei einer unsortierten Warteschlange alle n Einträge gegenseitig miteinander verglichen werden. Die Komplexität des Dijkstra-Algorithmus mit dieser Datenstruktur beträgt dann insgesamt $O(n^2)$ [Tur-2015, S. 307].

Um die Komplexität dieser Operationen zu reduzieren, werden zwei Formen von Heaps betrachtet (vgl. [Tur-2015, S. 307]). Ein Heap repräsentiert die Warteschlange in Form von Wurzelbäumen, bei denen sich das Minimum immer an der Wurzel befindet. Die Knoten der Warteschlange werden in einer einfachen Liste gespeichert, die durch einen Heapsort-Algorithmus sortiert wird [Tur-2015, S. 71 ff.]. Für eine Beschreibung des Ablaufs des Algorithmus wird auf *Turau und Weyer* (vgl. [Tur-2015, S. 71 ff.]) verwiesen. Die Komplexität des Dijkstra-Algorithmus ergibt sich für Binary-Heaps dann zu $O(m \log_2 n)$, wobei m die Anzahl der Nachbarn repräsentiert, für die jeweils Änderungen im Verlauf des Algorithmus erforderlich sind. Besonders für Graphen, in denen wenig Kanten vorhanden sind, erreichen die Heaps deshalb eine effizientere Ausführung der Pfadsuche [Tur-2015, S. 307]. Durch die Verwendung von Fibonacci-Heaps kann die Komplexität weiter gesenkt werden. Dabei werden durch den Einsatz von Zeigern die Änderungen eines Elements komplexitätstheoretisch effizienter. Insgesamt ergibt sich dann eine Gesamtkomplexität von $O(m + \log n)$ für den Dijkstra-Algorithmus [Tur-2015, S. 307]. Für eine detaillierte Beschreibung der Fibonacci-Heaps wird auf *Fredman und Tarjan* (vgl. [Fre-1987]) verwiesen.

A.2 Experimente zur Rechenzeit

Da die Steuerungsalgorithmen in dieser Arbeit in der Software Plant Simulation implementiert werden, erfolgt auch der Rechenzeitvergleich der Datenstrukturen intern im Simulationsmodell.

In Abbildung A-1 ist der Rechenzeitvergleich je Aufruf des Dijkstra-Algorithmus für die unterschiedlichen Datenstrukturen in Abhängigkeit der Problemgröße dargestellt. Die

Skalierung der Achsen ist logarithmisch. Die abgebildeten Werte sind jeweils Mittelwerte von mindestens 1.500 Aufrufen.

Zunächst zeigt der Vergleich der Matrix- und der Listenstruktur in Verbindung mit einer unsortierten Warteschlange, dass die Matrixstruktur deutlich höhere Rechenzeiten für eine Ausführung des Dijkstra-Algorithmus erfordert. Dies gilt insbesondere mit zunehmender Problemgröße. Aus diesem Grund werden die anderen Datenstrukturen der WS nur zusammen mit einer bewerteten Adjazenzliste analysiert.

Während die Fibonacci-Heaps in der theoretischen Komplexitätsbetrachtung die höchste Effizienz aufweisen, ergeben sich nach der Implementierung deutlich höhere Rechenzeiten als für die anderen Datenstrukturen. Es wird vermutet, dass dies an der intensiven Nutzung von Zeigern liegt, für die keine effiziente Implementierung in Plant Simulation erreicht wurde. Die kürzesten Rechenzeiten pro Aufruf werden für kleine Instanzen von der in eine Methode integrierten, unsortierten WS erreicht. Je mehr Knoten jedoch im Graphen enthalten sind, desto rechenintensiver wird diese Implementierung. Ähnlich gute Rechenzeiten werden von der Implementierung als unsortierte WS unter der Nutzung der Plant Simulation softwareeigenen Warteschlangenbausteine (Ext) sowie den Binary-Heaps erzielt. Dies gilt besonders für größeren Instanzen. In dieser Arbeit werden die Binary-Heaps als Grundlage für die Pfadfindung verwendet.

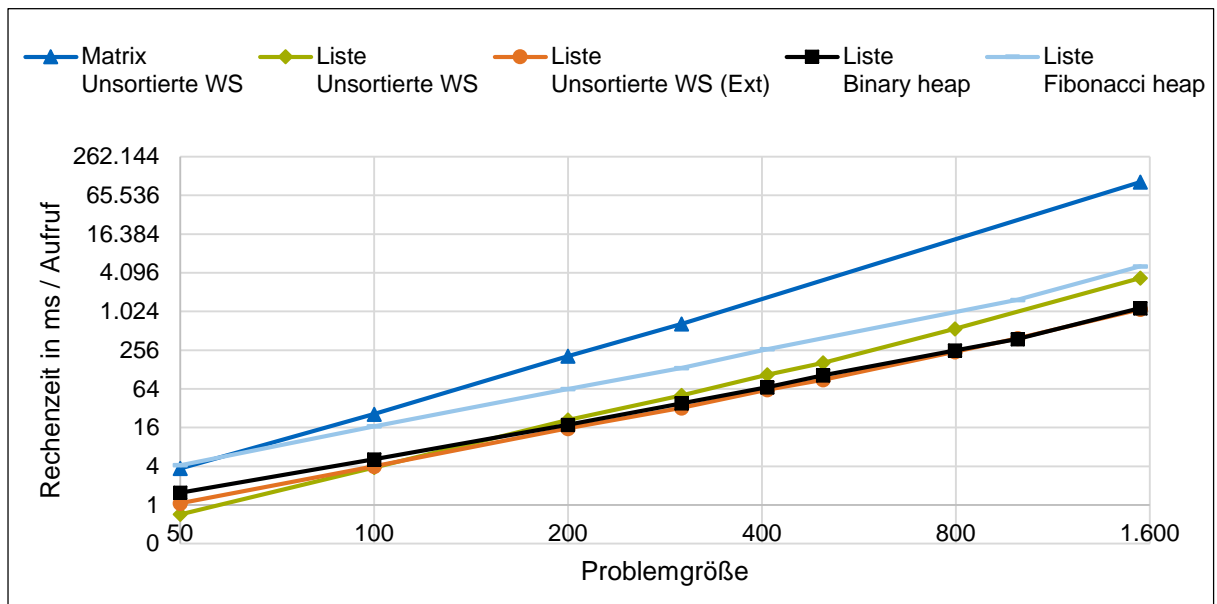


Abbildung A-1: Rechenzeitvergleich verschiedener Datenstrukturen für den Dijkstra-Algorithmus

Anhang B Bewertung der Lösungsverfahren für das VRPTW

Tabelle B-1: Gegenüberstellung der VRPTW-Lösungsverfahren anhand der Mittelwerte der Instanzen R1 und RC1 der Solomon-Benchmarks für 100 Knoten (NV: Anzahl an Fahrzeugen, TD: Gesamtdistanz, TIME: Rechenzeit in s)

	R1			Bewertung		RC1			Bewertung	
	NV	TD	TIME	NV*TD	Δ Lösungsqualität	NV	TD	TIME	NV*TD	Δ Lösungsqualität
Beste bekannte Lösungen	11,9	1.210		14.423		11,5	1.384		15.918	
Tabu Search (vgl. [Tai-1997])	12,6	1.234	2.296	15.596	8,1 %	12,1	1.405	1.877	16.967	6,59 %
Variable Neighborhood Search (vgl. [Brä-2003])	12,0	1.229	7.542	14.754	2,3 %	11,5	1.394	6.231	13.034	0,7 %
Simulated Annealing RVNS(1) (vgl. [Chi-1996])	12,7	1.306	145	16.538	14,7 %	12,5	1.474	117	18.426	15,8 %
GRASP (vgl. [Kon-1995])	12,6	1.325	73	16.701	15,8 %	12,6	1.501	73	18.912	18,8 %
Genetische Algorithmen (vgl. [Ber-2004])	12,1	1.288	120	15.563	7,9 %	11,9	1.456	120	17.303	8,7 %
Scatter Search (vgl. [Rus-2006])	12,1	1.208	2.387	15.193	1,6 %	11,5	1.386	2.625	16.194	0,1 %
Partikelschwarmoptimierung (vgl. [Gon-2012])	13,0	1.263	1.649	16.892	16,2 %	12,7	1.401	1.526	17.994	11,9 %
Ameisenalgorithmen (vgl. [Gam-1999])	12,4	1.213	600	15.021	4,2 %	12,1	1.380	600	16.675	4,8 %
Maschinelles Lernen (vgl. [Hag-2009])	13,3	1.184		16.295	9,7 %					

Anhang C Layouts der Transportnetzwerke

Rundkurs

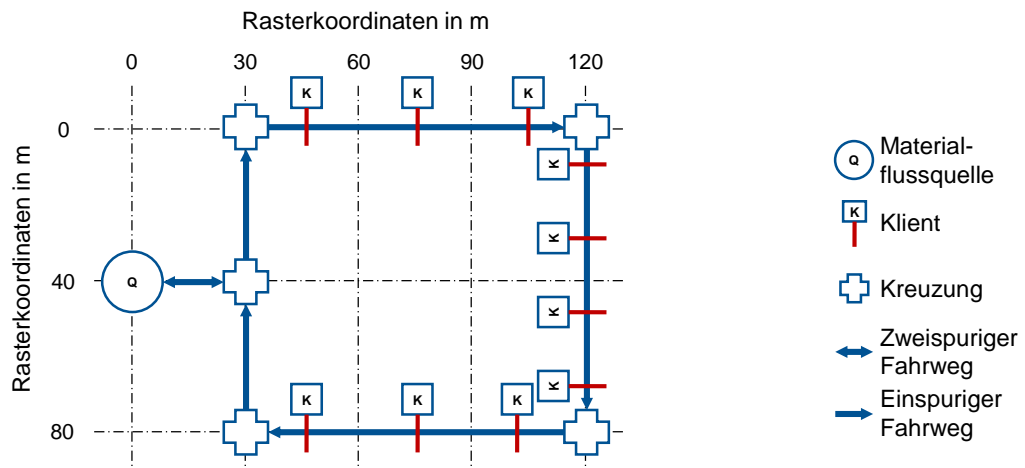


Abbildung C-1: Layout Rundkurs mit 10 Klienten

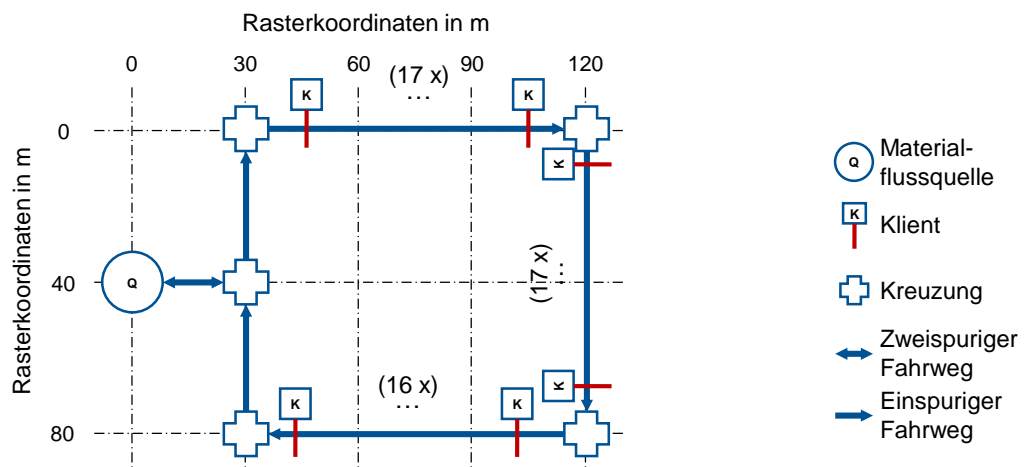


Abbildung C-2: Layout Rundkurs mit 50 Klienten

Montage

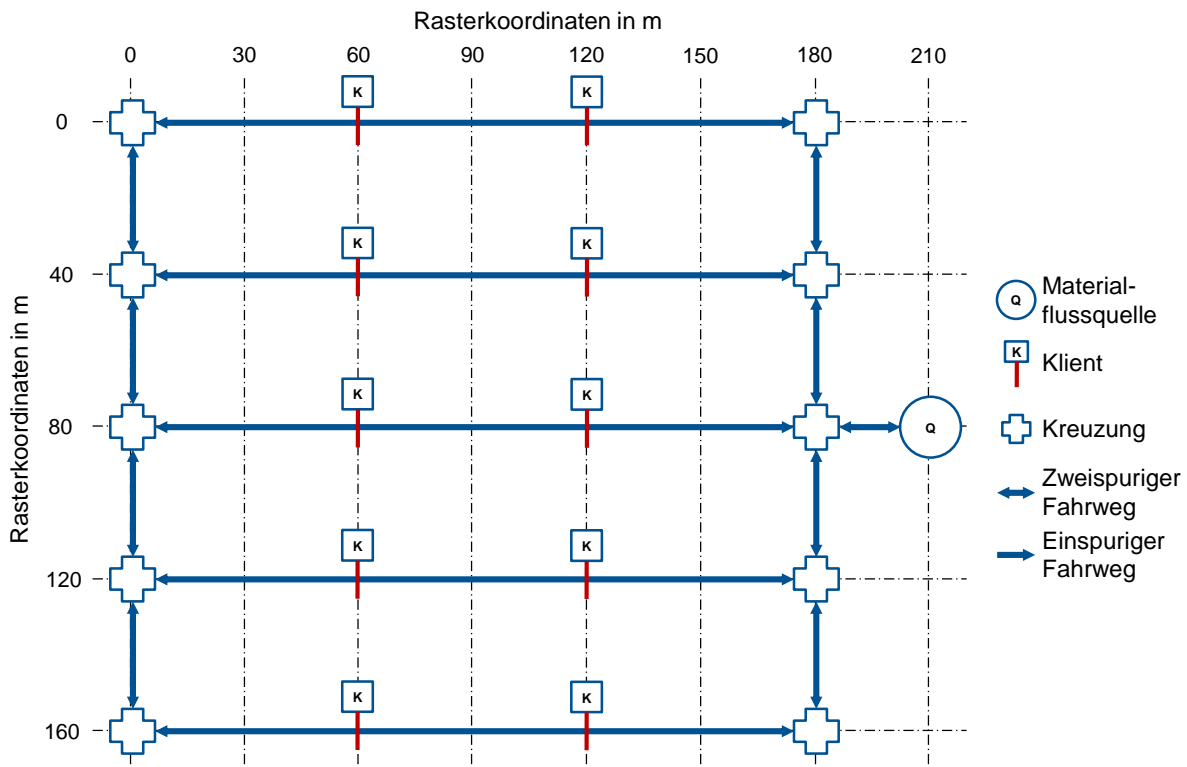


Abbildung C-3: Layout Montage mit 10 Klienten

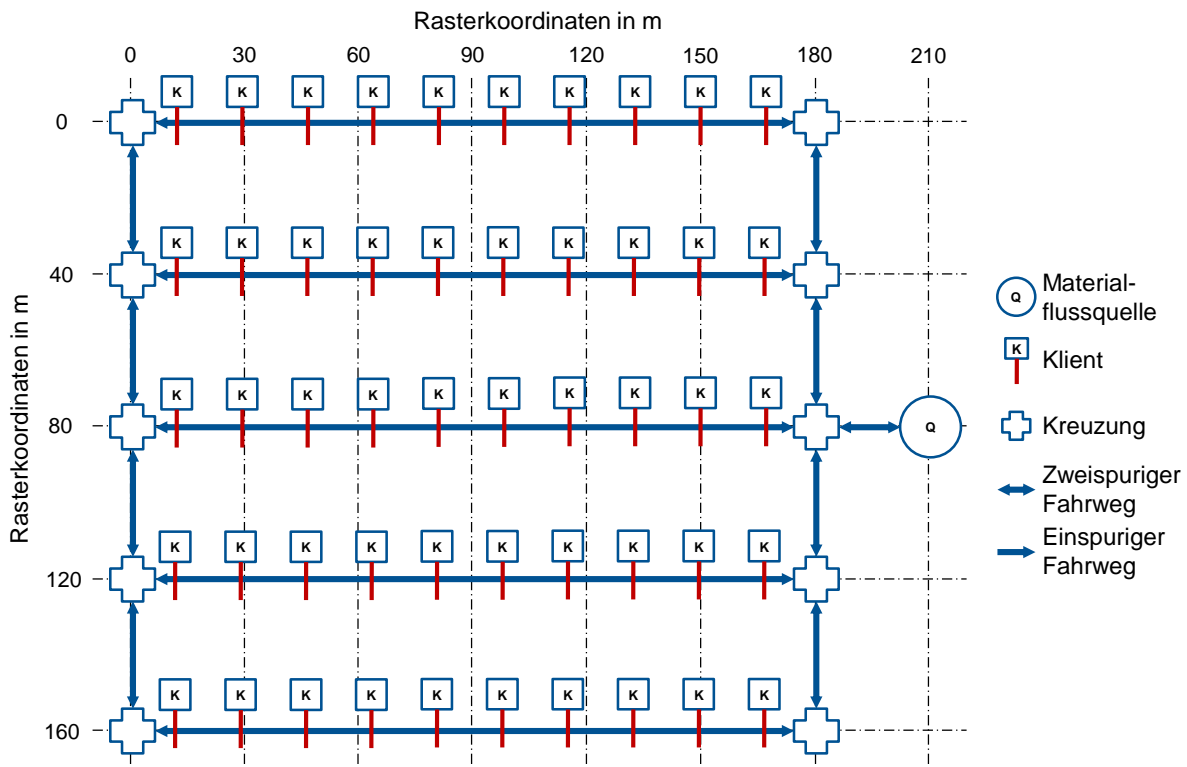


Abbildung C-4: Layout Montage mit 50 Klienten

Werkstatt

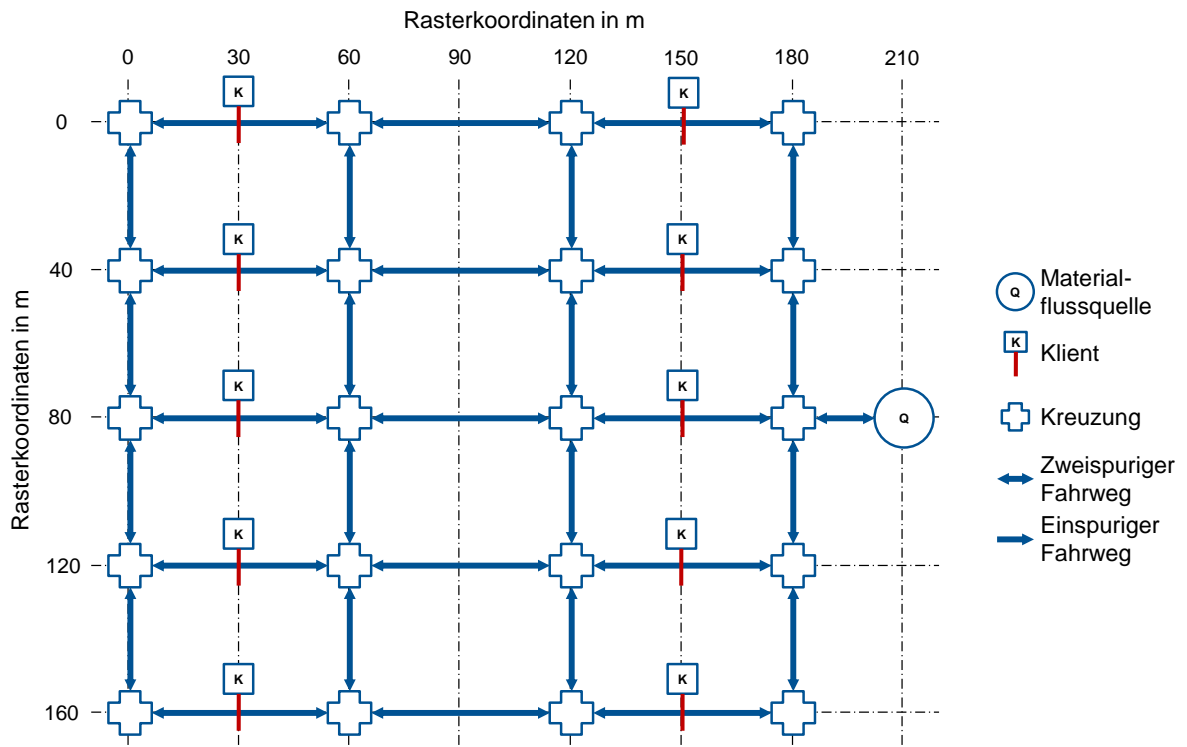


Abbildung C-5: Layout Werkstatt mit 10 Klienten

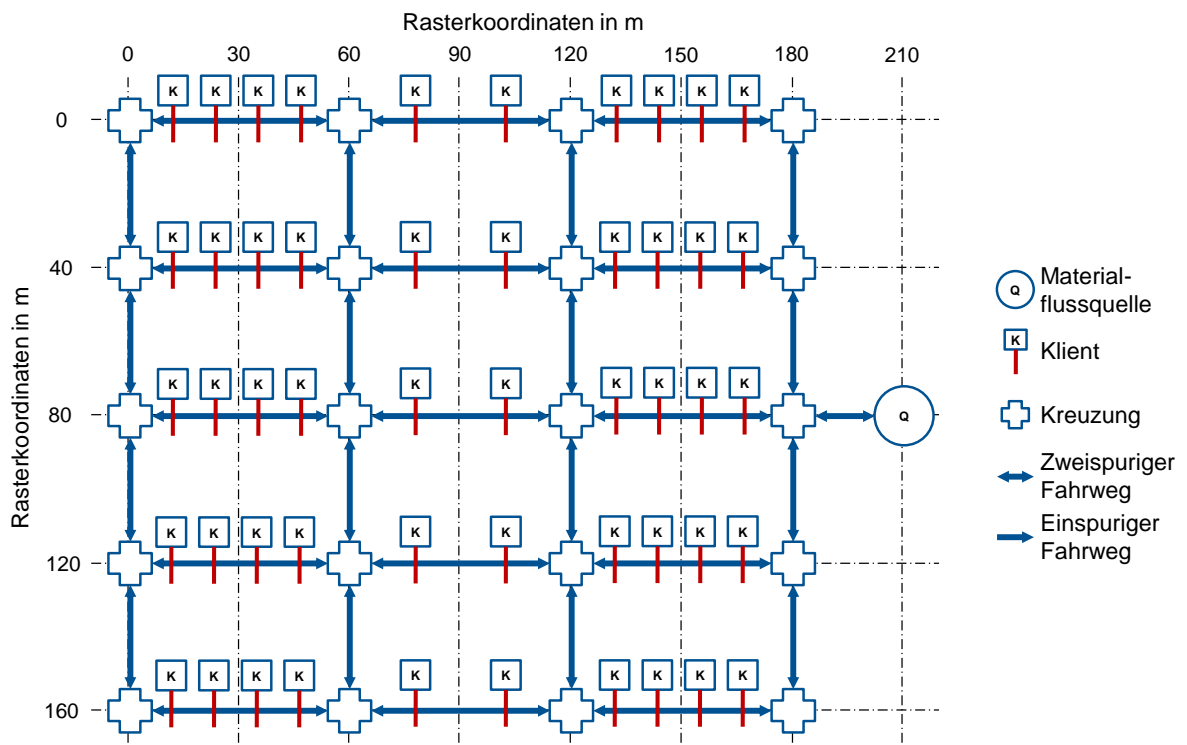


Abbildung C-6: Layout Werkstatt mit 50 Klienten

Anhang D Parametrisierung der Cluster-Grenzwerte

Tabelle D-1: Grenzwerte $\lambda_{max}/\lambda_{system}$ und $t_{F,max}$ der Clusterbildung in Abhängigkeit der Ausprägungen des Routenzugsystems

Layout	Anzahl Klienten	Systemlast	$\lambda_{max}/\lambda_{system}$	$t_{F,max}$ in s
Rundkurs	Niedrig	Niedrig	1,0	3.600
		Mittel	1,0	3.600
		Hoch	1,0	3.600
	Hoch	Niedrig	1,0	3.600
		Mittel	1,0	3.600
		Hoch	1,0	3.600
Montage	Niedrig	Niedrig	1,0	3.600
		Mittel	0,4	600
		Hoch	0,4	3.600
	Hoch	Niedrig	0,4	600
		Mittel	0,6	3.600
		Hoch	1,0	3.600
Werkstatt	Niedrig	Niedrig	1,0	3.600
		Mittel	0,4	3.600
		Hoch	0,2	3.600
	Hoch	Niedrig	0,2	3.600
		Mittel	0,6	1.200
		Hoch	1,0	3.600

Anhang E Selbstkalibrierung des MACS

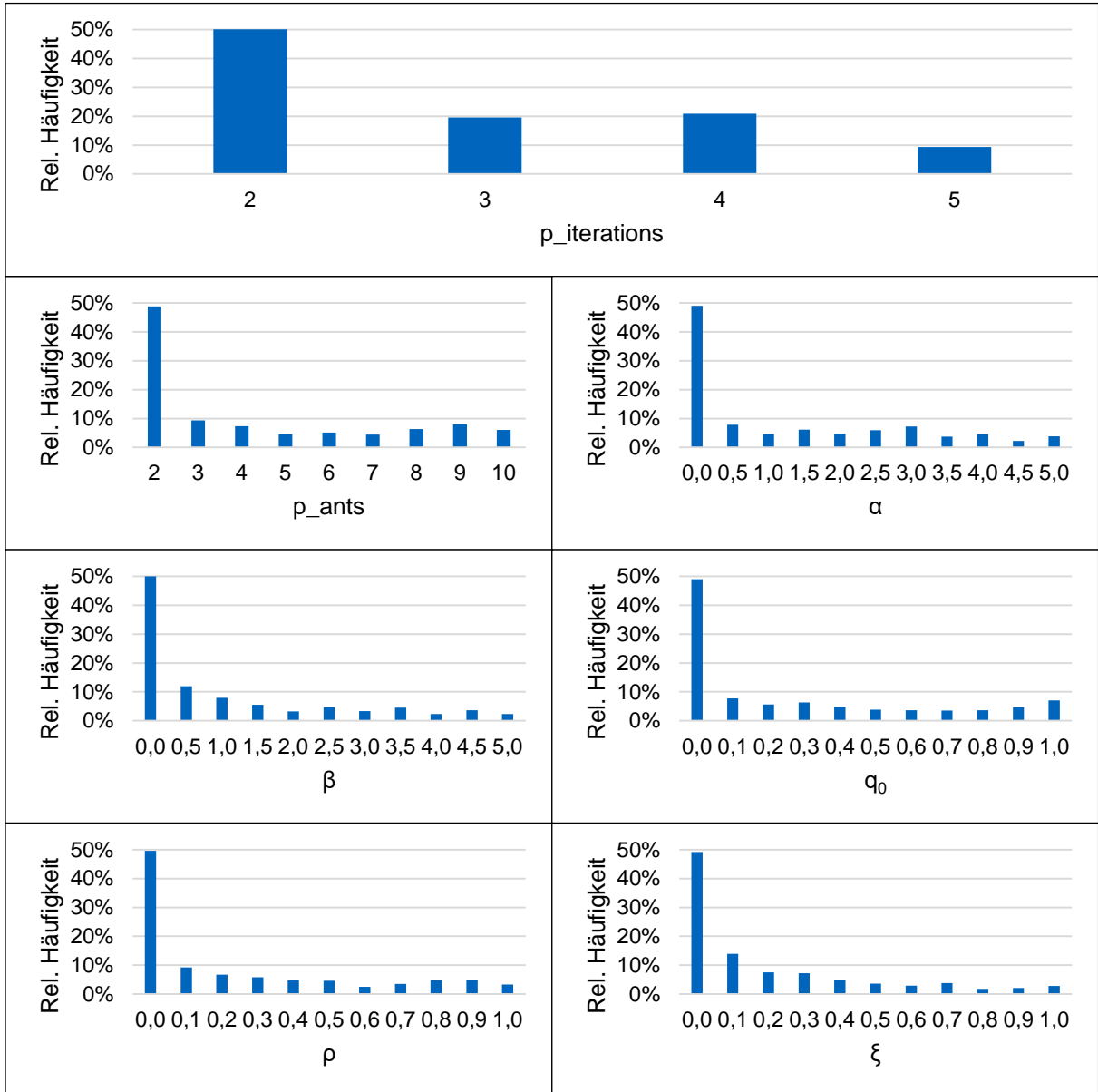


Abbildung E-1: Häufigkeitsverteilungen der Parameterwerte nach der Selbstkalibrierung des MACS durch 177.245 Kalibrierungsläufe

Anhang F Exkurs zu Intratour: Reihenfolge, Weg

Die Optimierung der Bearbeitungsreihenfolge sowie des Fahrwegs einer Tour während der Durchführung dieser Tour zielt darauf ab, den Verkehrsfluss im Routenzugsystem zu verbessern. In Abschnitt 6.2.6 wurden dazu drei Modulausprägungen vorgestellt. Bei der ersten werden die Staus im Transportnetzwerk in einer Historie gespeichert. Für jedes Wegstück, das durch einen Stau betroffen war, werden erhöhte Kosten bei der Planung der Touren berücksichtigt. Die zweite Ausprägung verarbeitet Informationen zur aktuellen Stausituation und zu den prognostizierten Hindernissen, die durch bereitstellende Routenzüge in einem kurzfristigen Horizont entstehen. Bei der dritten Ausprägung wird für jedes Wegstück eine Flussrate, die die relative Verkehrsbelastung beschreibt, bestimmt. Je höher die Flussrate ist, desto wahrscheinlicher wird das Wegstück bei zukünftigen Touren vermieden.

Die Kosten, die zur Bestimmung der Reihenfolge einer Tour und zur Wegfindung verwendet werden, setzen sich dann aus einem statischen Anteil, der die Weglänge und die durchschnittliche Geschwindigkeit der Routenzüge berücksichtigt, sowie einem dynamischen Anteil, der sich gemäß der oben beschriebenen Ausprägungen bestimmt, zusammen. Durch einen Faktor kann der dynamische Anteil in jeder Ausprägung innerhalb der Kosten gewichtet werden. Um den Einfluss der Gewichtung der dynamischen Kosten auf die Effizienz des Routenzugsystems zu beurteilen, sind in Abbildung F-1 für jede Ausprägung die Haupteffekte auf den WIP sowie die Anzahl der Züge in Abhängigkeit der Gewichtungparameter dargestellt²⁵. Die Gewichtungparameter variieren zwischen 0,5, 1 und 2. Eine Gewichtung von eins bedeutet eine gleiche Gewichtung von statischen und dynamischen Kosten. Eine doppelte Gewichtung erhöht die Bedeutung der dynamischen Anteile an den Plankosten. Zur Ermittlung der Haupteffekte werden nur Szenarien betrachtet, für die alle Werte eines Gewichtungsparmeters eine robuste Produktionsversorgung ermöglichen.

Je höher der Anteil der berücksichtigten historischen Staukosten ist, desto mehr Ressourcen werden zur Produktionsversorgung benötigt. Ein Faktor von 0,5 erzielt die besten Ergebnisse in den Untersuchungen für dieses Prinzip. Der gleiche Trend gilt für die Verwendung der aktuellen und prognostizierten Stillstandzeiten. Auch hier ergibt der Faktor 0,5 die effizienteste Materialbereitstellung. Beim Einsatz der

²⁵ Das zugrundeliegende Szenario ist: Layout: Werkstatt; Ladungsträgerart, Prozess und Anhängertechnik: GLT – TW Ent.; Anzahl Klienten: Hoch; Routenzuglänge: Kurz, Steuerungsstrategie: S18. Die Experimente werden für unterschiedliche Gesamtdurchsätze sowie unterschiedliche Variationskoeffizienten der Zwischenabruflzeiten mit ein bis zwanzig Zügen durchgeführt.

Flussrate reduziert ein höherer Faktor hingegen den Ressourcenbedarf. Der Faktor 2 erreicht in den Experimenten die größte Einsparung.

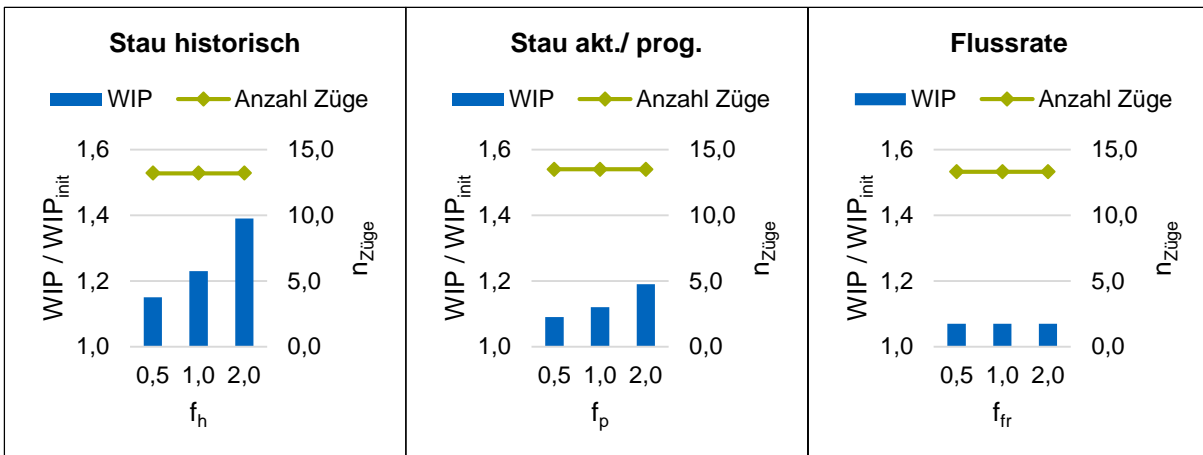


Abbildung F-1: Haupteffekte der Gewichtung der dynamischen Kostenanteile auf den WIP und die Anzahl an Zügen je Ausprägung der Intratouroptimierung

Für jede Ausprägung der Intratouroptimierung wird im Folgenden die beste der oben beschriebenen Parametrisierungen ausgewählt. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Effizienz der Materialbereitstellung sind in Abbildung F-2 dargestellt. Wiederum werden nur Szenarien betrachtet, für die alle Ausprägungen eine robuste Produktionsversorgung ermöglichen.

Im Vergleich zu Materialbereitstellung ohne die Berücksichtigung von dynamischen Kosten führen alle drei Prinzipien zu einem ineffizienteren Routenzugsystem, da ein höherer Umlaufbestand zur robusten Produktionsversorgung notwendig ist. Die Verwendung der Flussrate erreicht noch die besten Ergebnisse der dynamischen Prinzipien.

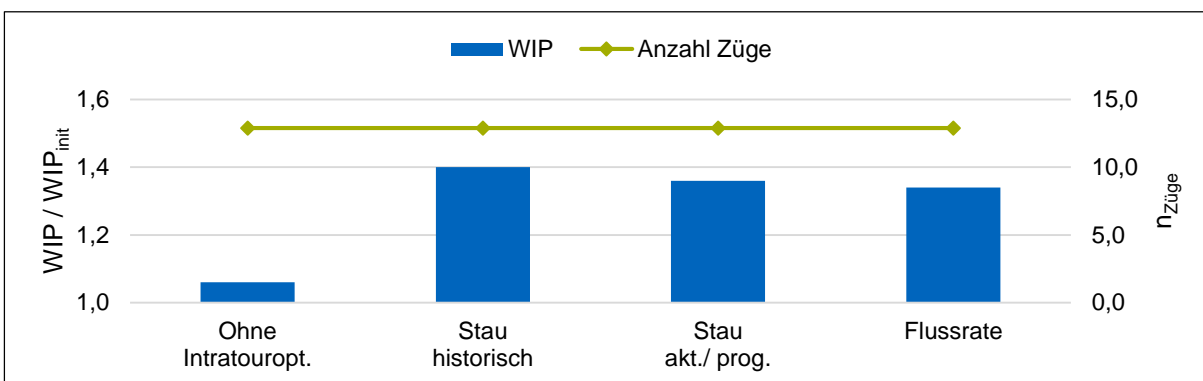


Abbildung F-2: Haupteffekte der Ausprägungen der Intratouroptimierung auf den WIP und die Anzahl der Züge im Routenzugsystem

Die Auswirkungen der verschiedenen Ausprägungen der Intratouroptimierung auf den Verkehrsfluss sind in Abbildung F-3 beschrieben. Es wird ersichtlich, dass durch eine Berücksichtigung von dynamischen Kosten der Stau im Routenzugsystem minimal reduziert werden kann. Dennoch führt die leichte Verbesserung des Verkehrsflusses im Mittel nicht zu einer effizienteren Produktionsversorgung, da längere Wege gefahren werden müssen. Wie im Straßenverkehr kann eine Tolerierung von Stau daher auch in der innerbetrieblichen Produktionsversorgung zu einer schnelleren Zielerreichung führen als das aufwendige Umfahren auf längeren Nebenrouten.

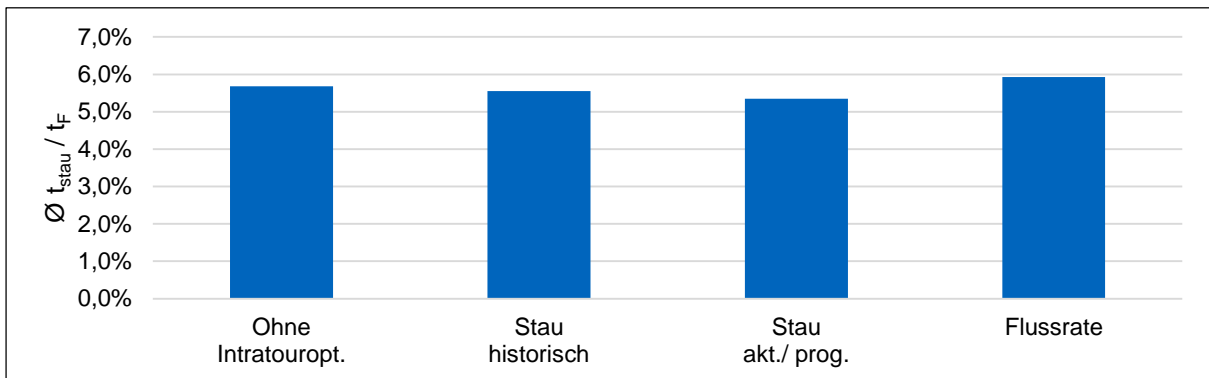


Abbildung F-3: *Haupteffekte der Ausprägungen der Intratouroptimierung auf den Stauzeitanteil an der gesamten Fahrtzeit je Tour im Routenzugsystem*

Anhang G Generische Simulationsumgebung für Routenzugsysteme

Zur Evaluation der Steuerungsstrategien im Hinblick auf die Routenzugreferenzsysteme wird in dieser Arbeit die ereignisdiskrete Simulation verwendet. Die Modellierung einzelner Routenzugsystembestandteile wurde in Kapitel 5 erläutert. Im Folgenden wird der Aufbau der entwickelten generischen Simulationsumgebung für Routenzugsysteme beschrieben (siehe Abbildung G-1).

Das Kernelement der Simulationsumgebung ist ein Plant Simulation Modell. Über .txt- sowie comObject-Schnittstellen werden einerseits Daten an das Modell übergeben. Andererseits werden Daten aus dem Modell exportiert oder simulationsrelevante Programme gestartet.

Über eine Excel-basierte Eingabedatei können zum einen individuelle Layouts durch die Angabe von Kreuzungspositionen, Verbindungskanten sowie Quellen und Senken an das Plant Simulation Modell übermittelt werden. Zum anderen können Technik- und Prozessparameter sowie Randbedingungen des Routenzugsystems definiert werden. Ebenfalls Excel-basiert erfolgt die Definition des Versuchsplans inkl. der Faktoren und Experimente. Zu Beginn eines Versuchs mit mehreren Experimenten und Beobachtungen erfolgt die automatische Konfiguration des Plant Simulation Modells auf Basis des in Excel angelegten Versuchsplans.

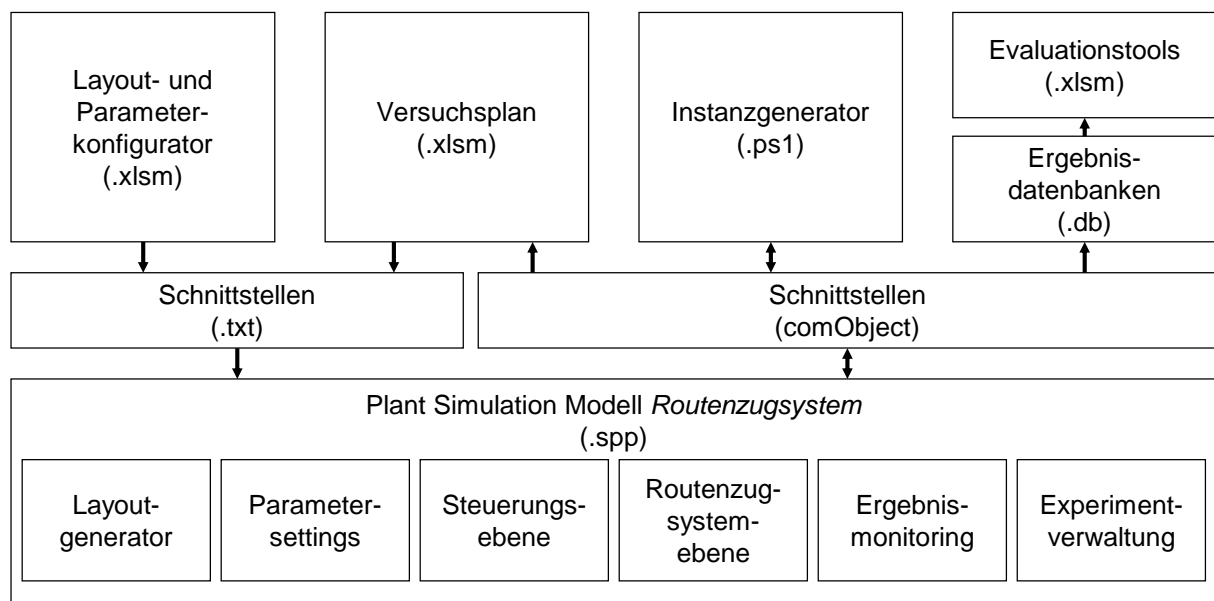


Abbildung G-1: Schematischer Aufbau der generischen Simulationsumgebung für Routenzugsysteme

Nach jeder Beobachtung eines Experiments werden die Daten des Ergebnismonitors automatisch in SQLite-Datenbanken exportiert. Diese können im Anschluss automatisiert ausgelesen und mittels verschiedener Excel-basierter Tools in Bezug zueinander bewertet werden.

Um mehrere Experimente eines Versuchsplans parallel auszuführen und somit Rechenzeit einzusparen, wird ein in Powershell implementierter Instanzgenerator verwendet. Dieser teilt den Versuchsplan beim Simulationsstart automatisch auf eine vordefinierte Anzahl an Instanzen auf. Je nach Einstellung werden die Instanzen automatisch oder manuell auf mehrere Rechner verteilt. Die Simulationsläufe einer Instanz starten automatisch bei deren Aufruf. Im Vergleich zur in Plant Simulation integrierten verteilten Simulation gehen dadurch keine Ergebnisse einzelner Simulationsläufe aufgrund eines Netzwerkkommunikationsfehlers verloren. Zudem werden evtl. auftretende Simulationsfehler sichtbar und v. a. nachvollziehbar. Des Weiteren kann die Funktionsfähigkeit eines Simulationslaufs eindeutig verifiziert werden.

Das Plant Simulation Modell selbst ist in sechs Bereiche unterteilt. Über den Layoutgenerator werden die vordefinierten und importierten Layoutinformationen automatisch in ein lauffähiges Modell übersetzt. Dadurch können in einem Versuchsplan unterschiedliche Layouts simuliert werden. Zudem wird ein geringer Speicherplatzbedarf des Simulationsmodells ermöglicht. In den Parametersettings werden die importierten Technik- und Prozessparameter sowie Randbedingungen des Routenzugsystems für Plant Simulation übersetzt. Vorab getroffene Einstellungen können zudem angepasst werden. Insgesamt lassen sich über 200 Parameter mit bis zu 18 Stufen einstellen. In der Steuerungsebene sind einerseits die Nachschubsteuerung und andererseits die entwickelten Steuerungsstrategien sowie deren Algorithmen implementiert. Die Steuerungsstrategien sind modular aufgebaut, so dass einzelne Algorithmen flexibel ausgetauscht werden können. Auf der Routenzugsystemebene werden die statischen und beweglichen Objekte des physischen Routenzugsystems visualisiert. Diese werden auf Grundlage der vorab definierten Parameter automatisch erzeugt. In Abbildung G-2 sind beispielhafte Ausschnitte aus der Routenzugsystemebene dargestellt. Neben den wesentlichen Elementen des Transportnetzwerks (1) sind eine Beladung an der Materialflussquelle (2) sowie die Fahrt eines Routenzugs durch eine Kreuzung (3) veranschaulicht. Im Ergebnismonitoring werden schließlich alle Daten und Kennzahlen, die während eines Simulationslaufs entstehen, in Tabellen und Variablen gespeichert. In der Experimentverwaltung werden zuletzt die importierten Layout- und Parameterkonfigurationen für jedes Experiment des Versuchsplans zwischengespeichert. Dadurch wird die Anzahl der Schnittstellen, die während eines Simulationslaufs aufgerufen werden müssen, reduziert.

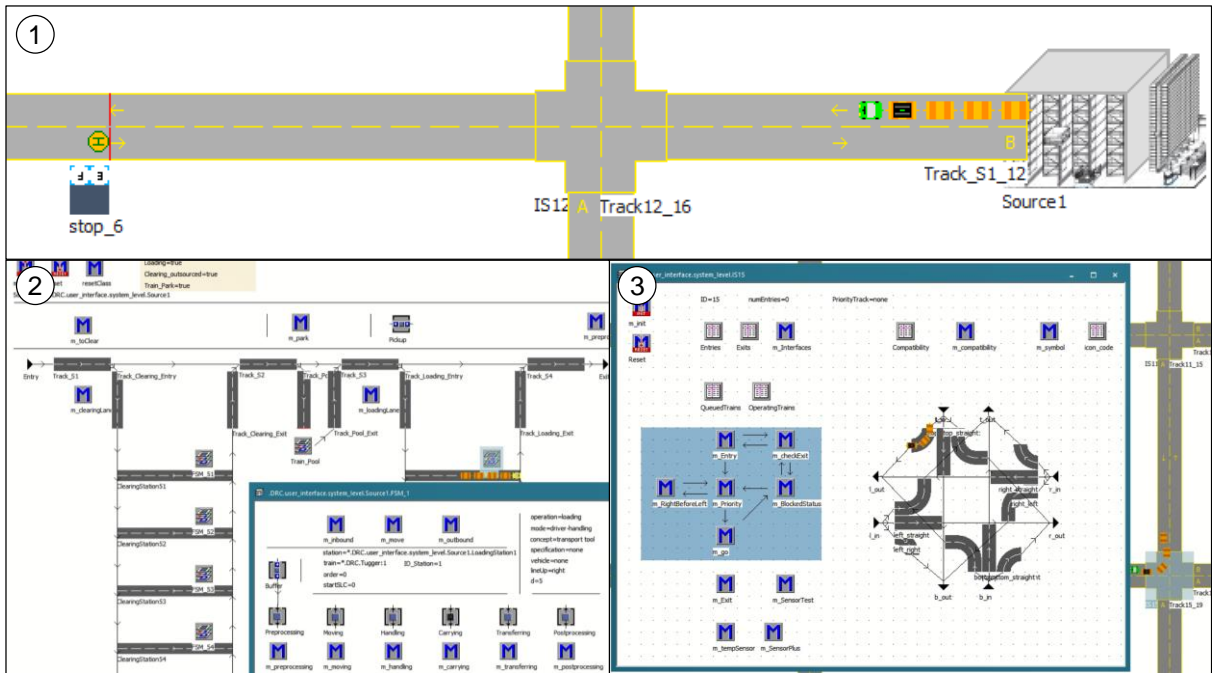


Abbildung G-2: Beispielhafte Ausschnitte aus der Routenzugsystemebene im Simulationsmodell

Anhang H Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Systemausprägungen

WIP-Bereich 25 %

Tabelle H-1: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 25 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																		
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
Lay-out	Rundkurs	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-	-	-	-	
	Montage	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	
	Werkstatt	↓	↓	-	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	-	↑	↑	
Anzahl Klienten	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	↓	↓	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
Systemlast	Niedrig	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Mittel	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
Schwankungen der ZAZ der Klienten	Keine	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Niedrig	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	
Ladungsträgerart	GLT	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑	
	KLT	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	↑	↑	
Prozess und Anhängertechnik	GLT	SK Int. (LM)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		SK Int. (RZF)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	-	↑	↑
		TW Ent.	↓	↓	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	↑
		TW Int.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
	KLT	TW Ent.	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-
		TW Int.	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑
Routenzuglänge	Kurz	↓	↓	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Lang	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	

WIP-Bereich 50 %

Tabelle H-2: *Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 50 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich*

		Steuerungsstrategie																		
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
Layout	Rundkurs	↓	↓	↓	↓	↑	↑	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Montage	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↑	
	Werkstatt	↓	↓	-	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	-	↑	↑	
Anzahl Klienten	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
Systemlast	Niedrig	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Mittel	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
Schwankungen der ZAZ der Klienten	Keine	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	↓	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	
Ladungsträgerart	GLT	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	KLT	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-	
Prozess und Anhängertechnik	GLT	SK Int. (LM)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		SK Int. (RZF)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
		TW Ent.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
		TW Int.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	KLT	TW Ent.	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	↑
		TW Int.	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	-
Routenzuglänge	Kurz	↓	↓	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Lang	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	↑	-	

WIP-Bereich 75 %

Tabelle H-3: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 75 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																		
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
Layout	Rundkurs	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-	-	-	-		
	Montage	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑		
	Werkstatt	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	↑	↑		
Anzahl Klienten	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-		
	Hoch	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	↑	↑		
Systemlast	Niedrig	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-		
	Mittel	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑		
	Hoch	↓	-	↓	-	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	↓	↓	-	-	-		
Schwankungen der ZAZ der Klienten	Keine	↓	↓	↓	-	-	-	↑	↑	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-		
	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-		
	Hoch	↓	↓	-	-	-	↓	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	↑	↑		
Ladungsträgerart	GLT	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	KLT	↓	↓	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	-	-	-		
Prozess und Anhängertechnik	GLT	SK Int. (LM)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		SK Int. (RZF)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		TW Ent.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
		TW Int.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
	KLT	TW Ent.	↓	↓	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-
		TW Int.	↓	↓	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	-	-	-	-
Routenzuglänge	Kurz	↓	↓	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Lang	↓	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-	-	

WIP-Bereich 100 %

Tabelle H-4: Bewertung der Effizienzoptimalität der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen für den WIP-Bereich 100 %: (↑) überdurchschnittlich, (-) durchschnittlich, (↓) unterdurchschnittlich

		Steuerungsstrategie																		
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
Layout	Rundkurs	-	-	-	-	↑	↑	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Montage	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Werkstatt	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
Anzahl Klienten	Niedrig	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	
	Hoch	↓	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
Systemlast	Niedrig	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Mittel	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Hoch	↓	-	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	↓	↓	-	-	-	-	
Schwankungen der ZAZ der Klienten	Keine	↓	↓	-	-	-	-	↑	↑	-	-	↑	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Niedrig	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	
	Hoch	↓	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	↑	↑	↑	
Ladungsträgerart	GLT	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	↑	↑	
	KLT	↓	-	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-	
Prozess und Anhängertechnik	GLT	SK Int. (LM)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	↑	↑	↑	↑
		SK Int. (RZF)	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	-
		TW Ent.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑
		TW Int.	↓	↓	-	-	↓	-	-	↑	↓	-	-	↑	-	-	-	↑	↑	↑
	KLT	TW Ent.	↓	↓	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	↓	-	-
		TW Int.	↓	-	↓	-	↑	-	↑	-	↑	-	↑	-	-	-	↓	-	-	-
Routenzuglänge	Kurz	↓	↓	-	-	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	↑	↑	
	Lang	↓	↓	↓	↓	-	-	-	↑	-	-	-	↑	-	-	-	-	-	-	

Anhang I Effizienzpotentiale der Steuerungsstrategien

I.1 Haupteffekte der Steuerungsstrategien

WIP-Bereich 25 %

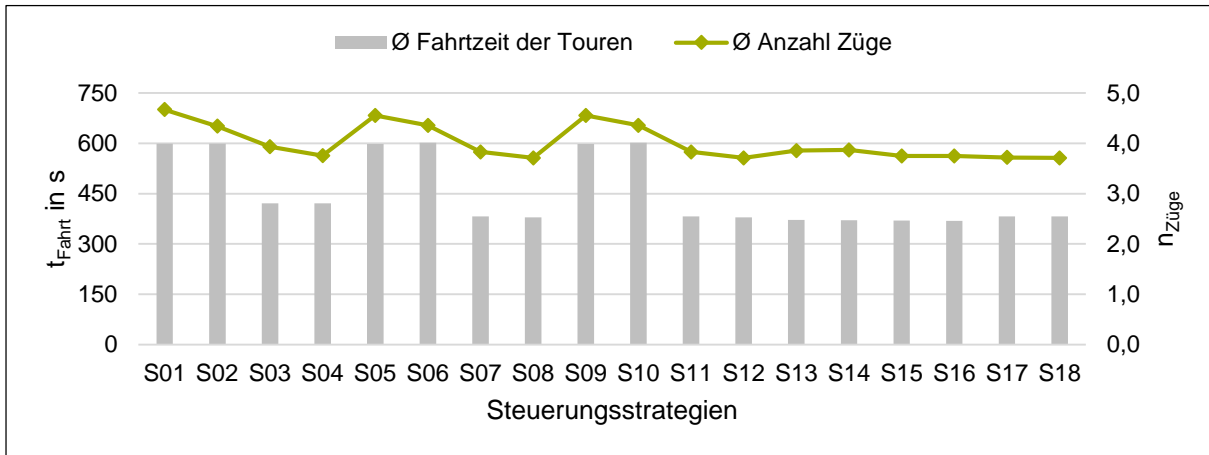


Abbildung I-1: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

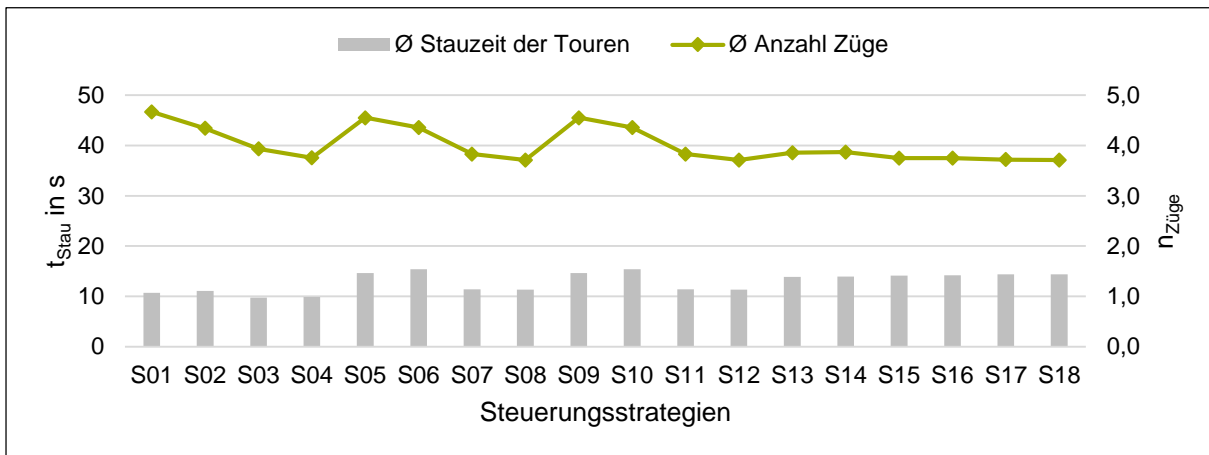


Abbildung I-2: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

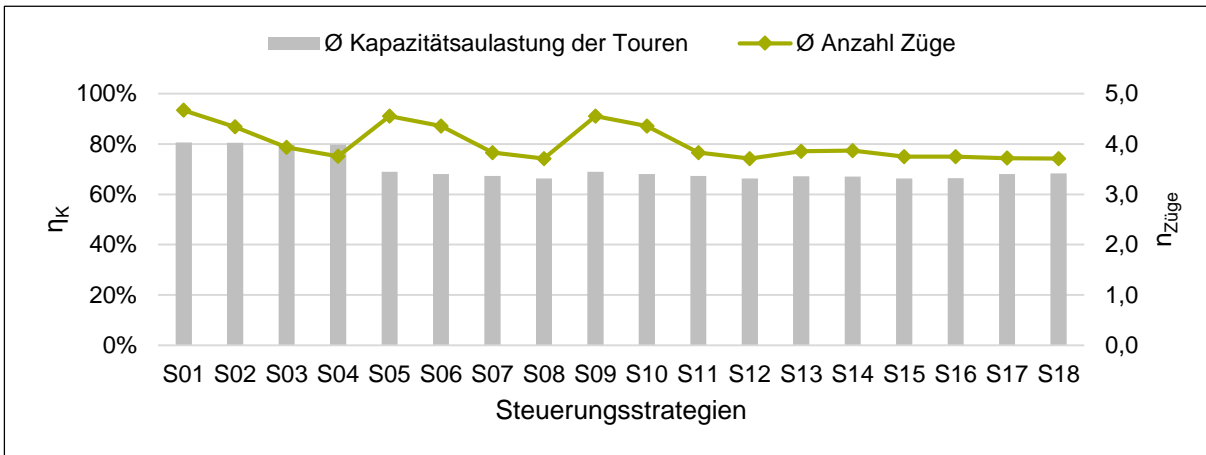


Abbildung I-3: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

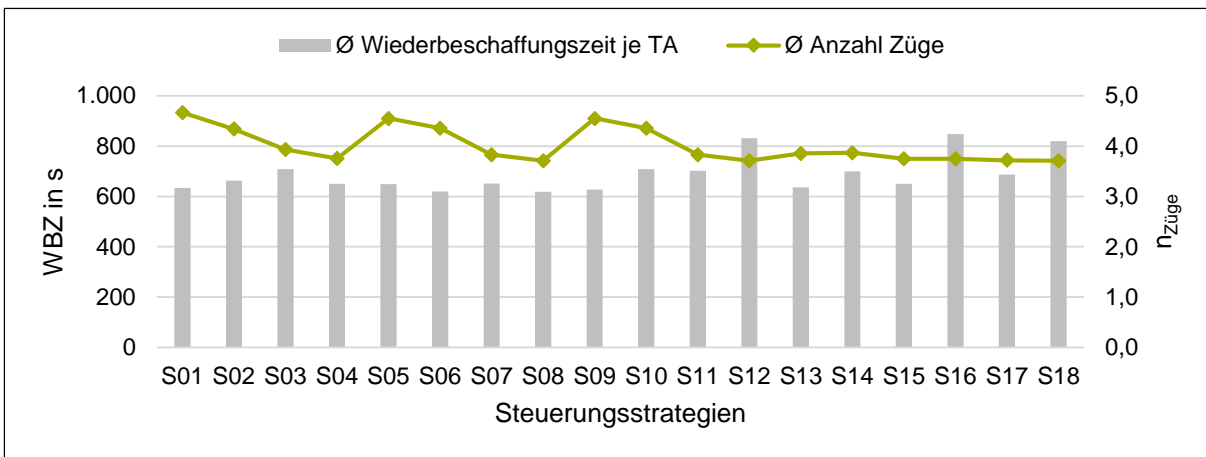


Abbildung I-4: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 25 %

WIP-Bereich 50 %

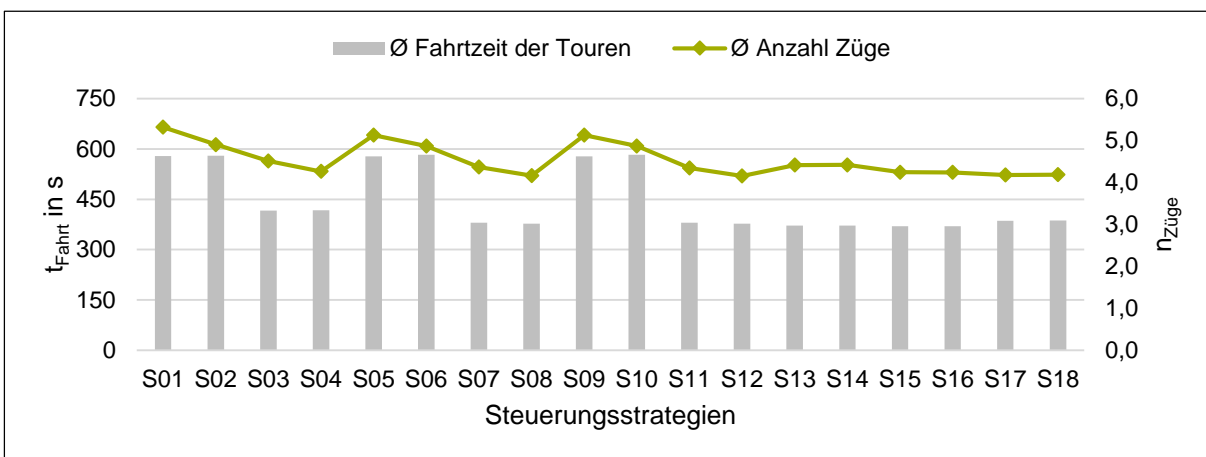


Abbildung I-5: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %

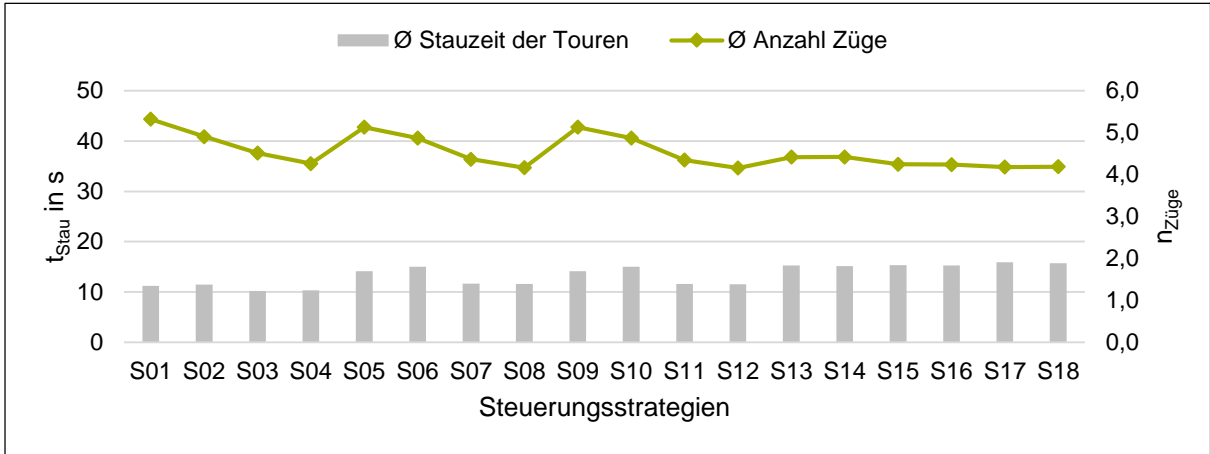


Abbildung I-6: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %

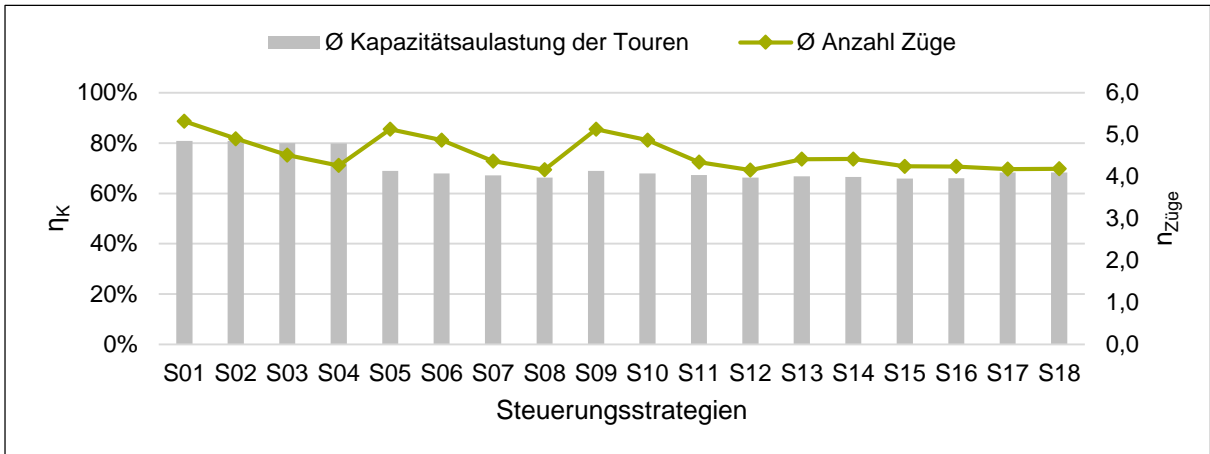


Abbildung I-7: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %

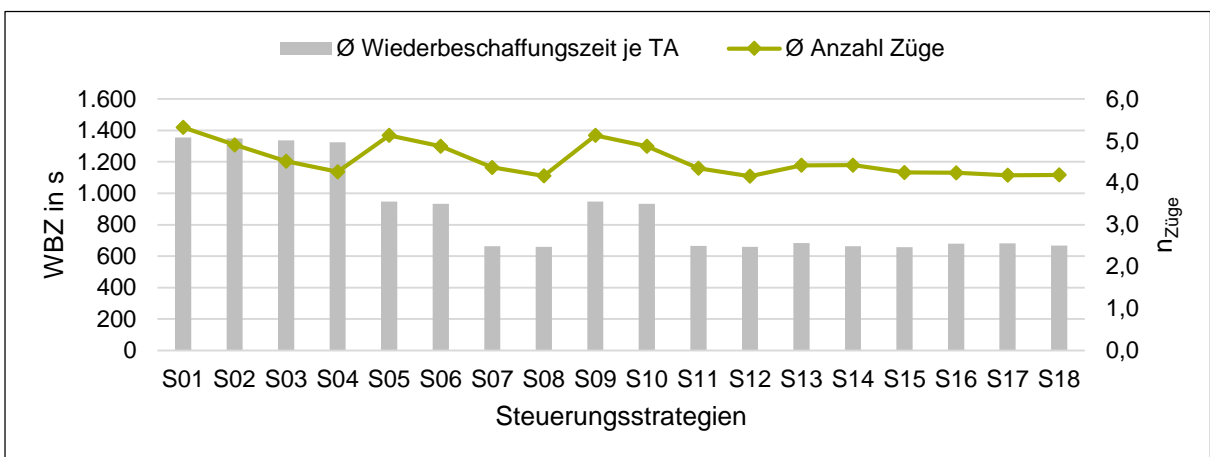


Abbildung I-8: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 50 %

WIP-Bereich 75 %

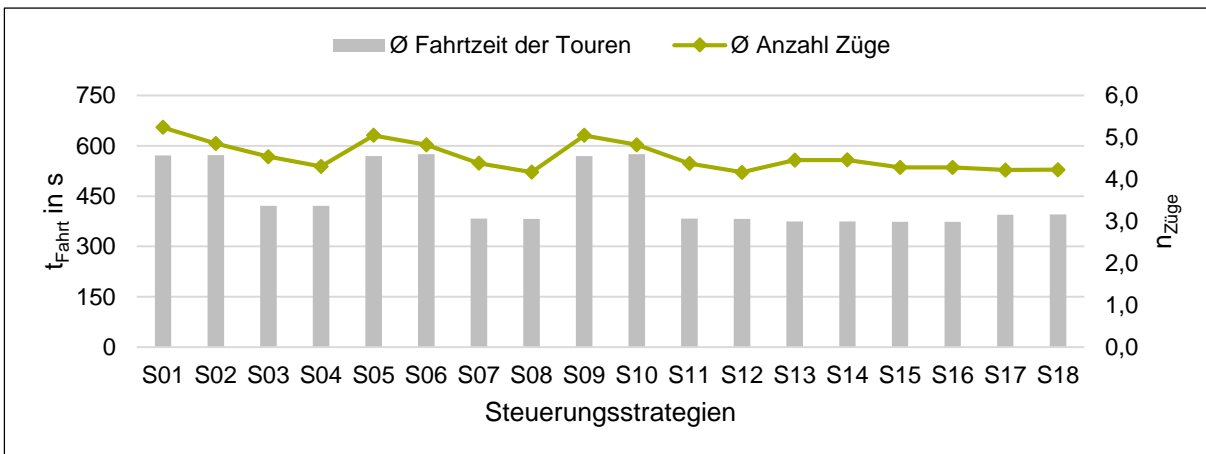


Abbildung I-9: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %

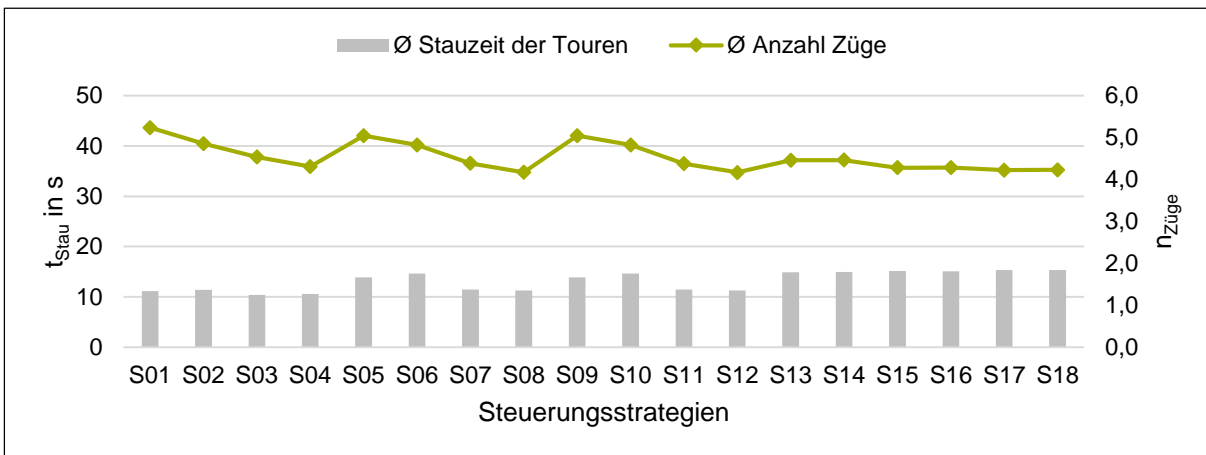


Abbildung I-10: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %

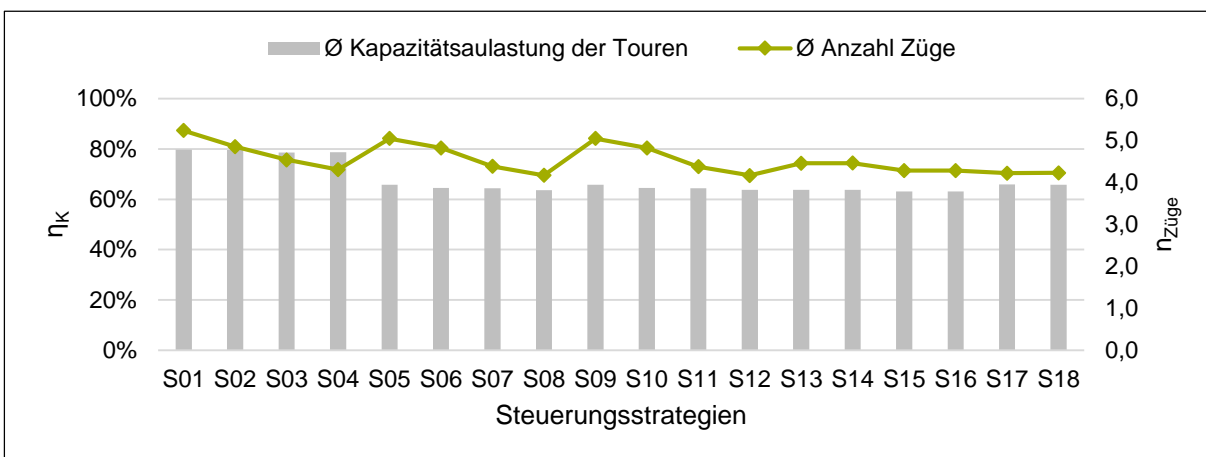


Abbildung I-11: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %

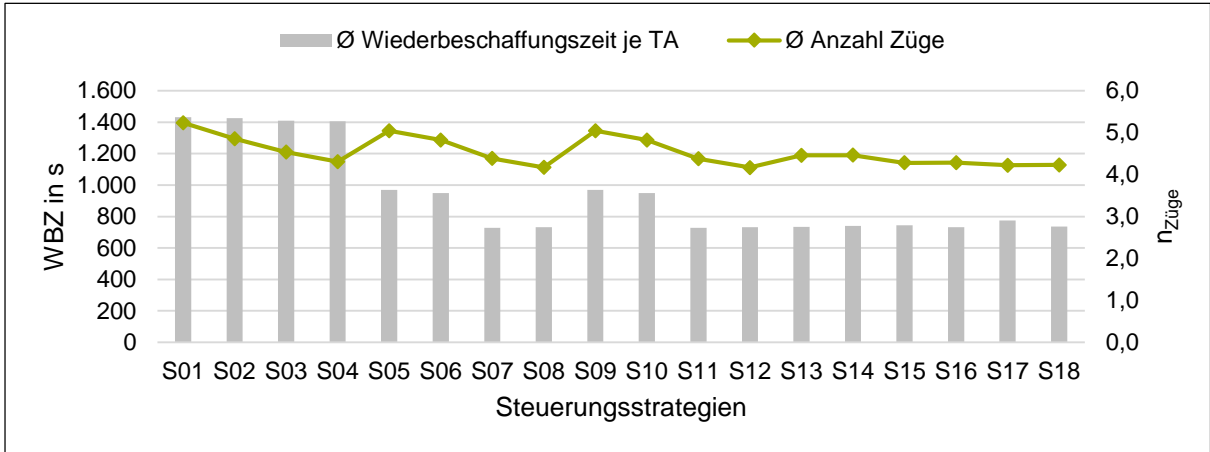


Abbildung I-12: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 75 %

WIP-Bereich 100 %

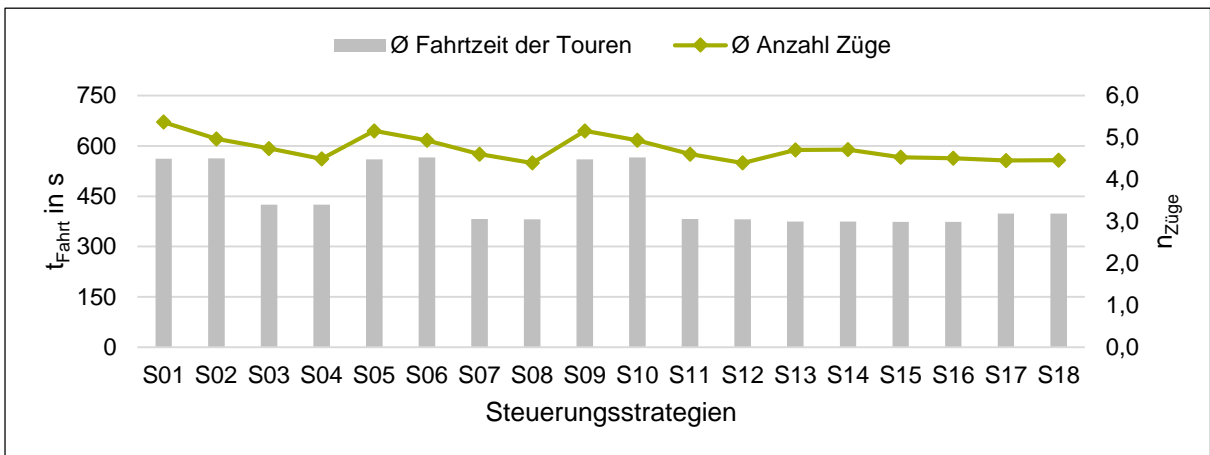


Abbildung I-13: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Fahrtzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %

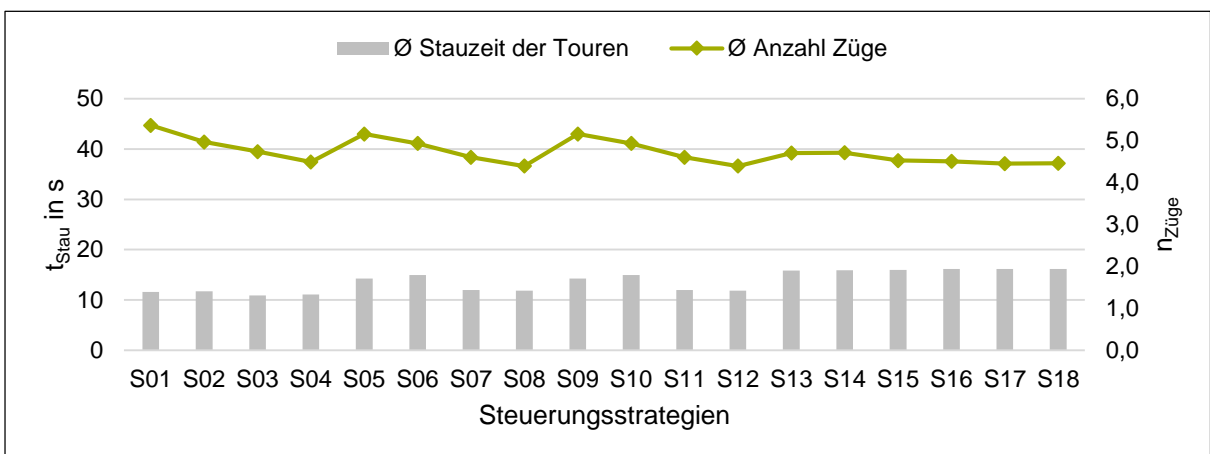


Abbildung I-14: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Stauzeit der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %

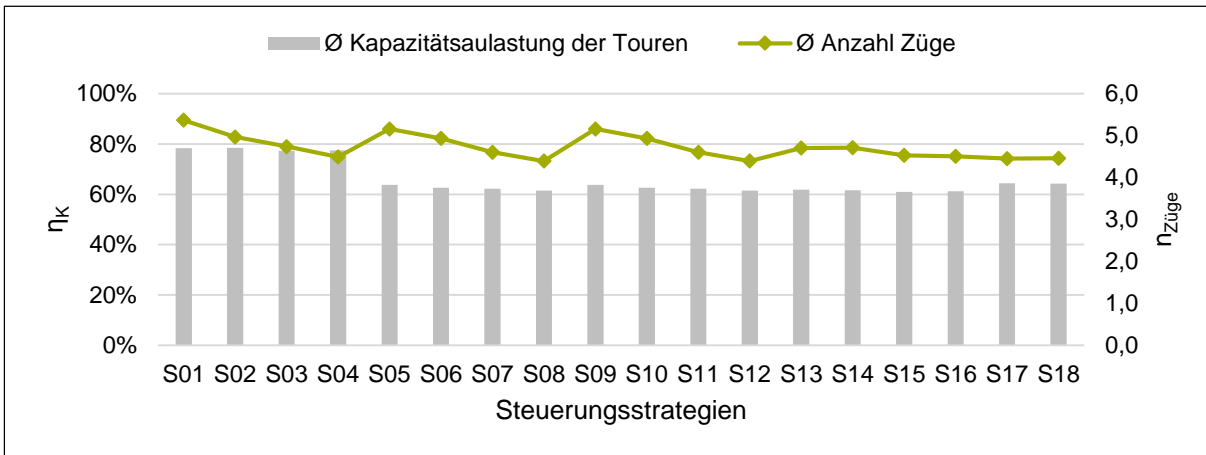


Abbildung I-15: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Kapazitätsauslastung der Touren im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %

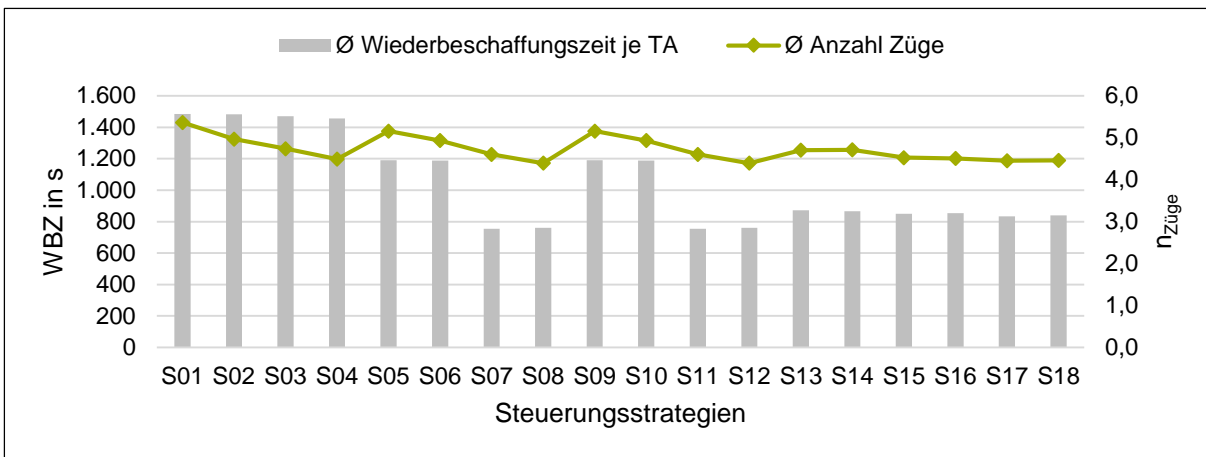


Abbildung I-16: Haupteffekte der Steuerungsstrategien auf die Wiederbeschaffungszeit der Transportaufträge im Vergleich zur Anzahl notwendiger Züge für den WIP-Bereich 100 %

I.2 Haupteffekte und ANOVA der Modulausprägungen

WIP-Bereich 25 %

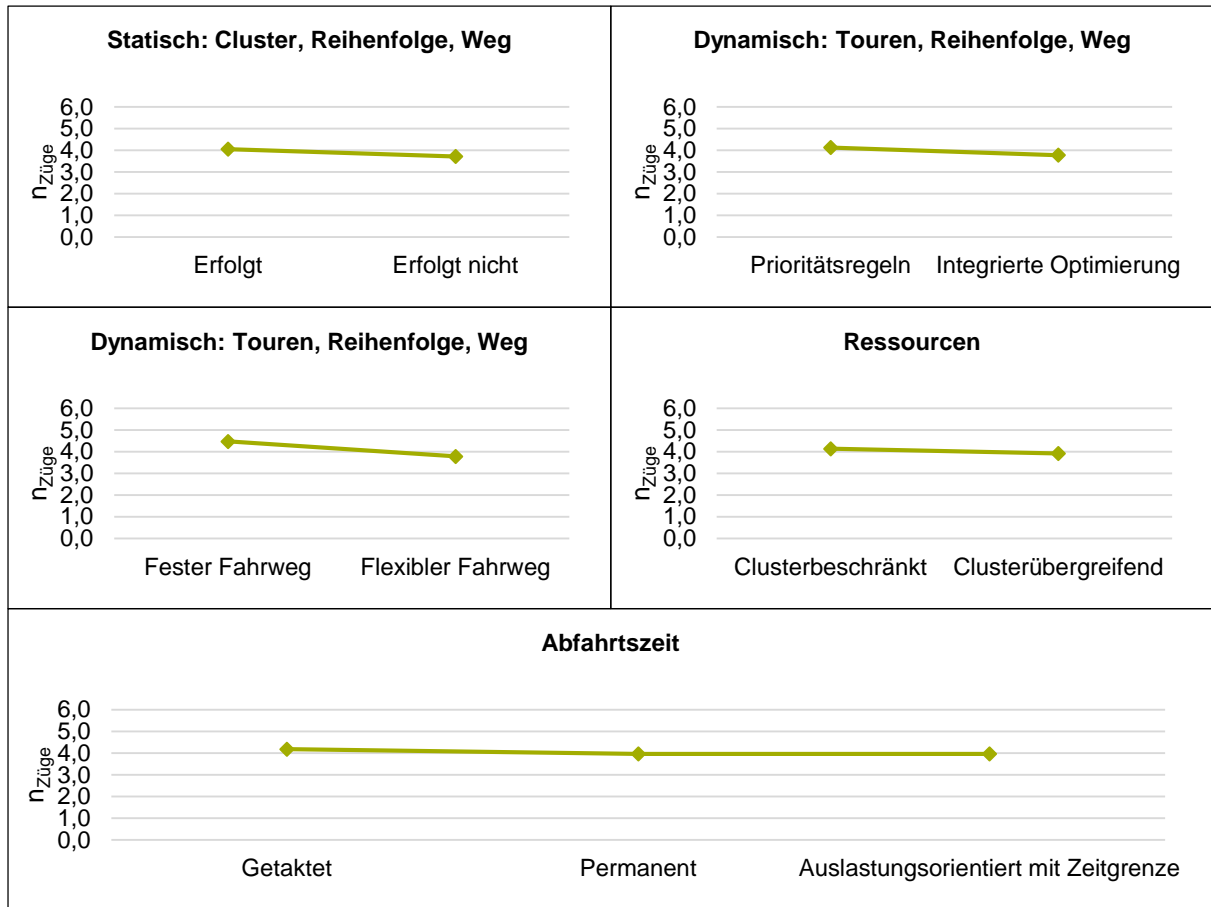


Abbildung I-17: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 25 %

Tabelle I-1: ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 25 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Erfolgt	4.176	16.918	4,05	13,60
Erfolgt nicht	522	1.939	3,71	10,92

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	52,60	1	52,60	3,95	0,047	2,71
Innerhalb der Gruppen	62.481,50	4.696	13,31			
Gesamt	62.534,10	4.697				

Tabelle I-2: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 25 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Prioritätsregeln	3.132	12.945	4,13	14,17
Integrierte Optimierung	1.566	5.912	3,78	11,53

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	133,74	1	133,74	10,06	0,0015	2,71
Innerhalb der Gruppen	62.400,36	4.696	13,29			
Gesamt	62.534,10	4.697				

Tabelle I-3: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 25 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Fester Fahrweg	1.566	7.002	4,47	16,26
Flexibler Fahrweg	3.132	11.855	3,79	11,69

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	491,51	1	491,51	37,20	1,15E-09	2,71
Innerhalb der Gruppen	62.042,59	4.696	13,21			
Gesamt	62.534,10	4.697				

Tabelle I-4: ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 25 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Clusterbeschränkt	2.088	8.638	4,13	15,08
Clusterübergreifend	2.610	10.219	3,92	11,88

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	56,99	1	56,99	4,28	0,039	2,71
Innerhalb der Gruppen	62.477,11	4.696	13,30			
Gesamt	62.534,10	4.697				

Tabelle I-5: ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 25 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Getaktet	1.044	4.359	4,18	14,44
Permanent	1.827	7.249	3,97	12,98
Auslastungsorien- tiert mit Zeitgrenze	1.827	7.249	3,97	13,00

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	34,99	2	17,49	1,31	0,27	2,30
Innerhalb der Gruppen	62.499,11	4.695	13,31			
Gesamt	62.534,10	4.697				

WIP-Bereich 50 %

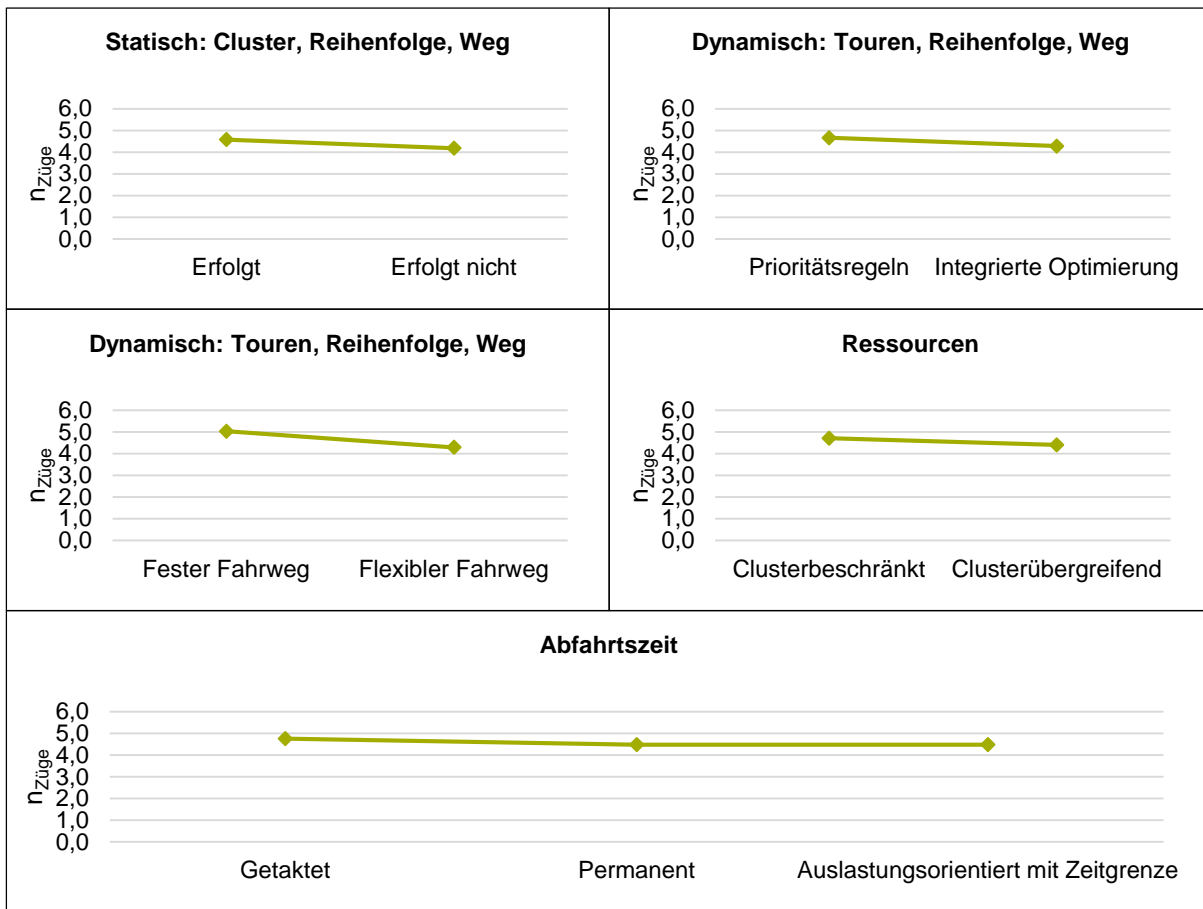


Abbildung I-18: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 50 %

Tabelle I-6: ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 50 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Erfolgt	5.296	24.294	4,59	16,87
Erfolgt nicht	662	2.771	4,19	13,13

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	94,83	1	94,83	5,76	0,016	2,71
Innerhalb der Gruppen	98.003,84	5.956	16,45			
Gesamt	98.098,67	5.957				

Tabelle I-7: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 50 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Prioritätsregeln	3.972	18.558	4,67	17,57
Integrierte Optimierung	1.986	8.507	4,28	14,16

Streuungsursache	Quadratsummen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	200,06	1	200,06	12,17	0,00049	2,71
Innerhalb der Gruppen	97.898,61	5.956	16,44			
Gesamt	98.098,67	5.957				

Tabelle I-8: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 50 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Fester Fahrweg	1.986	10.010	5,04	20,01
Flexibler Fahrweg	3.972	17.055	4,29	14,52

Streuungsursache	Quadratsummen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	737,77	1	737,77	45,13	2,01E-11	2,71
Innerhalb der Gruppen	97.360,91	5.956	16,35			
Gesamt	98.098,67	5.957				

Tabelle I-9: ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 50 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Clusterbeschränkt	2.648	12.466	4,71	18,99
Clusterübergreifend	3.310	14.599	4,41	14,42

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	129,878785	1	129,88	7,90	0,0050	2,71
Innerhalb der Gruppen	97.968,79	5.956	16,45			
Gesamt	98.098,67	5.957				

Tabelle I-10: ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 50 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Getaktet	1.324	6.293	4,75	18,30
Permanent	2.317	10.389	4,48	15,94
Auslastungsorien- tiert mit Zeitgrenze	2.317	10.383	4,48	15,93

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	75,36	2	37,68	2,29	0,10	2,30
Innerhalb der Gruppen	98.023,31	5.955	16,46			
Gesamt	98.098,67	5.957				

WIP-Bereich 75 %



Abbildung I-19: Haupteffekte der Modulusprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 75 %

Tabelle I-11: ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 75 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Erfolgt	6.064	27.777	4,58	18,74
Erfolgt nicht	758	3.204	4,23	15,49

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	84,30	1	84,30	4,59	0,032	2,71
Innerhalb der Gruppen	125.327,54	6.820	18,38			
Gesamt	125.411,84	6821				

Tabelle I-12: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 75 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Prioritätsregeln	4.548	21.148	4,65	19,29
Integrierte Optimierung	2.274	9.833	4,32	16,51

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	160,97	1	160,97	8,77	0,0031	2,71
Innerhalb der Gruppen	125.250,87	6.820	18,37			
Gesamt	125.411,84	6821				

Tabelle I-13: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 75 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Fester Fahrweg	2.274	11.310	4,97	21,26
Flexibler Fahrweg	4.548	19.671	4,33	16,81

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	637,39	1	637,39	34,84	3,75E-09	2,71
Innerhalb der Gruppen	124.774,45	6.820	18,30			
Gesamt	125.411,84	6.821				

Tabelle I-14: ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 75 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Clusterbeschränkt	3.032	14.240	4,70	20,81
Clusterübergreifend	3.790	16.741	4,42	16,42

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	131,51	1	131,51	7,16	0,0075	2,71
Innerhalb der Gruppen	125.280,33	6.820	18,37			
Gesamt	125.411,84	6.821				

Tabelle I-15: ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 75 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Getaktet	1.516	7.180	4,74	20,20
Permanent	2.653	11.899	4,49	17,85
Auslastungsorien- tiert mit Zeitgrenze	2.653	11.902	4,49	17,86

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	73,97	2	36,99	2,01	0,13	2,30
Innerhalb der Gruppen	125.337,87	6.819	18,38			
Gesamt	125.411,84	6.821				

WIP-Bereich 100 %

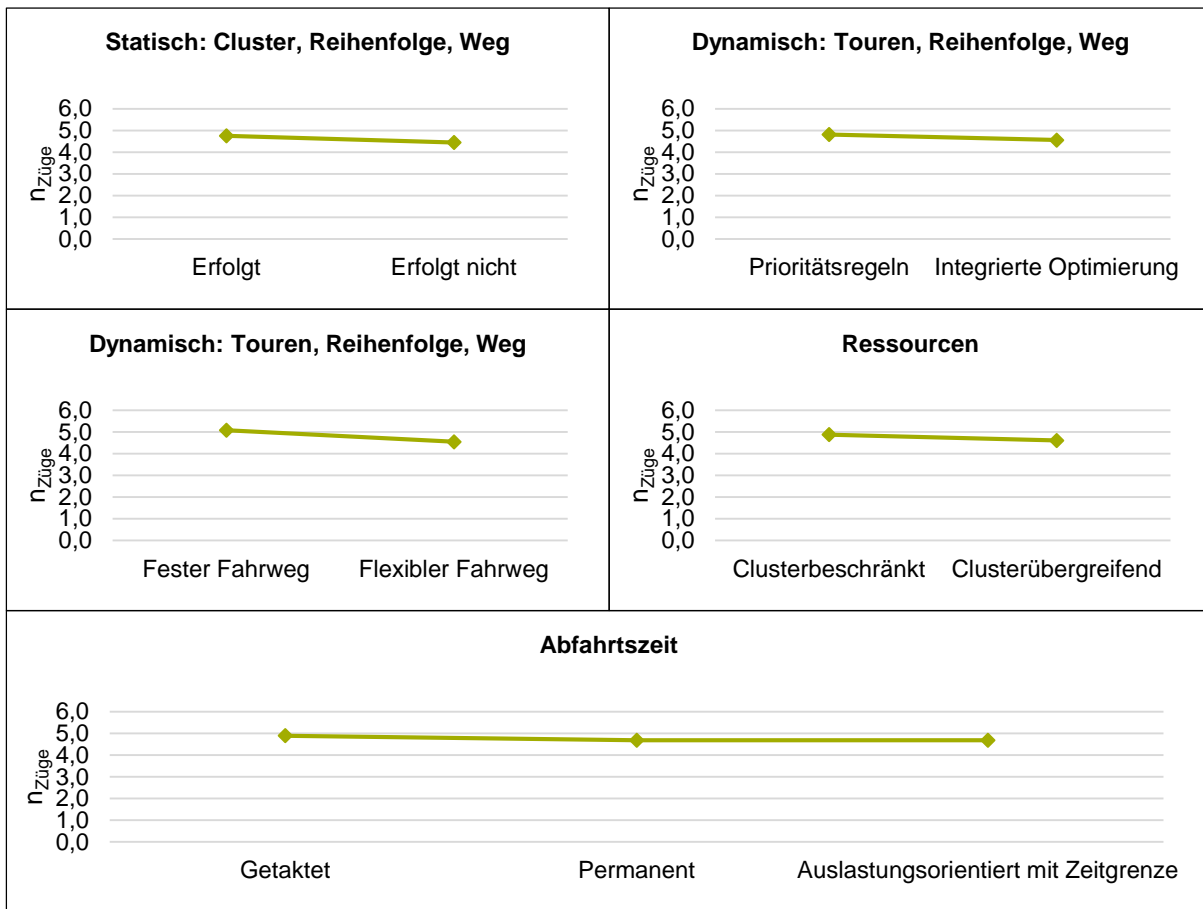


Abbildung I-20: Haupteffekte der Modulausprägungen auf die mittlere Anzahl notwendiger Züge im WIP-Bereich 100 %

Tabelle I-16: ANOVA Modul „Statisch: Cluster, Reihenfolge, Weg“ für den WIP-Bereich 100 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Erfolgt	6.704	31.930	4,76	20,05
Erfolgt nicht	838	3.735	4,46	17,35

Streuungs- ursache	Quadrat- Summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	69,65	1	69,65	3,53	0,061	2,71
Innerhalb der Gruppen	148.894,85	7.540	19,75			
Gesamt	148.964,50	7.541				

Tabelle I-17: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 1 für den WIP-Bereich 100 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Prioritätsregeln	5.028	24.198	4,81	20,41
Integrierte Optimierung	2.514	11.467	4,56	18,42

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	105,92	1	105,92	5,37	0,021	2,71
Innerhalb der Gruppen	148.858,58	7.540	19,74			
Gesamt	148.964,50	7.541				

Tabelle I-18: ANOVA Modul „Dynamisch: Touren, Reihenfolge, Weg“ – Teil 2 für den WIP-Bereich 100 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Fester Fahrweg	2.514	12.789	5,09	22,09
Flexibler Fahrweg	5.028	22.876	4,55	18,49

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	484,01	1	484,01	24,58	7,29E-07	2,71
Innerhalb der Gruppen	148.480,49	7.540	19,69			
Gesamt	148.964,50	7.541				

Tabelle I-19: ANOVA Modul „Ressourcen“ für den WIP-Bereich 100 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Clusterbeschränkt	3.352	16.363	4,88	22,15
Clusterübergreifend	4.190	19.302	4,61	17,81

Streuungs- ursache	Quadrat- Summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	140,71	1	140,71	7,13	0,0076	2,71
Innerhalb der Gruppen	148.823,79	7.540	19,74			
Gesamt	148.964,50	7.541				

Tabelle I-20: ANOVA Modul „Abfahrtszeit“ für den WIP-Bereich 100 %

Gruppen	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz
Getaktet	1.676	8.200	4,89	21,01
Permanent	2.933	13.733	4,68	19,40
Auslastungsorien- tiert mit Zeitgrenze	2.933	13.732	4,68	19,39

Streuungs- ursache	Quadrat- summen	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quad- ratsumme	Prüfgröße (F)	p-Wert	Kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	57,78	2	28,89	1,46	0,23	2,30
Innerhalb der Gruppen	148.906,72	7.539	19,75			
Gesamt	148.964,50	7.541				

Anhang J Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategien in Abhängigkeit der Systemausprägungen

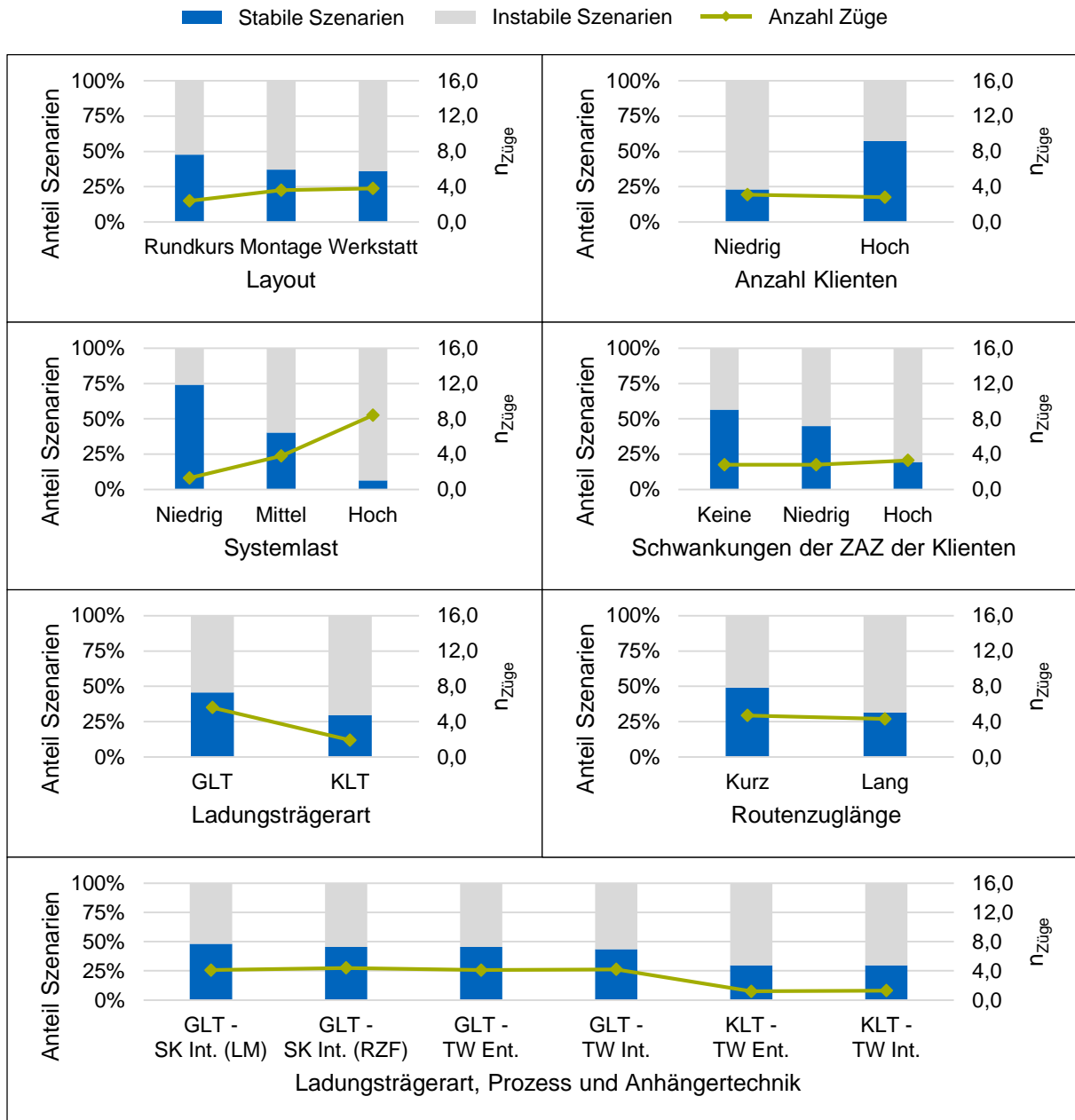


Abbildung J-1: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S01 für den WIP-Bereich 25 %

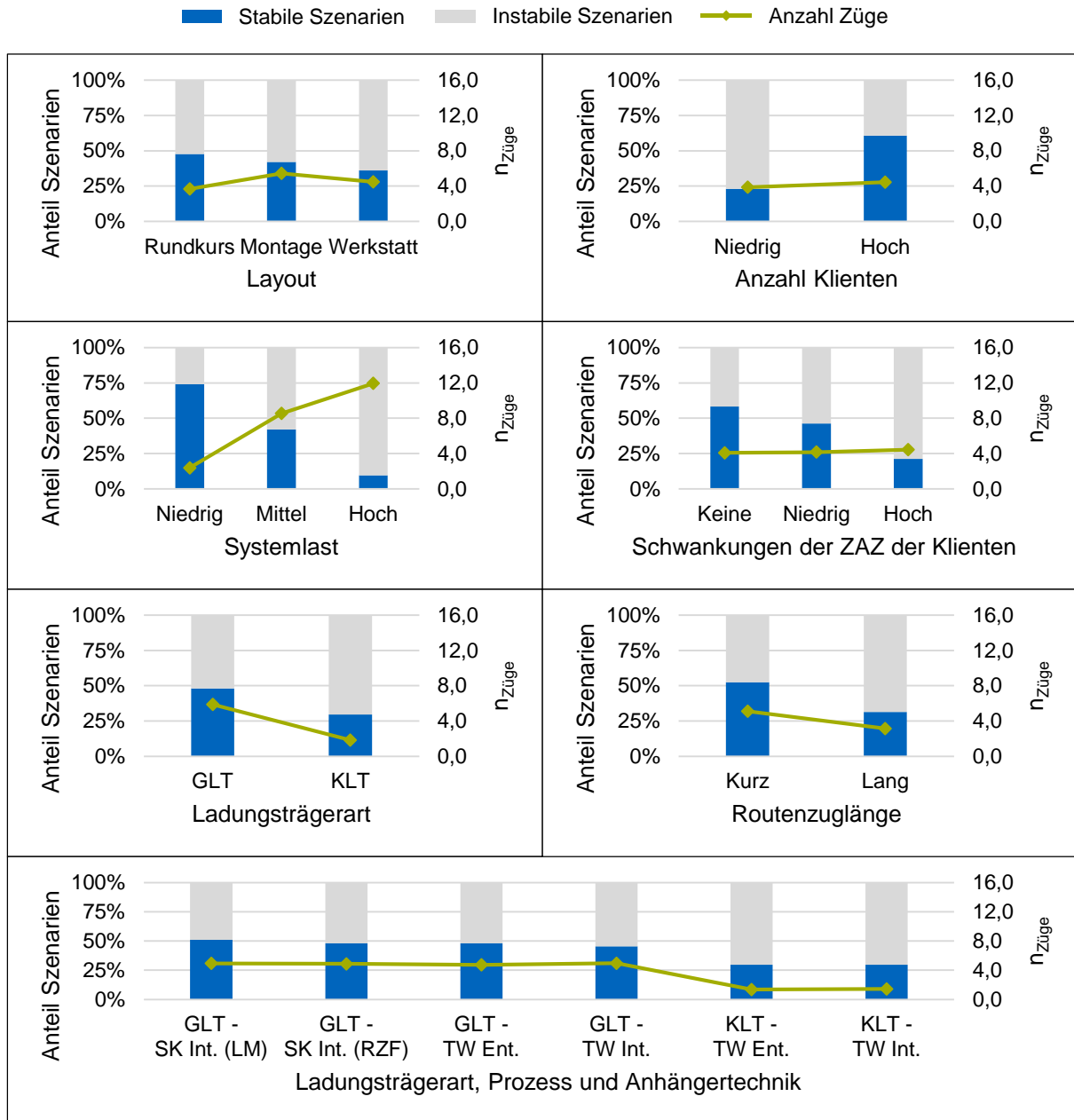


Abbildung J-2: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S02 für den WIP-Bereich 25 %

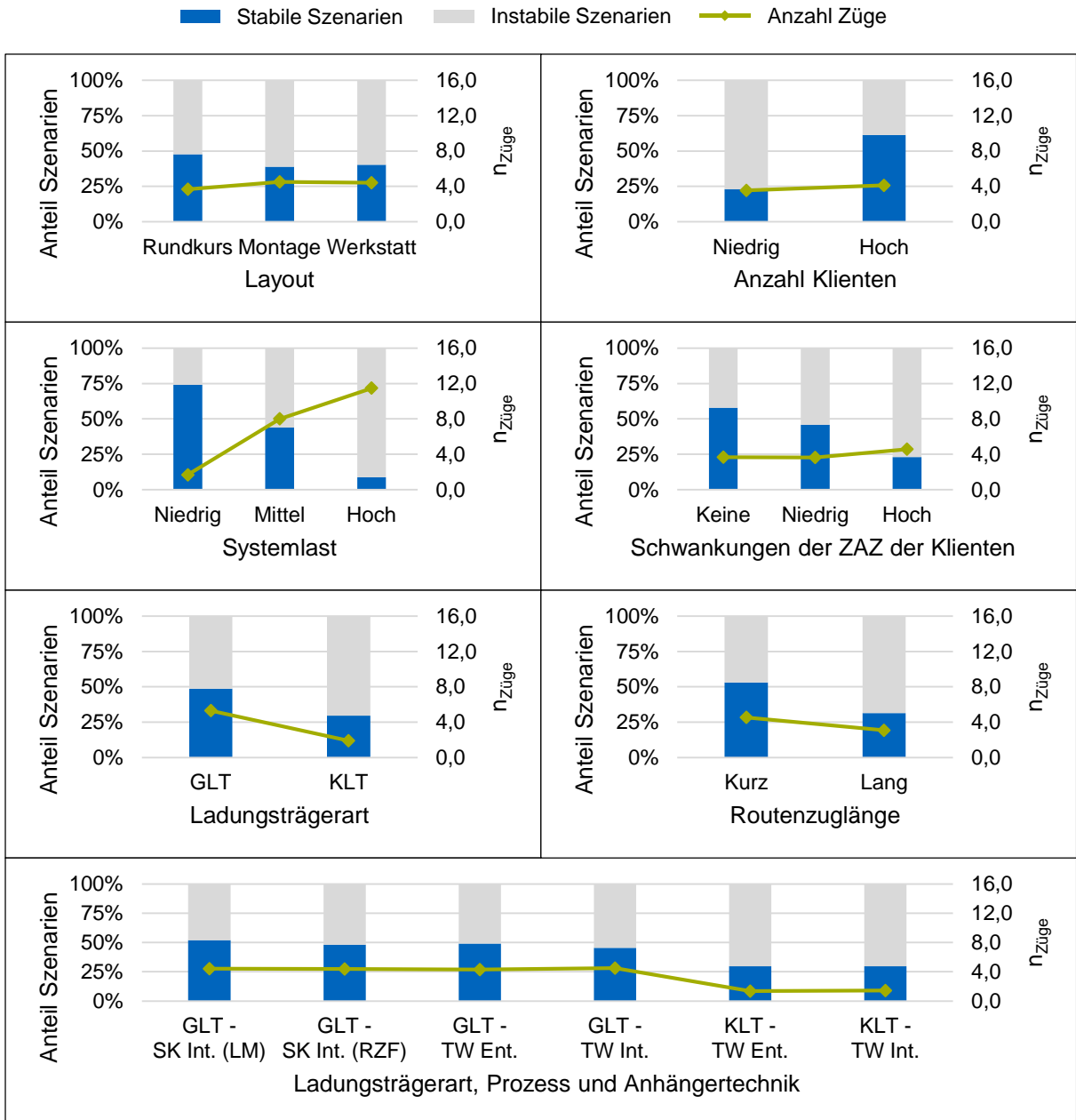


Abbildung J-3: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S03 für den WIP-Bereich 25 %

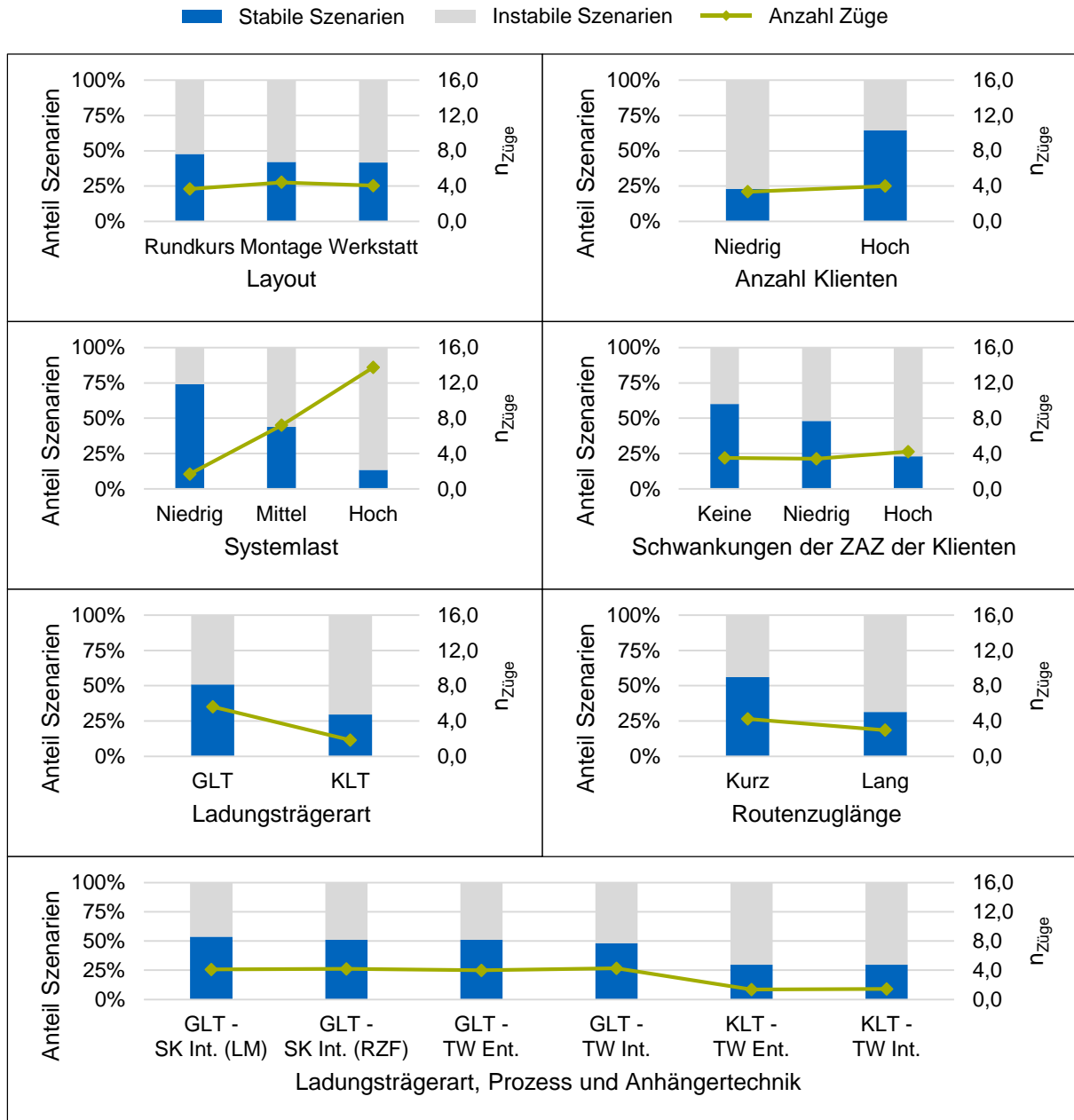


Abbildung J-4: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S04 für den WIP-Bereich 25 %

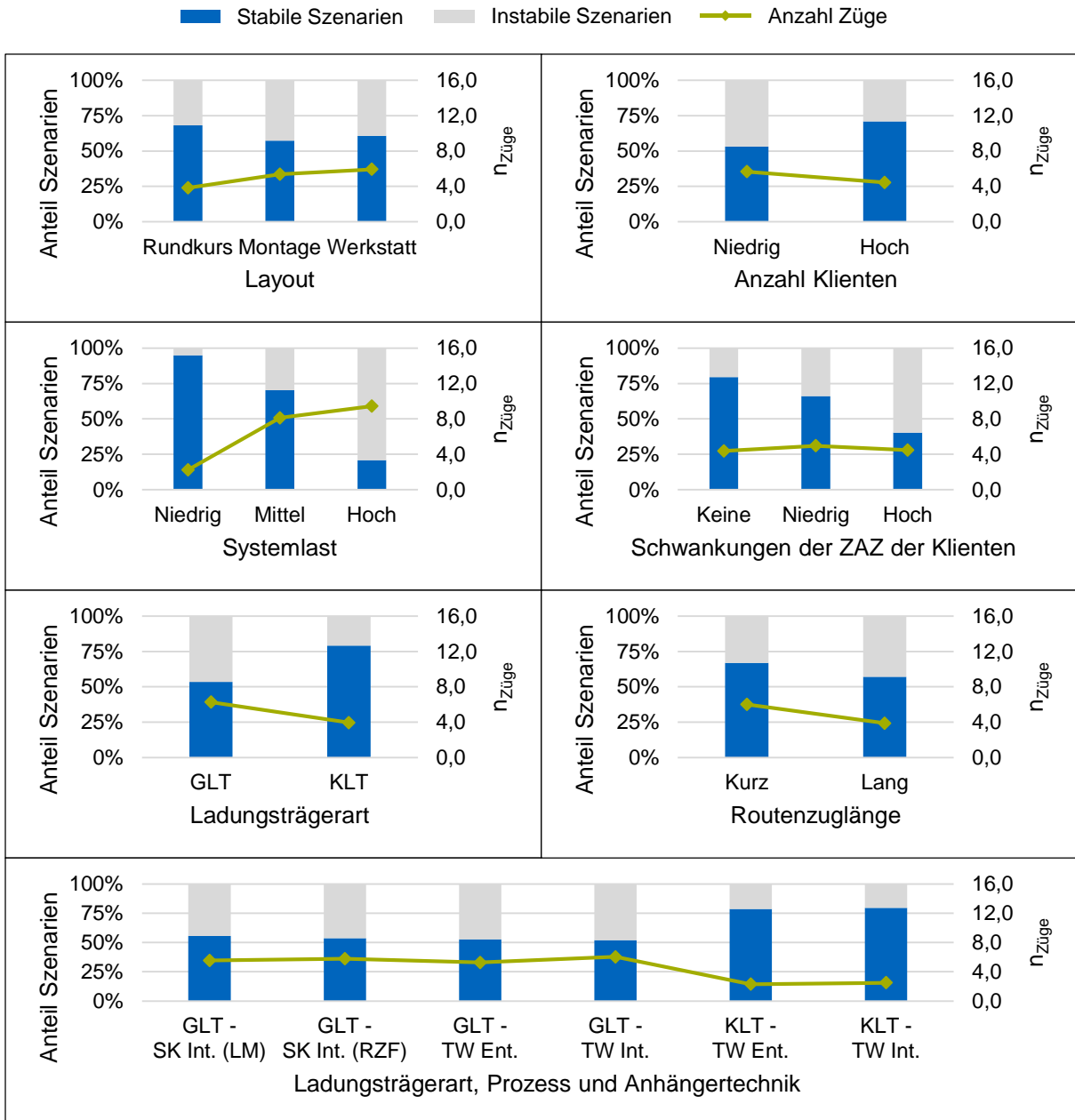


Abbildung J-5: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S05 für den WIP-Bereich 25 %

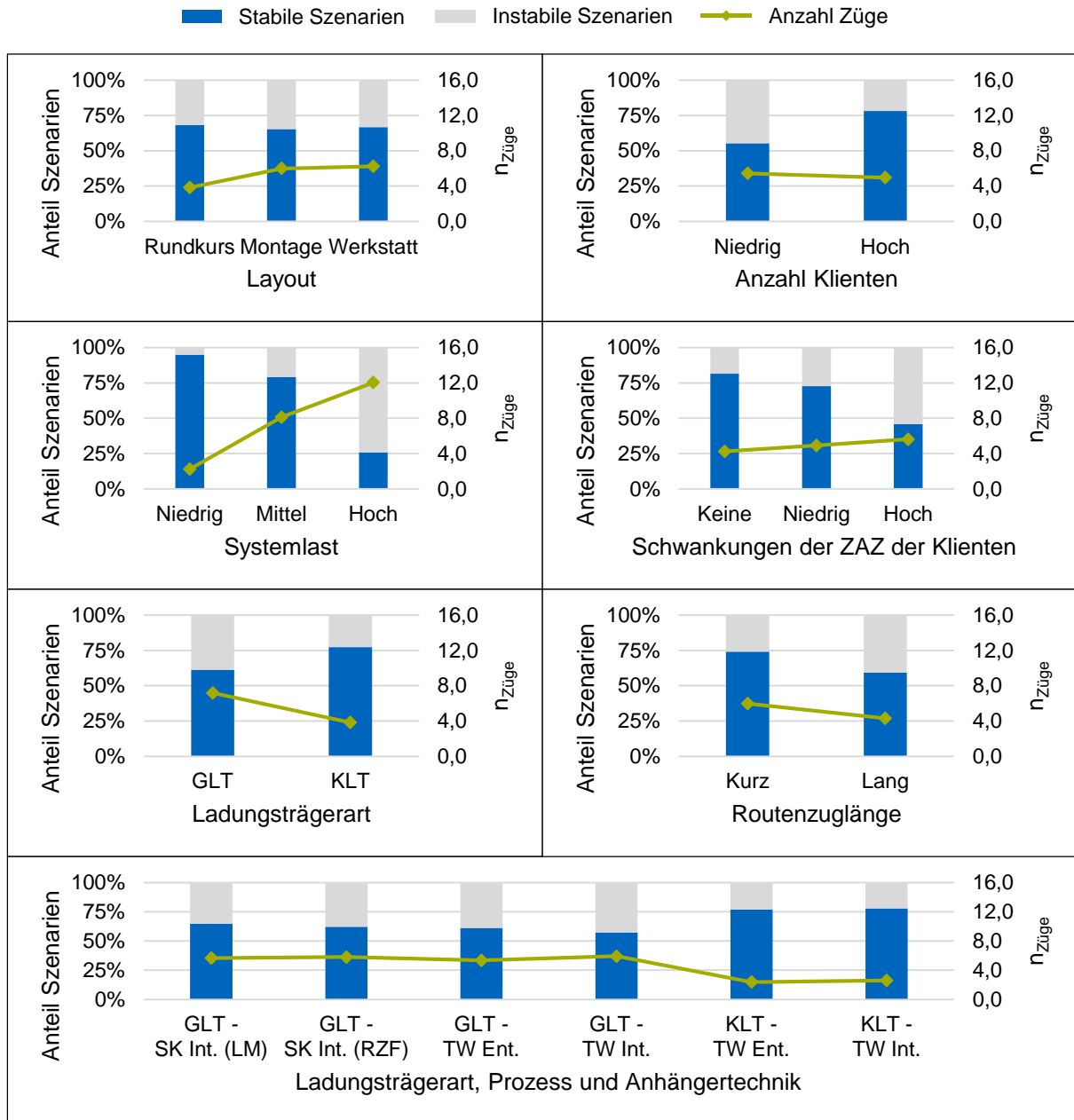


Abbildung J-6: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S06 für den WIP-Bereich 25 %

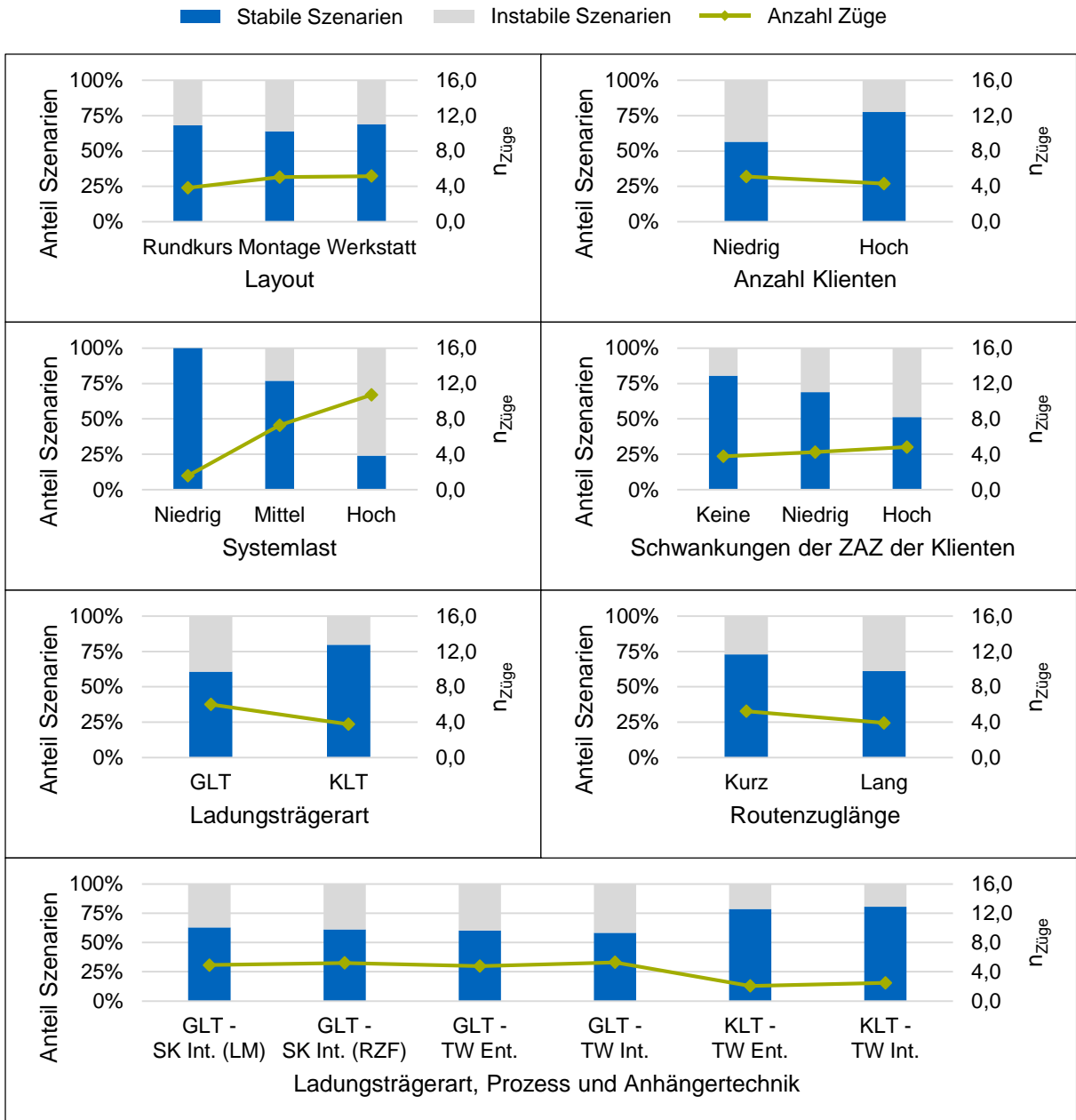


Abbildung J-7: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S07 für den WIP-Bereich 25 %

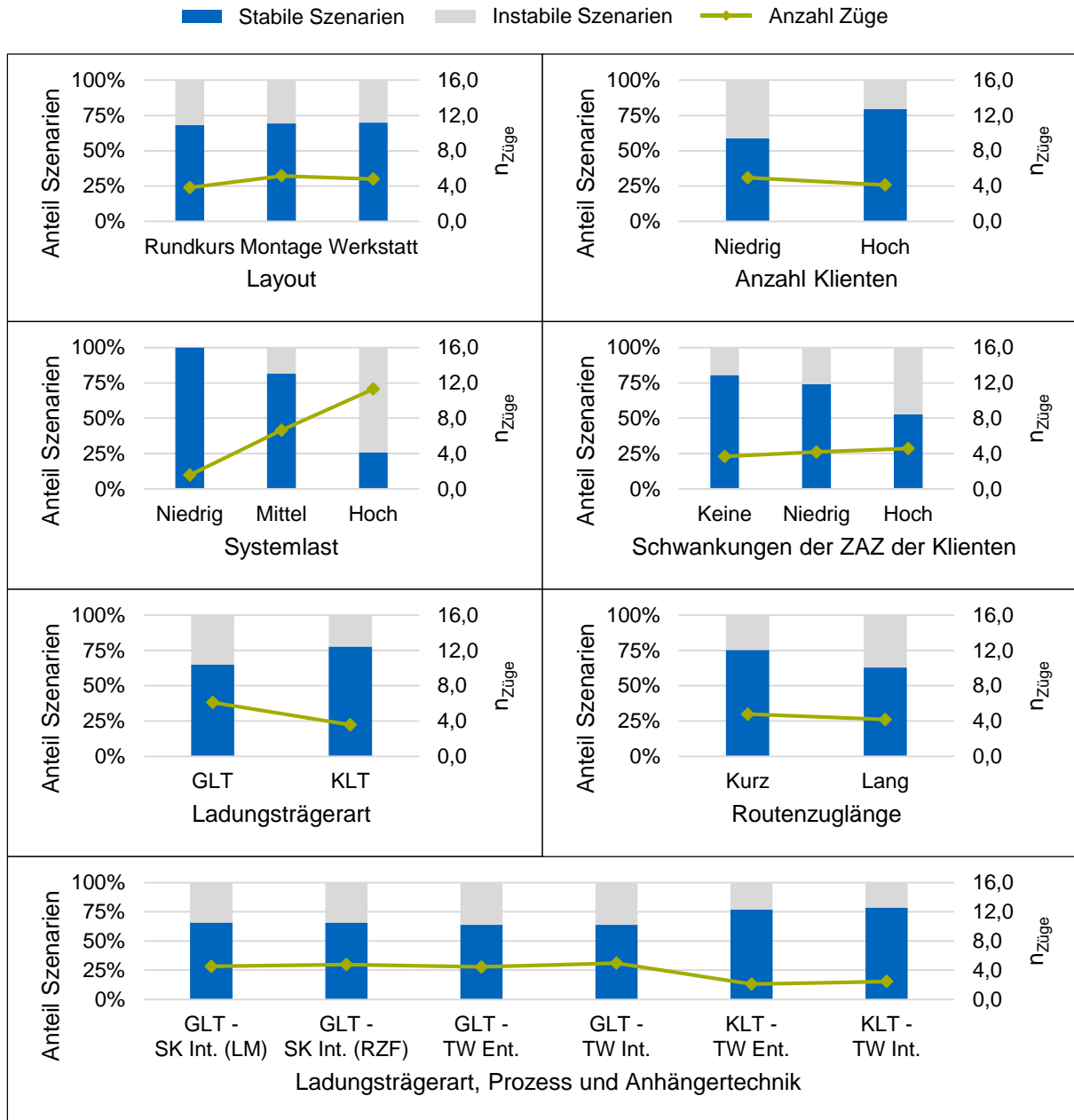


Abbildung J-8: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S08 für den WIP-Bereich 25 %

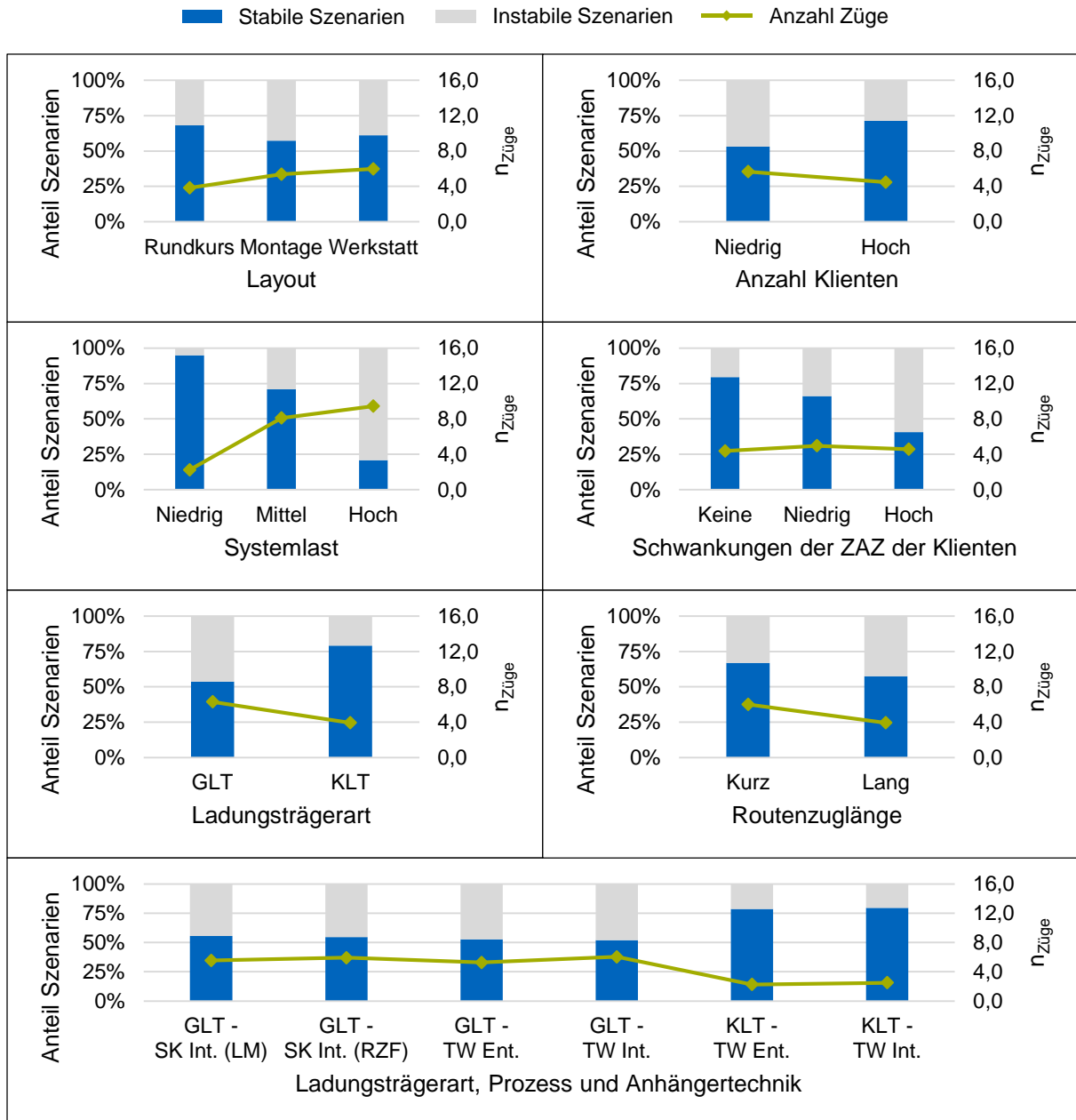


Abbildung J-9: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S09 für den WIP-Bereich 25 %

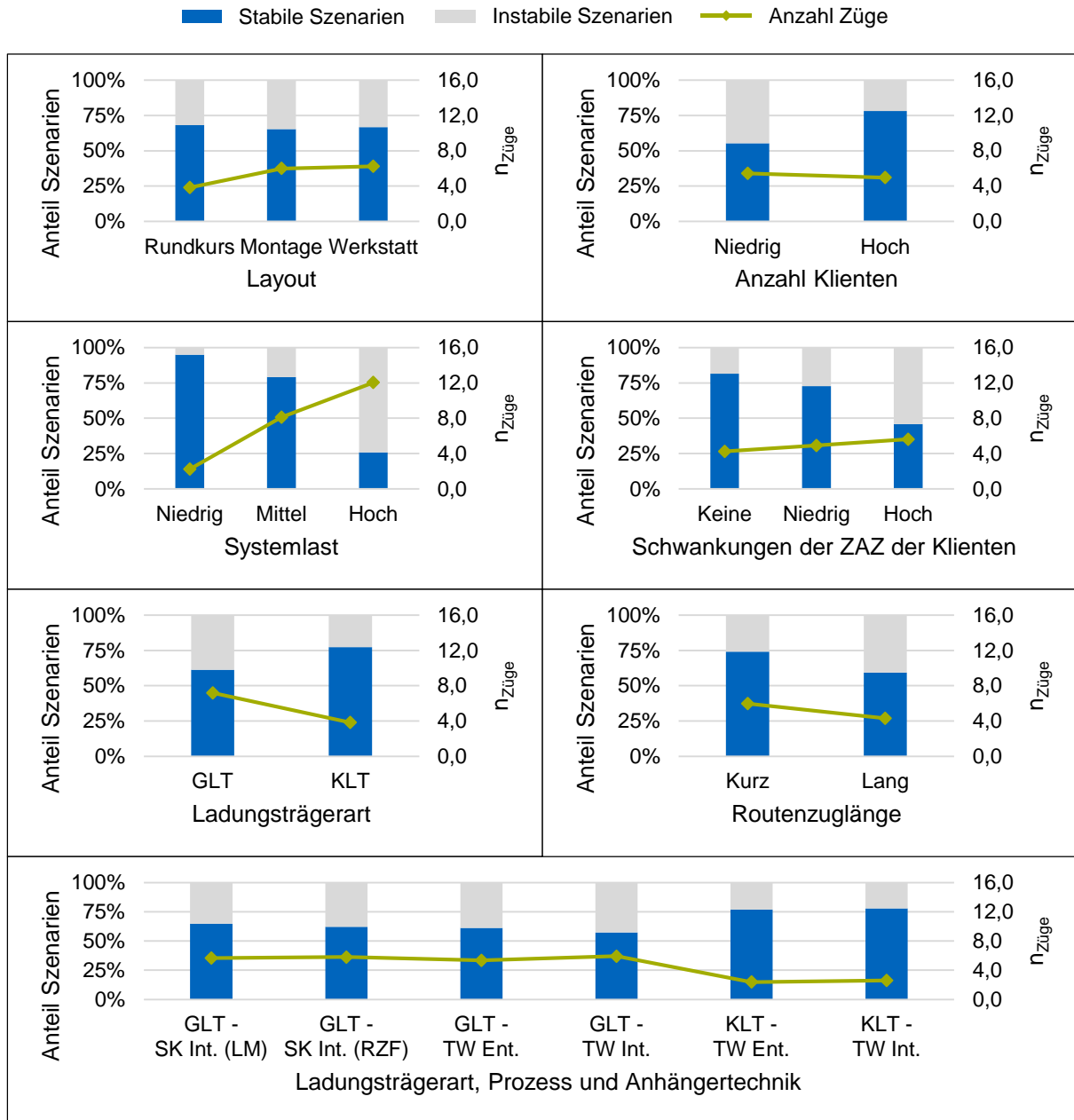


Abbildung J-10: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S10 für den WIP-Bereich 25 %

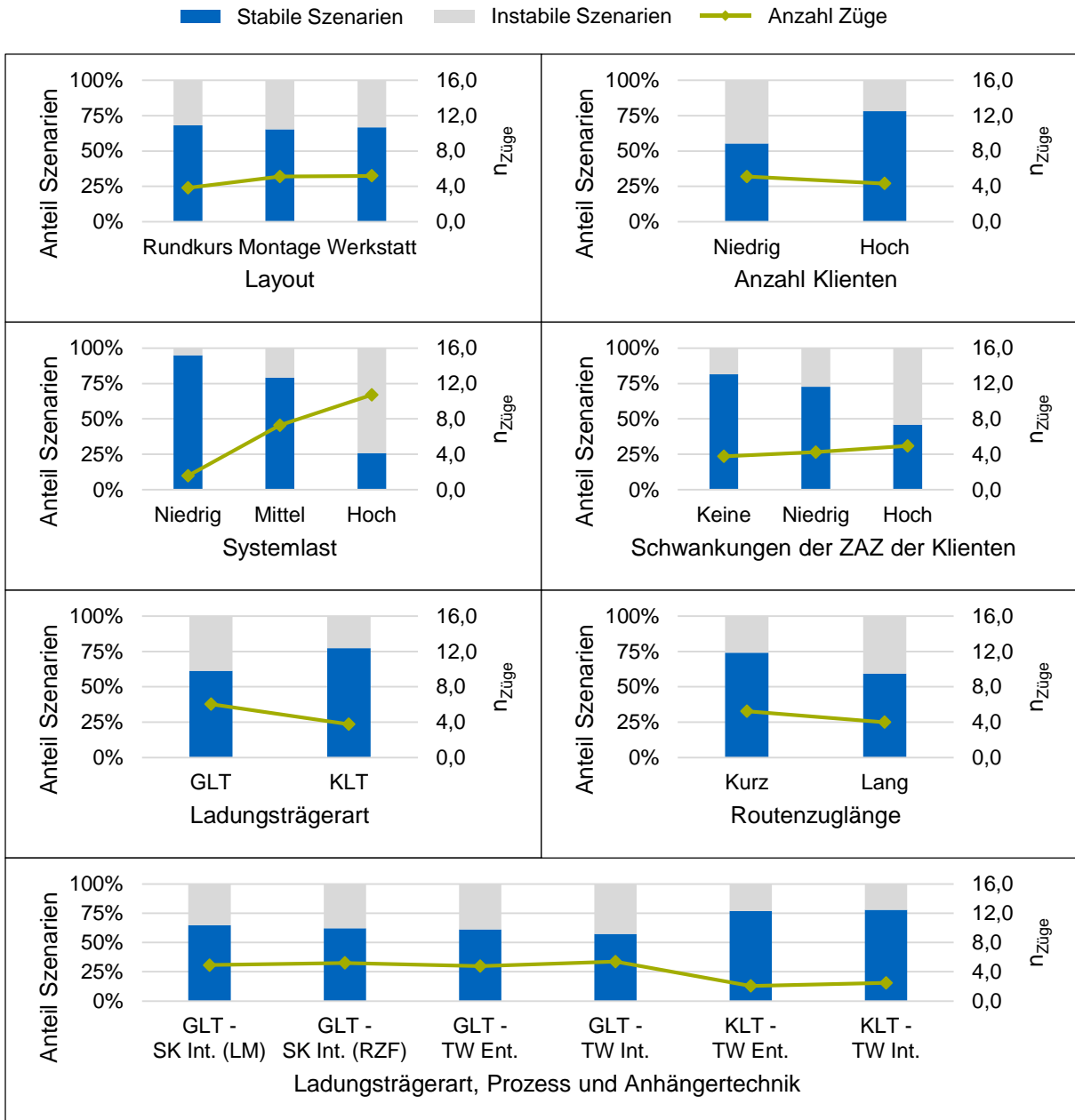


Abbildung J-11: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S11 für den WIP-Bereich 25 %

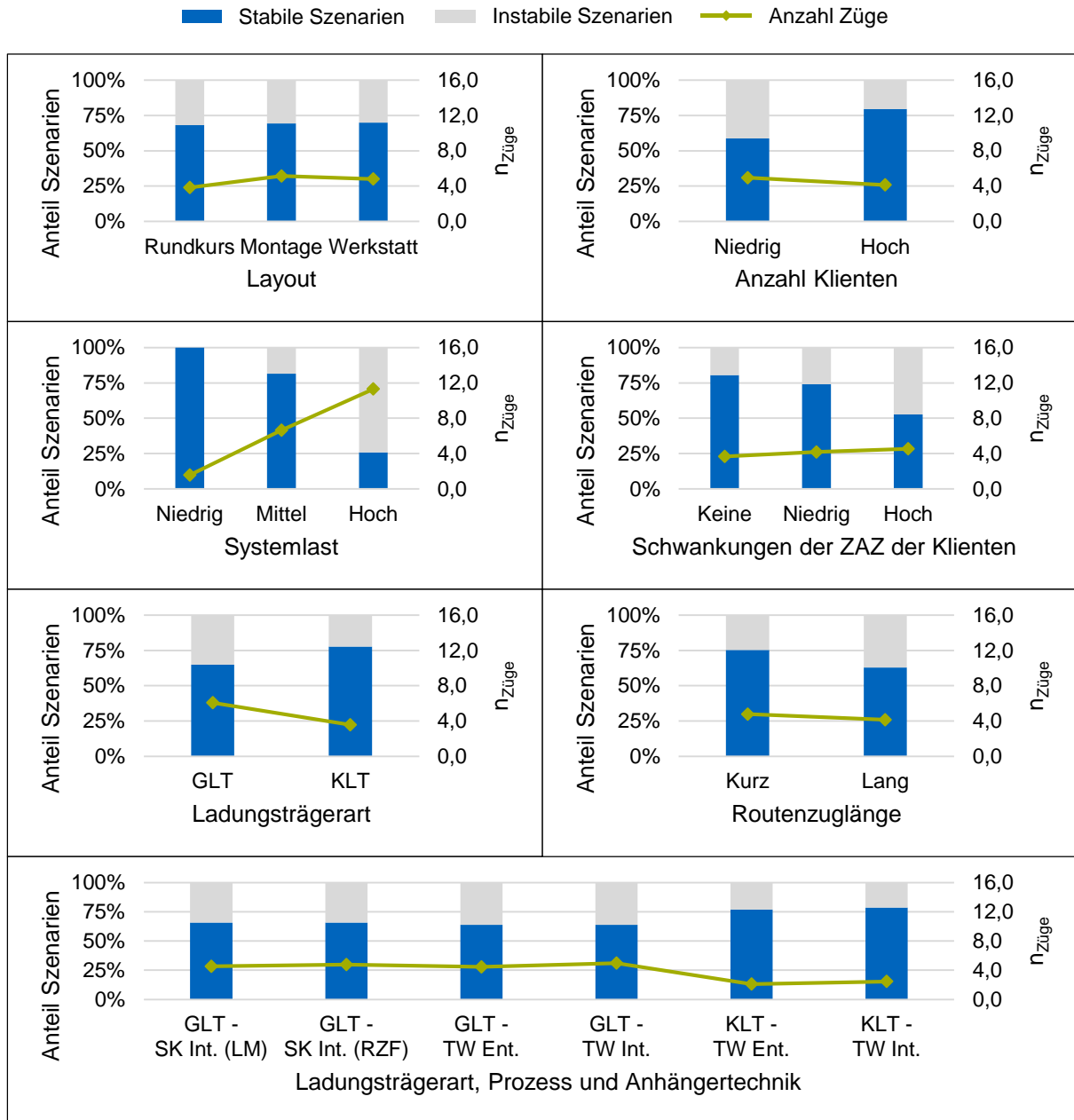


Abbildung J-12: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S12 für den WIP-Bereich 25 %

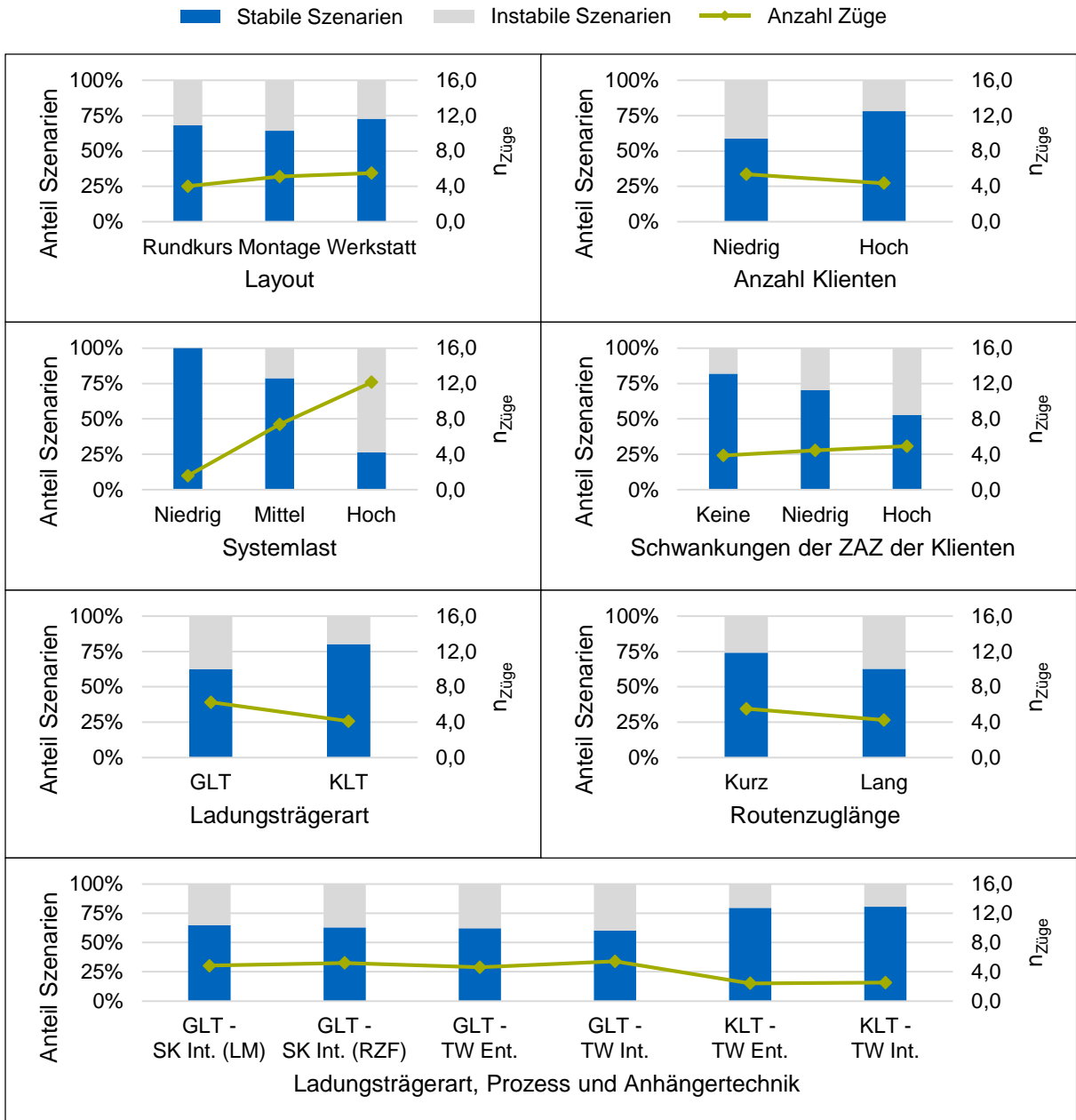


Abbildung J-13: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S13 für den WIP-Bereich 25 %

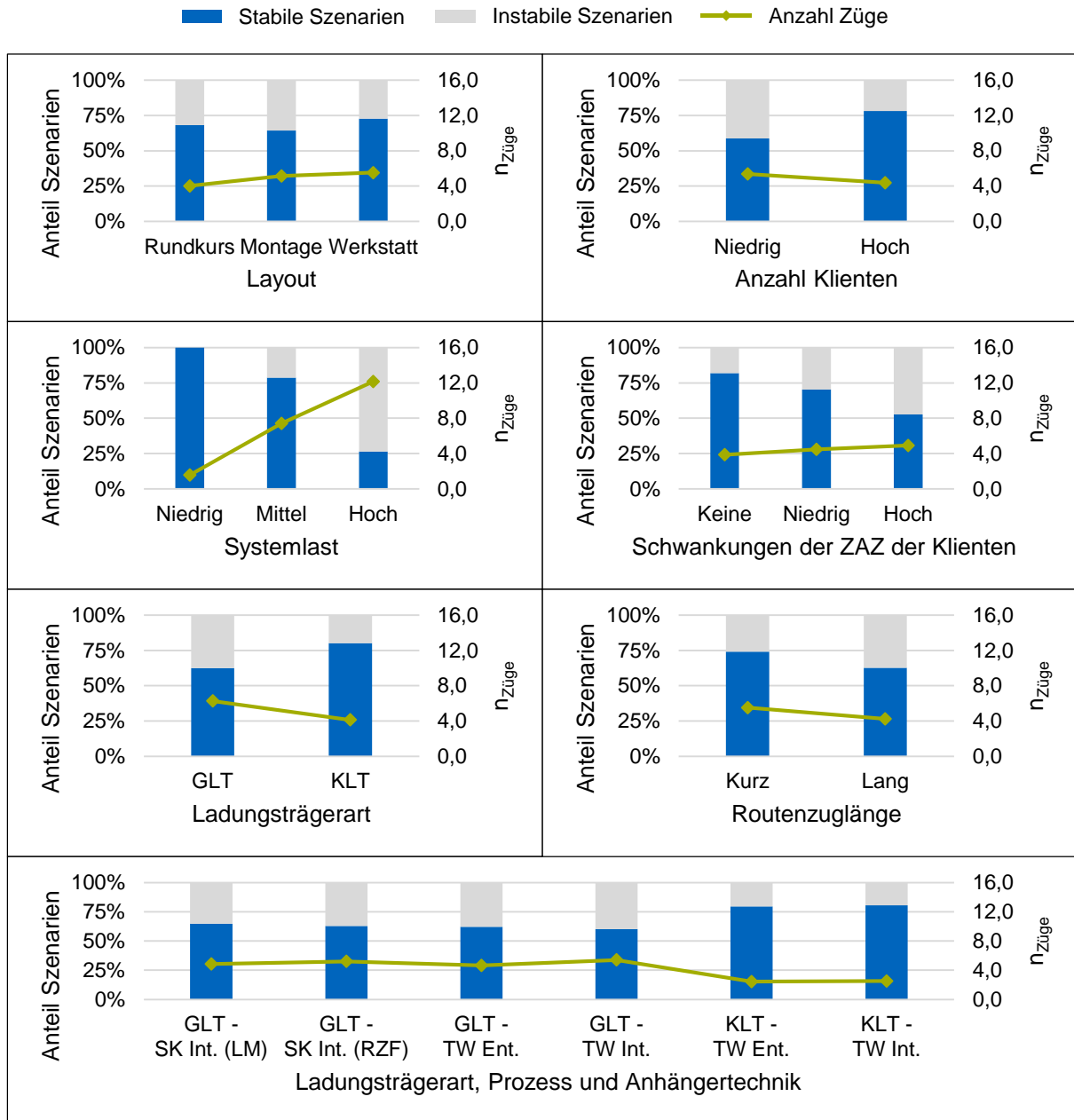


Abbildung J-14: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S14 für den WIP-Bereich 25 %

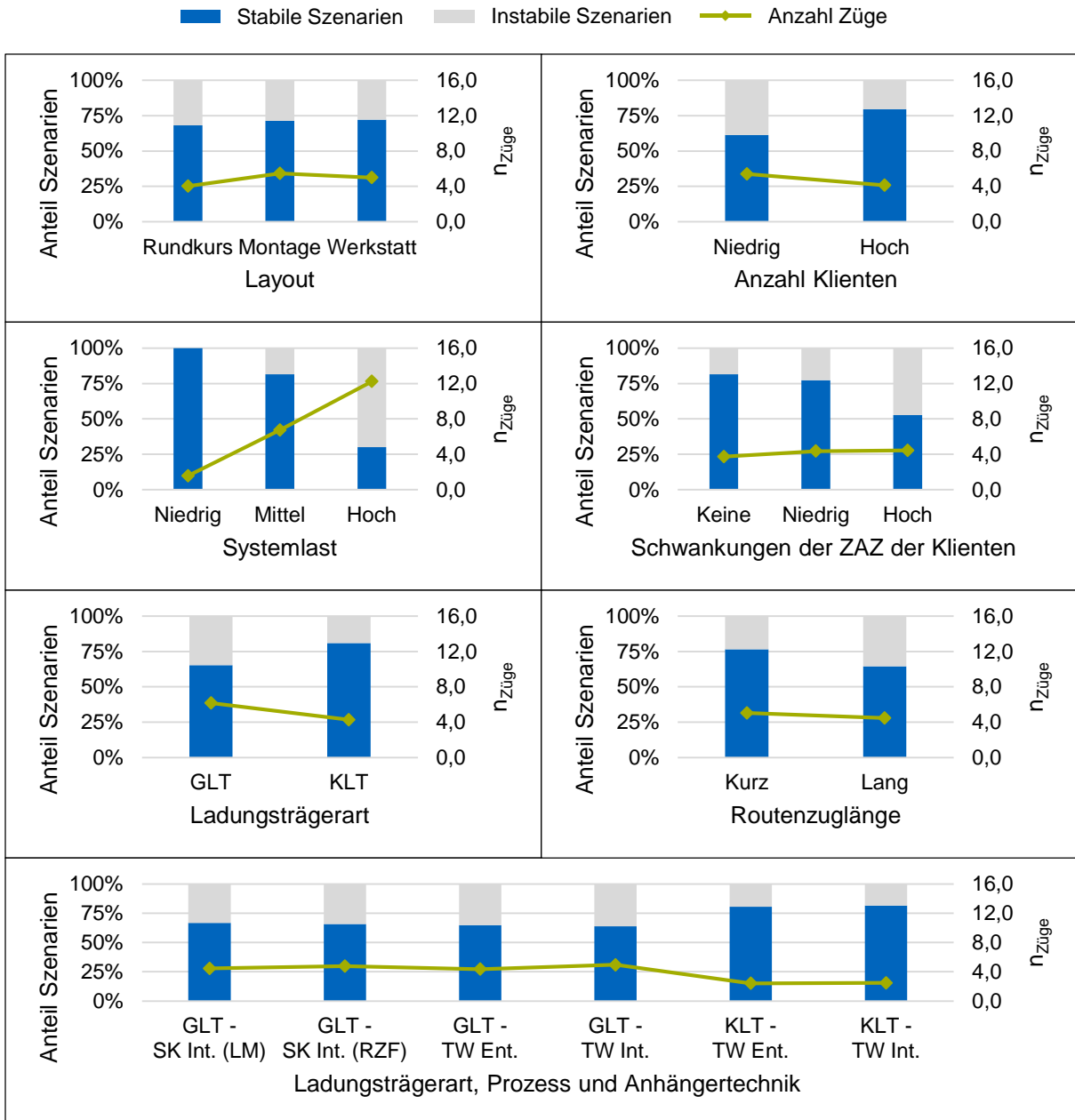


Abbildung J-15: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S15 für den WIP-Bereich 25 %

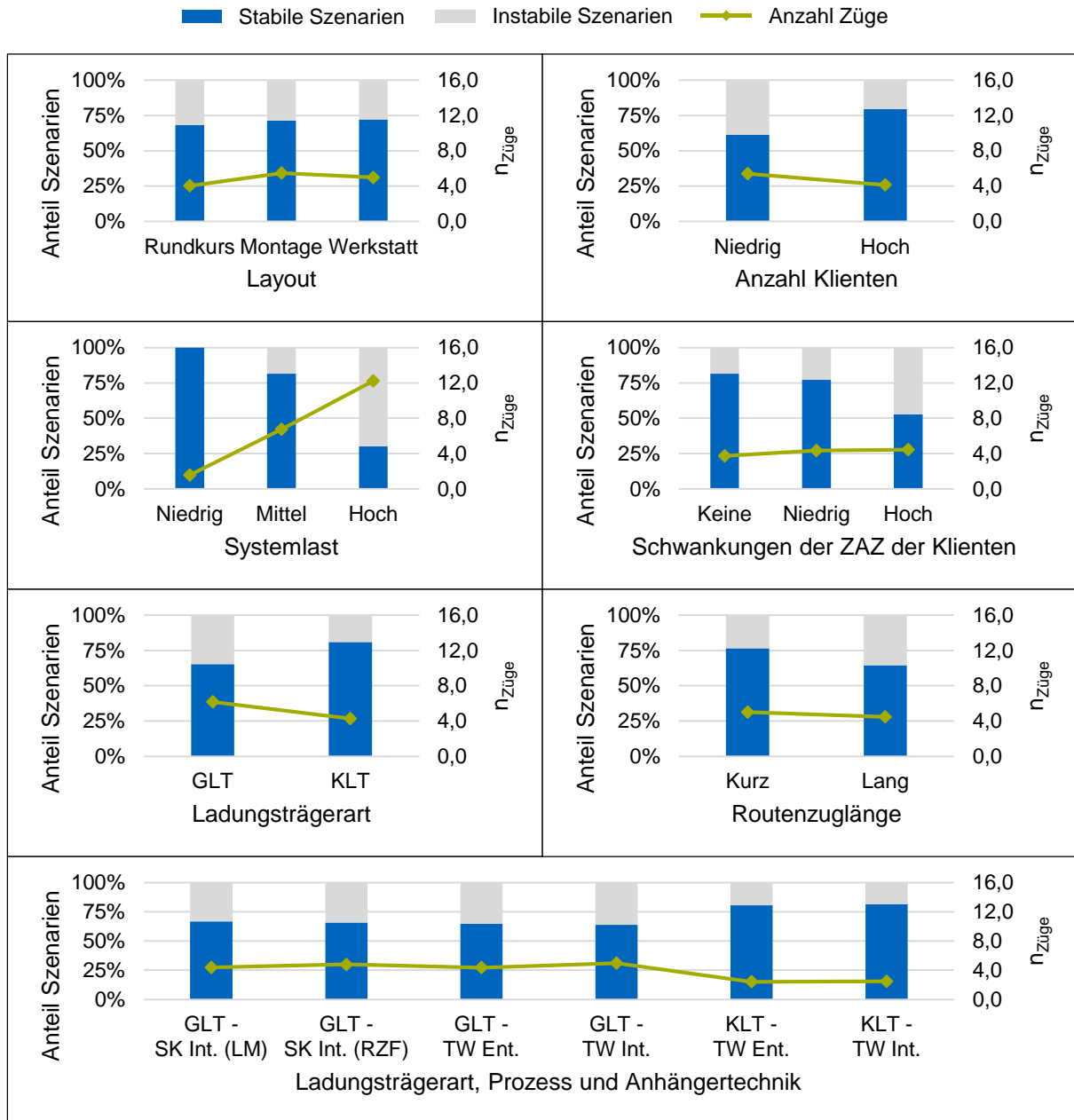


Abbildung J-16: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S16 für den WIP-Bereich 25 %

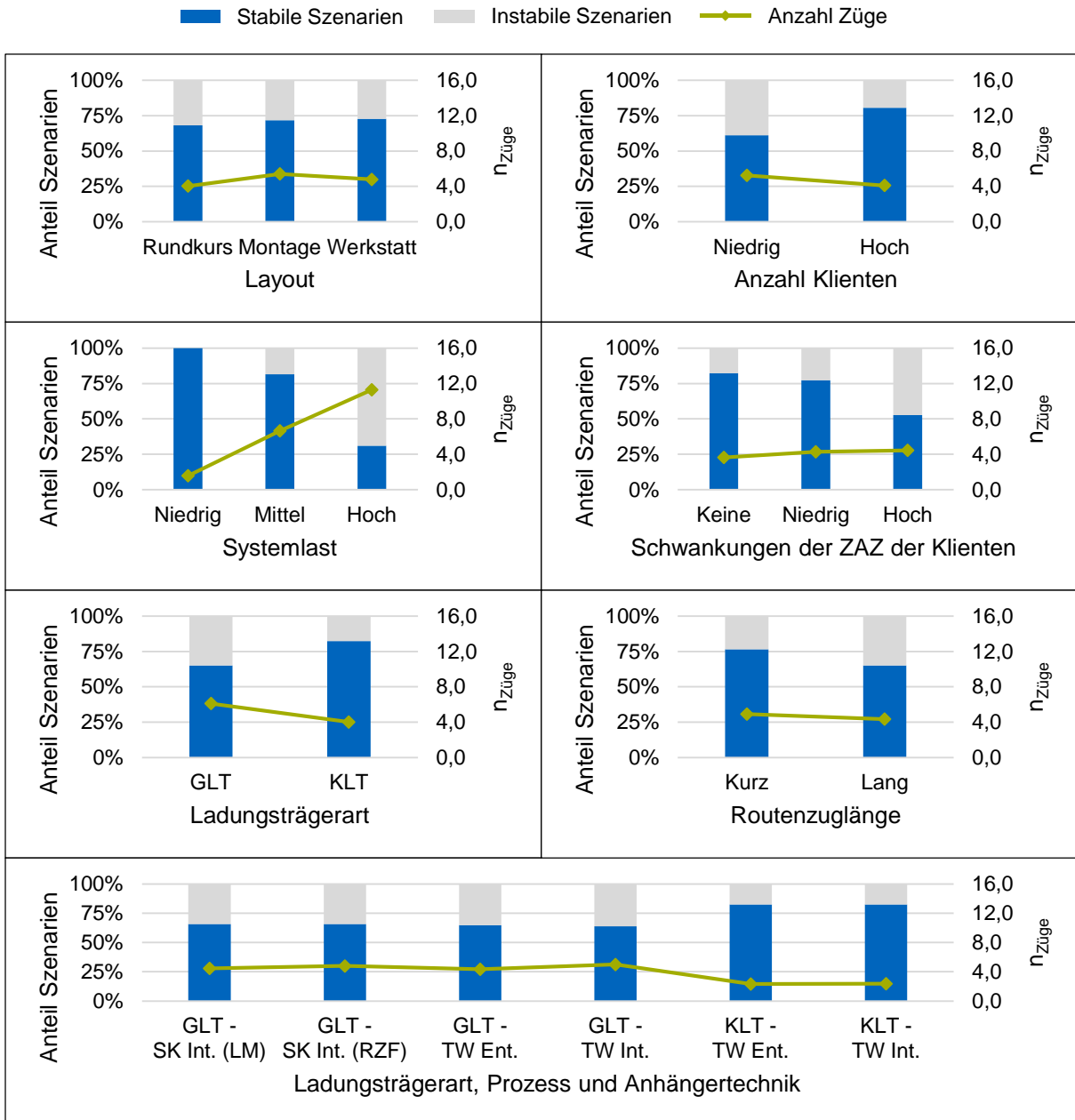


Abbildung J-17: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S17 für den WIP-Bereich 25 %

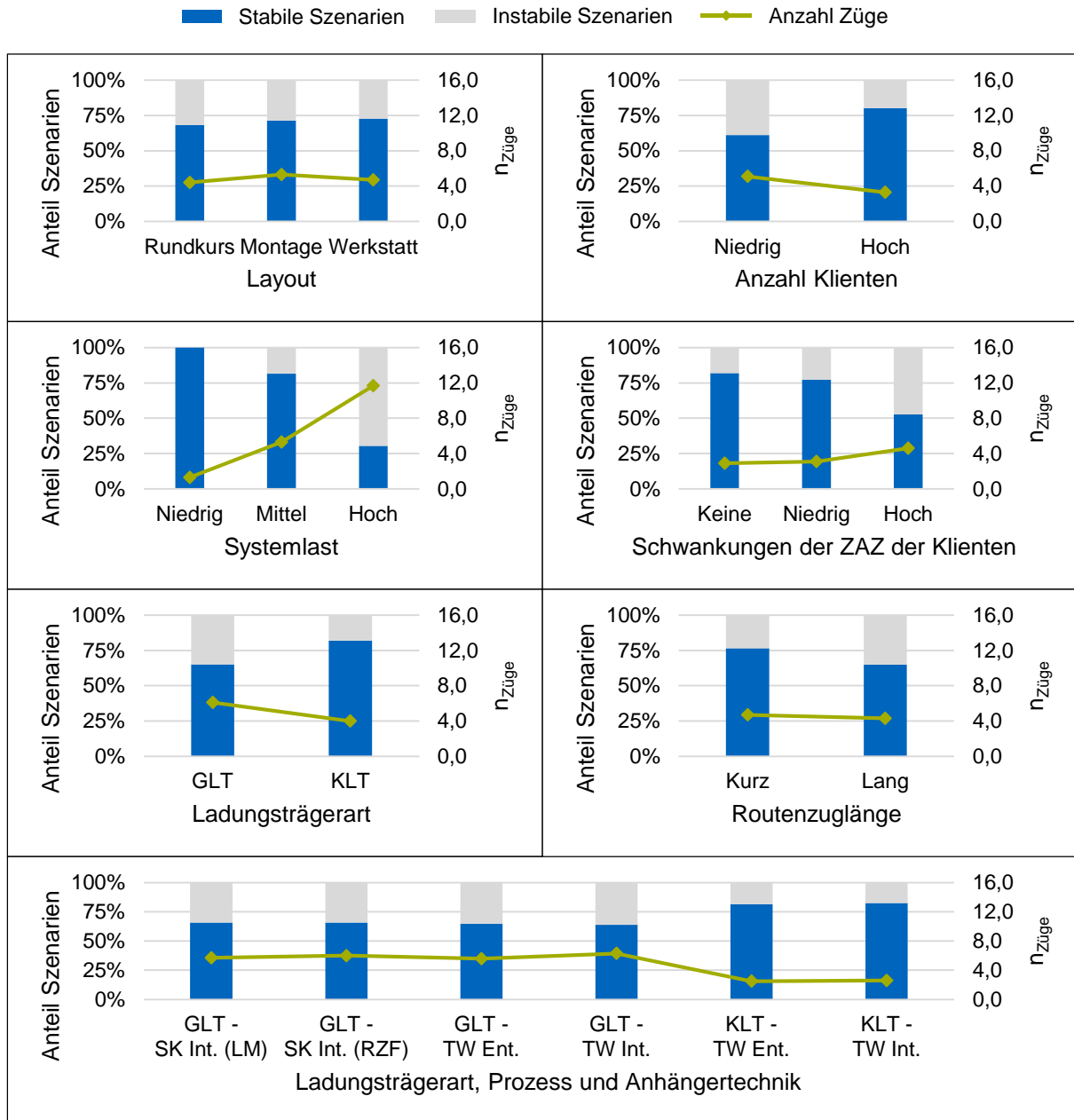


Abbildung J-18: Effektivität und Effizienz der Steuerungsstrategie S18 für den WIP-Bereich 25 %