



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Fahrplanoptimierung für getaktete Routenzugsysteme

Marco Manfred Dewitz

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. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

2. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 23.01.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.06.2020 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2020

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruck, 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: Marco Dewitz

Copyright © Marco Dewitz 2020

ISBN: 978-3-948514-08-2

Printed in Germany, 2020

Danksagung

Mit dem Abschluss dieser Dissertationsschrift endet zugleich ein wichtiger Abschnitt meines beruflichen Werdegangs, auf den ich stets mit großer Freude zurückblicken werde. Viele Personen haben mich auf diesen Weg begleitet, von denen ich Einigen an dieser Stelle meinen besonderen Dank aussprechen möchte.

Mein Dank gilt zu allererst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, welcher mich fortwährend mit fachlichen Beistand unterstützt hat sowie mir stets die Freiheit zur Weiterentwicklung in Wissenschaft und Industrie gegeben hat. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission im Rahmen meines Dissertationsvorhabens.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München sowie einer Forschungs Kooperation mit der Bayerische Motoren Werke AG. Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen für Ihre wertvollen Anregungen, konstruktiven Gespräche und Diskussionen sowie den eingeräumten Freiheiten zur Anfertigung meiner Dissertationsschrift. Namentlich möchte hier besonders Herrn Dr. Thomas Arlt, Frau Dr. Steffi Hoppenheit, Herrn Dr. Florian Kuzmany, Herrn Dr. Stefan Seemüller, Herrn Dr. Tobias Staab sowie Herrn Robert Trepka hervorheben.

Bei aller fachlicher Unterstützung wird ein Promotionsvorhaben nur durch ein gutes privates Umfeld in Familie und Freundeskreis gelingen. Ich danke meinen Eltern für die immerwährende Unterstützung bei all meinen bisherigen Vorhaben. Ihr habt mich zu allererst zu dieser Arbeit befähigt. Meiner Schwester danke ich zudem für die gewissenhafte Prüfung meiner Arbeit.

Liebe Steffi, deine fachliche und emotionale Unterstützung, Rücksichtnahme sowie Verständnis waren der Grundstein für den Abschluss meiner Promotion. Dich an meiner Seite zu wissen hat und wird mich auch in Zukunft immer beflügeln! Diese Arbeit ist dir gewidmet.

Haimhausen, 03.08.2020

Marco Dewitz

Kurzzusammenfassung

Fahrplanoptimierung für getaktete Routenzugsysteme

Marco Dewitz

Moderne Logistikkonzepte zur Produktionsversorgung basieren in zunehmendem Maße auf „just in time“ Ansätzen für die Bereitstellung von Material. Durch eine hochfrequente Anlieferung kleinerer Losgrößen lassen sich Bestände reduzieren und die innerbetriebliche Logistik kann flexibler auf Veränderungen reagieren. Routenzugsysteme bieten das Potenzial, diese Anforderungen effizient zu erfüllen. Allerdings stellt die Planung solcher Systeme aufgrund der vielfältigen technischen und prozessualen Gestaltungsmöglichkeiten eine komplexe Aufgabenstellung dar. Getaktete Routenzugsysteme, welche nach einem Taktfahrplan ähnlich denen im öffentlichen Verkehr betrieben werden, sind eine in der Praxis häufig anzutreffende Ausprägungsform. Hier ist es Aufgabe der operativen Logistikplanung, Routen, Fahrpläne und Ladelisten zu definieren und laufend an Umfeldveränderungen anzupassen.

Aufgrund des Änderungs- und Einweisungsaufwandes, welcher mit einer Routenabpassung einhergeht, sowie weiterer betrieblicher Restriktionen kann dieser Freiheitsgrad in der Praxis jedoch limitiert sein. Hier stellt die Anpassung des Routenzugfahrplans eine naheliegende Lösung dar, um auf eine geänderte Transportnachfrage zu reagieren. Für diese Aufgabenstellung wird in dieser Arbeit ein Modell präsentiert, durch welches getaktete Routenzugsysteme mit statischen Routen operativ geplant werden können. Es werden Berechnungszusammenhänge hergeleitet, wie sich Transportnachfrage und Transportangebot, sowie Takt-, Umlauf- und Abfahrtszeiten gegenseitig beeinflussen. Darauf aufbauend bilden zwei mathematische Optimierungsprobleme die Kernergebnisse dieser Arbeit: Das „Routenzugfahrplan-Problem“ ermöglicht die Generierung einsatzoptimaler und überschneidungsfreier Routenzugfahrpläne. Durch Lösung des überlagerten, „integrierten Routenzugtakt-Problems“ können darüber hinaus die Taktzeiten der Routenzüge bestimmt werden, sodass eine gegebene Transportnachfrage gedeckt werden kann.

Für dieses Gesamtplanungsmodell zur Takt- und Fahrplanplanung werden optimale Lösungsverfahren präsentiert und anhand zweier Anwendungsfälle aus der Automobilindustrie evaluiert. Es wird gezeigt, dass die Anwendung der Forschungsergebnisse zu einer signifikanten Effizienzsteigerung beim Betrieb getakteter Routenzugsysteme mit statischen Routen führen kann.

Abstract

Schedule optimisation for cyclic tugger train systems

Marco Dewitz

Modern logistics concepts for production supply focus a "just-in-time" provision of material. When delivering smaller batch sizes in high frequencies, stock in the production can be reduced and the internal logistics can react more flexible to changes. Tugger trains offer the potential to fulfil these requirements efficiently. However, the planning of such systems is a complex task due to the diverse technical and procedural design options. Cyclic tugger train systems, which are operated according to a regular interval timetable similar to those in public transport, are often encountered in industrial applications. For those systems routes, timetables and loading lists have to be planned and adapted to changes in the environment within the operational logistics planning.

Due to the implementation and training effort, which occurs when changing routes, as well as other operational restrictions, this degree of freedom can be limited in practice. Here, the adaptation of the tugger train schedule is an obvious solution to respond to a changing transport demand. To fulfil this task, this dissertation suggests a model to generate cyclic tugger train schedules with static routes within the operational logistics planning. Correlations between the transport demand and transport capacity are derived and formulas are presented by which cycle times, tour durations and departure times of the tugger trains can be calculated. Based on this, two mathematical optimization problems form the core results of this dissertation: The "tugger train schedule problem" allows the generation of non-overlapping schedules which can be carried out with a minimum number of tugger trains. By solving the overlying, "integrated route cycle time problem", the cycle times of the tugger trains can furthermore be determined, so that a given transport demand can be met.

To solve this overall planning model for cycle time and timetable planning, an optimal solution algorithm is presented and evaluated using two applications from the automotive industry. It is shown that the application of the research results can lead to a significant increase in efficiency when operating cyclic tugger train systems with static routes.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzzusammenfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Formelzeichenverzeichnis	XIII
1 Ausgangssituation und Inhalt der Arbeit	1
1.1 Herausforderungen der Produktionsversorgung	1
1.2 Produktionsversorgung durch Routenzugsysteme	3
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	4
1.4 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit	6
2 Stand der Forschung und Technik für Routenzugsysteme	9
2.1 Grundlegende Begriffsbestimmungen	9
2.2 Organisatorische und technische Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen	14
2.2.1 Transporteinheiten	15
2.2.2 Gestaltungsfeld Transportorganisation – Routenzugprozess	17
2.2.3 Gestaltungsfeld Transportorganisation – Routenzugsteuerung	18
2.2.4 Gestaltungsfeld Transportmittel	21
2.3 Planung von Routenzugsystemen	24
2.3.1 Taktische Routenzugplanung	24
2.3.2 Operative Routenzugplanung	27
2.3.3 Literaturübersicht – Modelle und Methoden im Rahmen der operativen Routenzugplanung	28
3 Forschungsbedarf und Aufgabenstellung	35
3.1 Unsicherheiten in der innerbetrieblichen Logistik	35
3.2 Anforderungsanalyse und Restriktionen	39
3.3 Anforderungsabgleich	43

3.4	Präzisierung der Forschungsfrage	45
4	Herleitung eines Modells zur operativen Routenzugplanung	47
5	Taktzeitplanung	53
5.1	Modellierung der Transportnachfrage	53
5.2	Modellierung des Transportangebots	61
5.3	Zusammenführung des Transportnachfrage- und Transportangebotsmodells	64
6	Fahrplanplanung	67
6.1	Modellierung der Umlaufzeit-Bestandteile	67
6.2	Modellierung der Fahrplanstruktur	77
6.3	Modellierung von Fahrplanüberschneidungen	80
6.4	Modellierung des Einsatzplans	87
6.5	Zusammenführung der Einzelmodelle in einem Modell zur automatischen Fahrplanerzeugung	91
6.5.1	Lineare Optimierung	92
6.5.2	ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems	96
6.5.3	Testinstanz und Verbesserung der Schrankengüte	101
7	Integrierte Taktzeit- und Fahrplanplanung	111
7.1	Integriertes Routenzugtakt-Problem	112
7.2	Branch & Bound Lösungsverfahren	116
7.3	Testinstanz	121
8	Experimentelle Evaluation am Beispiel der Automobilindustrie	129
8.1	Ausgangssituation im BMW Montagewerk Dingolfing	131
8.2	Anwendungsfall I: Bereitstellung von Kleinladungsträgern mit sortenreinem Material	134
8.3	Anwendungsfall II: Bereitstellung von Großladungsträgern mit sequenziertem Material	142
8.4	Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse	148
9	Zusammenfassung und Ausblick	151
	Literaturverzeichnis	157
	Abbildungsverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	177

Anhang A Hard- und Softwarespezifikation der Testumgebung	A-1
Anhang B Einordnung der Anwendungsfälle in die Routenzugsystem-Morphologie	B-1
Anhang C Optimaler Fahrplan für Anwendungsfall I	C-1
Anhang D Optimaler Fahrplan für Anwendungsfall II	D-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DL2	Delivery to Line im Transportmodus zwei
FiFo	First in First out
ggt	Größter gemeinsamer Teiler
GLT	Großladungsträger
ILP	Integer Linear Program
IRV	Innerbetrieblicher Routenverkehr
kgV	Kleinstes gemeinsames Vielfaches
KLT	Kleinladungsträger
LT	Ladungsträger
LP	Ladepositionen
MILP	Mixed Integer Linear Program
MINLP	Mixed Integer Non Linear Program
MTM	Methods-Time Measurement
MTM-MEK	Methods-Time Measurement für Einzel- und Kleinserienfertigung
MTM-SVL	Methods-Time Measurement Standardvorgänge Logistik
MTM-UAS	Methods-Time Measurement Universelles Analysier System
OEM	Original Equipment Manufacturer
PESP	Periodic Event Scheduling Problem
PVB	Produktionsverbauort
RZ	Routenzug
RZS	Routenzugsystem
SPE	Scheduling Periodic Events Problem
SUMA	Supermarkt
WBZ	Wiederbeschaffungszeit
WMS	Warehousemanagement-System

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A^r	–	Transportangebot einer Route r
A_i	m^2	Grundfläche eines Ladungsträgers des Materials i
A_{RZ}	m^2	Verfügbare Ladefläche pro Routenzug
α_λ	–	Fahrplanwirkungsgrad
α'_c	–	Fahrplanwirkungsgrad bei maximaler Kapazitätsauslastung der Routenzüge und gegebener Routenzug- und Mitarbeiteranzahl C
$c_\tau(\lambda_i^r)$	–	Eine binäre Variable, ob eine Tour λ_i^r aus dem aktuellen Systemtakt zum Zeitpunkt τ aktiv oder inaktiv ist
C	–	Maximum der gleichzeitig aktiven Touren pro Systemtakt (notwendige Ressourcenanzahl)
C_τ	–	Gesamtzahl aktiver Touren zum Zeitpunkt τ
$d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$	–	der minimale zeitliche Abstand zwischen 2 Abfahrtszeiten τ der Routen i und j
$d_\tau(\lambda_i^r)$	–	Eine binäre Variable, ob eine Tour λ_i^r aus einem vorherigen Systemtakt zum Zeitpunkt τ aktiv oder inaktiv ist
$\eta_{K,r}$	–	Kapazitiver Nutzungsgrad einer Route r
$f_{Tour,r}$	$\frac{1}{min}$	Tourenfrequenz einer Route r
I^{frei}	–	Die Menge freier Taktzeitmultiplikatoren eines Teilproblems q innerhalb des integrierten Routenzugtakt-Problems
$I^{gebunden}(q)$	–	Die Menge gebundener Taktzeitmultiplikatoren eines Teilproblems q innerhalb des integrierten Routenzugtakt-Problems
i^r	–	Taktzeitmultiplikator der Route r
$K_{LP,RZ}$	–	Transportkapazität eines Routenzugs in Anzahl Ladepositionen
$K_{LP,Tour}$	–	Transportkapazität einer Tour in Anzahl Ladepositionen
$K_{LT,RZ}$	–	Transportkapazität eines Routenzugs in Anzahl Ladungsträgern
l_i	m	Abmessung eines Ladungsträgers des Materials i in Packrichtung
l_{RZ}	m	Verfügbare Ladelänge pro Routenzug
$ \lambda $	–	Gesamtanzahl an Touren im Fahrplan

λ_i^r	–	Eine Tour i auf Route r innerhalb eines Systemtakts
$\overline{\lambda_{LT,h}}$	$\frac{1}{min}$	Mittlerer Ladungsträger-Durchsatz an einer Haltestelle h
$\overline{\lambda_{LT,i}}$	$\frac{1}{min}$	Mittlerer Ladungsträger-Durchsatz des Materials i
$\lambda_{p,LT,r}$	$\frac{1}{min}$	Ladungsträger-Grenzdurchsatz einer Route r
$\overline{\lambda_{LT,VG,H}}$	$\frac{1}{min}$	Mittlerer Ladungsträger-Durchsatz der verbrauchsgesteuerten Materialien an einer Haltestelle h
N^r	$\frac{1}{min}$	Transportnachfrage einer Route r
n_B	–	Anzahl unabhängig nutzbarer Beladeressourcen
$n_{Bedarf,i}$	$\frac{1}{Zeiteinheit}$	Bedarfsmenge des Materials i über einen bestimmten Betrachtungszeitraum
$n_{Füll,i}$	–	Ladungsträgerfüllmenge des Materials i
$n_{LP,i}$	–	Anzahl Ladepositionen, welche ein Ladungsträger des Materials i vereinnahmt
$n_{LP,RZ}$	–	Verfügbare Anzahl an Ladepositionen pro Routenzug
$n_{Stell,i}$	–	Verfügbare Anzahl an Stellplätzen am Bereitstellort des Materials i
$n_{TpP,i}$	–	Teile pro Produkt
$p_{Halten,h}$	–	Wahrscheinlichkeit, dass an einer Haltestelle h angehalten werden muss
$p_{Nachschub,h}$	–	Wahrscheinlichkeit, dass an einer Haltestelle h Nachschubaufträge ausgelöst werden müssen
$p_{Tausch,h}$	–	Wahrscheinlichkeit, dass an einer Haltestelle h Ladungsträger getauscht werden müssen
$P_{VQ,i}$	–	Wahrscheinlichkeit, dass ein Material in einer Produktvariante enthalten ist (Verbauquote)
q	–	Ein formuliertes Teilproblem innerhalb des integrierten Routenzugtakt-Problems
$t_{Auslager}$	min	Vorlaufzeit für die Auslagerung
$t_{Bedarf,i}$		Vorlaufzeiten für die Bedarfsübermittlung des Materials i
$t_{BI,i}$	min	Maximales zulässiges Versorgungsintervall des Materials i
$t_{BZ,r}$	min	Beladezeit im Routenzugbahnhof einer Tour auf Route r
$t_{EZ,r}$	min	Entladezeit im Routenzugbahnhof einer Tour auf Route r

$t_{FZ,r}$	<i>min</i>	Fahrzeit für die gesamte zurückzulegende Wegstrecke einer Tour auf Route r
$t_{HZ,r}$	<i>min</i>	Haltestellenzeit einer Tour auf Route r
$t_{LB,r}$	<i>min</i>	Gesamtzeit für Ladungsträgerbereitstellung und ggf. Einsammeln von Leergut sowie Auslösen von Nachschubaufträgen einer Tour auf Route r
t_n^r	<i>min</i>	Abfahrtszeit einer Tour n auf Route r
t_{PT}	<i>min</i>	Produktionstakt
t_{RZF}	<i>min</i>	Minimal zulässige Routenzugfolgezeit im Bahnhof
$t_{RW,i}$	<i>min</i>	Reichweite eines Ladungsträgers des Materials i
$\overline{t_{RW,i}}$	<i>min</i>	Mittlere Reichweite eines Ladungsträgers des Materials i
t_{Signal}	<i>min</i>	Vorlaufzeit für die Signalisierung eines Verbrauchs
$t_{SO,r}$	<i>min</i>	Zeiten für sonstige Tätigkeiten einer Tour auf Route r
T_{ST}	<i>min</i>	Systemtakt des Routenzugsystems
$t_{Takt,min}$	<i>min</i>	Minimal zulässige Taktzeit innerhalb eines Routenzugsystems
$t_{Takt,r}, t_{Takt}^r$	<i>min</i>	Taktzeit der Route r
$t'_{Takt,r}$	<i>min</i>	Taktzeit der Route r bei maximaler Kapazitätsauslastung
$t_{Transport,i}$	<i>min</i>	Vorlaufzeit für den Materialtransport zum Bedarfsort des Materials i
$t_{UZ,r}, t_{UZ}^r$	<i>min</i>	Umlaufzeit der Route r
t'_{UZ}	<i>min</i>	Umlaufzeit der Route r bei maximaler Kapazitätsauslastung
$t_{VI,i}$	<i>min</i>	Maximal zulässiges Versorgungsintervall des Materials i
t_{WBZ}	<i>min</i>	Maximal einzuhaltende Wiederbeschaffungszeit
τ_0^r	<i>min</i>	Initialer Startzeitversatz einer Route r innerhalb eines Systemtakts
τ_i^r	<i>min</i>	Abfahrtszeit der i-ten Tour einer Route r innerhalb eines Systemtakts
$US(q)$	–	Die untere Schranke eines Teilproblems q innerhalb des integrierten Routenzugtakt-Problems
V_i	m^3	Volumen eines Ladungsträgers des Materials i
v^r	–	Anzahl an Touren einer Route r pro Systemtakt
V_{RZ}	m^3	Verfügbares Ladevolumen pro Routenzug

1 Ausgangssituation und Inhalt der Arbeit

1.1 Herausforderungen der Produktionsversorgung

Bereits seit Jahrzehnten wird die Logistik durch drei Megatrends¹ wesentlich geprägt: **Steigende Kundenanforderungen** in Bezug auf Preis, Service, Liefertreue, Lieferzeit und Individualisierbarkeit der angebotenen Produkte verlangen von Produktions- und Logistiknetzwerken ein neues Maß an Flexibilität ab. **Globalisierung** führt zu einer erhöhten Konkurrenz und insgesamt komplexeren Beschaffungs-, Produktions- und Absatznetzwerken. Nicht zuletzt führen **Innovationen und neue Technologien** dazu, dass sich Produktlebenszyklen² verkürzen und damit in immer kürzeren Abständen neue bzw. geänderte Produkte in bestehende Produktions- und Lieferantennetzwerken integriert werden müssen [Fon-2013, S. 24ff.; Arn-2008a].

Diese Megatrends wirken in vielfältiger Weise auch auf die Produktionslogistik. So führt eine zunehmende Individualisierung von Produkten dazu, dass mehr Varianten eines Produkts angeboten werden müssen um am Markt erfolgreich zu sein. Diese Entwicklung wird durch eine Studie des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung aus dem Jahr 2003 bestätigt. So urteilten 75 % der insg. 1.118 Befragten aus der Metall- und Elektroindustrie, dass die Anzahl an angebotenen Varianten stark (24 %) bzw. etwas (51 %) gestiegen ist [Kin-2005, S. 3]. Ein Trend, der weiter anhält. Würde die Nachfrage in selbem Maße wie die Variantenzahl steigen, könnte darauf durch eine Skalierung der Produktionskapazitäten reagiert werden, ohne dass dadurch eine größere Flexibilität der Logistik gefordert würde. Allerdings ist zu erkennen, dass die Variantenanzahl schneller steigt als die Nachfrage. Hierzu zeigt Abbildung 1-1 beispielhaft die Anzahl hergestellter Fahrzeuge der BMW-Group im Vergleich zur Anzahl an angebotenen Modellreihen bezogen auf das Vergleichsjahr 2005.

¹ Fontius nennt zusätzlich Nachhaltigkeit als 4. Megatrend.

² Arndt nennt verkürzte Produktlebenszyklen als eigenen Megatrend, weist jedoch auch darauf hin, dass dieser wiederum eine Folge steigender Kundenanforderungen und Konkurrenzdruck aufgrund Globalisierung ist [Arn-2008a].

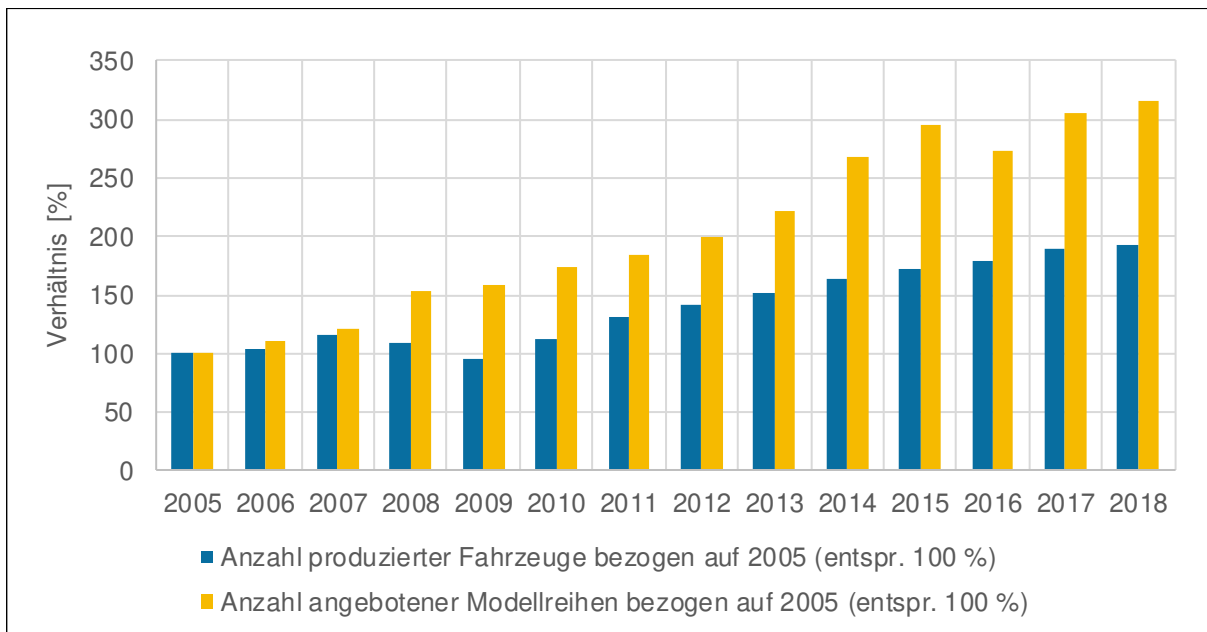


Abbildung 1-1: Anzahl produzierter Fahrzeuge und Anzahl angebotener Modellreihen bezogen auf das Vergleichsjahr 2005 am Beispiel der BMW Group [Sta-2019; Tre-2019; BMW-2019b; BMW-2019a]

2005 wurden durch die BMW-Group ca. 1,32 Mio. Fahrzeuge produziert und es wurden 19 Modellreihen angeboten. Zwar hat sich die Stückzahl im Jahr 2018 mit ca. 2,54 Mio. Fahrzeugen nahezu verdoppelt, die Variantenanzahl stieg im gleichen Zeitraum allerdings um mehr als das Dreifache (60 Modellreihen in 2018) [Sta-2019; Tre-2019; BMW-2019b; BMW-2019a]. Eine zunehmende Anzahl an Varianten bei gleichzeitig geringerer Stückzahl je Variante fordert bestehende Produktionsstrukturen flexibler in Bezug auf Volumen und Variantenvielfalt zu nutzen. Für die Produktionsversorgung bedeutet dies eine Zunahme des zu handhabenden Materials. Aufgrund der Flächenrestriktionen in der Produktion geraten hier bisherige Bereitstellarten, also beispielsweise die sortenreine Bereitstellung des Materials in Großladungsträger, an ihre Grenzen. Zudem steigt die Verwechslungsgefahr bei hoher Variantenzahl. Eine Reduzierung der Behältergrößen und ein steigender Anteil an vorkommissionierten oder sequenzierten Material ist unumgänglich, um die wachsenden Varianten auf gleicher Fläche abzubilden. Dies führt jedoch wiederum zu einem höheren Behälterumschlag sowie größeren Schwankungen des Behälterumschlages führt [Arl-2012]. Neben der Erhöhung der Variantenzahl sinken aber gleichzeitig die Produktlebenszyklen der einzelnen Varianten, was wiederum eine Folge gesteigerter Kundenanforderungen, immer kürzerer Innovationszyklen sowie einem gestiegenen Wettbewerbsdruck durch die Globalisierung ist. Neue Produkte müssen in geringeren Abständen in das Netzwerk integriert werden und laufen aber auch früher wieder aus. Von der Produktionsversorgung wird dadurch eine höhere Reaktionsfähigkeit in Bezug auf Sachnummernanzahl und Wiederbeschaffungszeiten gefordert [Cao-2011; Arn-2008a, S. 9f.]. Die zuvor beschriebenen Auswirkungen

dieser Megatrends auf die Produktionslogistik sind in folgender Abbildung nochmals zusammenfassend dargestellt.

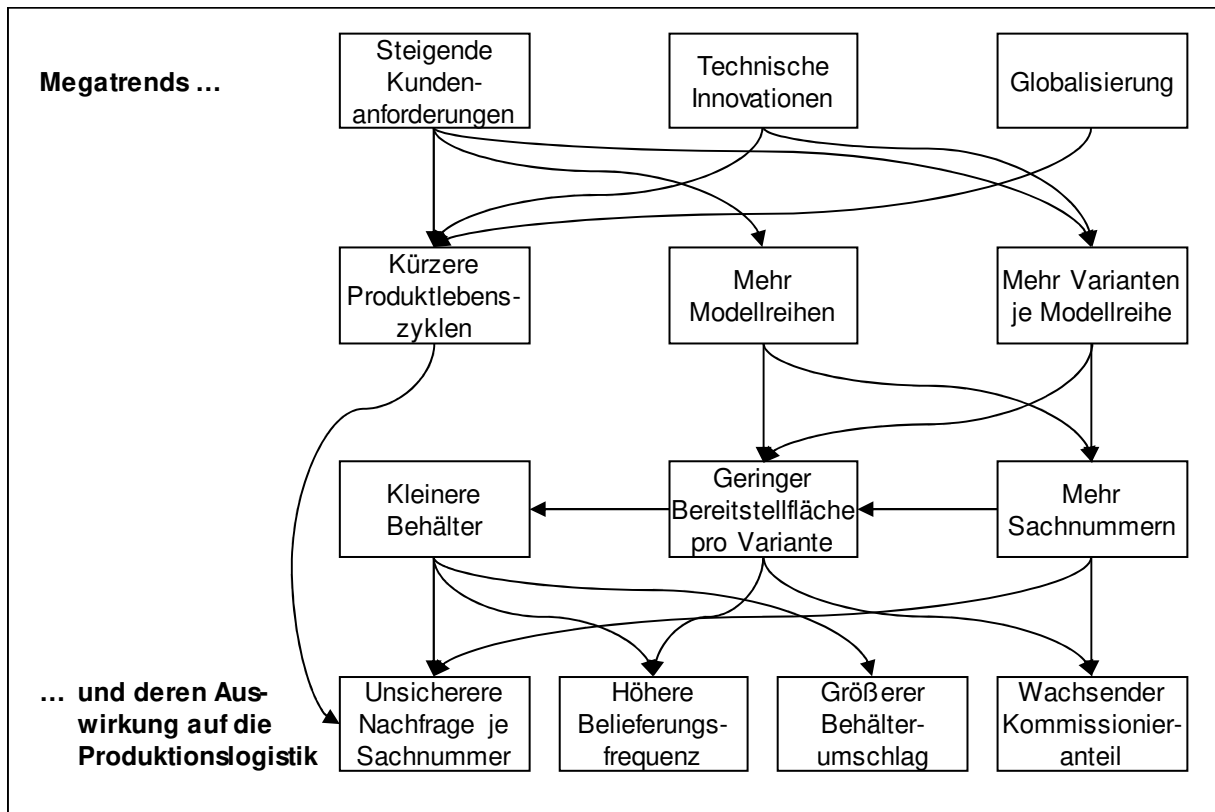


Abbildung 1-2: Wirkmodell der Megatrends auf die Produktionslogistik (basierend auf [Fon-2013; Arl-2012; Arn-2008a])

1.2 Produktionsversorgung durch Routenzugsysteme

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Herausforderungen basieren moderne Logistikkonzepte zur Produktionsversorgung in zunehmendem Maße auf „just in time“ Ansätzen für die Bereitstellung von Material. Das Vorhalten geringer Bestände am Arbeitsplatz bietet darüber hinaus zahlreiche Vorteile, da sich das in der Produktion gebundene Kapital (in Form von Fläche und Material) reduzieren lässt. Für den innerbetrieblichen Transportprozess lassen sich daraus folgenden Anforderungen zusammenfassen:

- Hochfrequente innerbetriebliche Transporte kleiner Einheiten
- Bereitstellung nur desjenigen Materials, welches auch unmittelbar am Bedarfsort benötigt wird
- Flexibilität hinsichtlich Bereitstellungsarten und Ladeeinheiten

Diese Anforderungen erfüllen Direkttransporte³, in denen die Bedarfsorte (Senken) mit vorgelagerten Prozessen (Quellen) in einer 1:1-Relation verknüpft sind, nur bedingt: Diese werden typischerweise mittels Gabelstaplern ausgeführt [Nyh-2012, S. 311], welche Aufträge für mehrere Bedarfsorte nacheinander ausführen. Da dadurch jeder einzelne Bedarfsort nur in einer vergleichsweise geringen Frequenz versorgt werden kann, sind hohe Sicherheitsbestände die Folge [Dro-2013a, S. 15; Bau-2004, S. 67f.].

Bei Sammeltransporten⁴ hingegen werden mehrere Bedarfsorte gesammelt in einer Tour bedient. Da unterschiedliche Materialien auf derselben Tour transportiert werden, können auch kleine Chargen und Behälter effizient geliefert werden [Bau-2004, S. 68]. Finden die Touren zudem auf festgelegten Routen⁵ statt, werden alle Bedarfsorte in deutlich höherer Frequenz passiert, was zu einer Reduzierung der Wiederbeschaffungszeit im Vergleich zu Direkttransporten führt [Sta-2015; Boz-2013]. Dadurch lassen sich die Sicherheitsbestände und notwendigen Bereitstellflächen in der Produktion reduzieren [Boz-2013; Kar-2007]. Innerbetriebliche Transportsysteme, welche im Modus Sammeltransport betrieben werden, werden in Wissenschaft und Praxis als Routenzugsysteme bezeichnet⁶. Häufig bestehen diese Routenzugsysteme aus einem Schleppfahrzeug mit mehreren Anhängern, für welche wiederum unterschiedliche Transporthilfsmittel⁷ verfügbar sind, um den effizienten Transport von Klein- und Großladungsträgern zu gewährleisten [Gün-2012, S. 46ff.].

Da Routenzugsysteme alle eingangs gestellten Anforderungen unterstützen, sind diese mittlerweile integraler Bestandteil vieler Logistikkonzepte zur Produktionsversorgung und finden vermehrt Anwendung [Lie-2017, S. 24; Gün-2012, S. 8].

1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Bei der Ausgestaltung von Routenzugsystemen existieren sowohl in den Abläufen, der Steuerung des Routenzugsystems als auch bei der verwendeten Technik zahlreiche Freiheitsgrade, welche sich gegenseitig beeinflussen. So hat beispielsweise die Routenführung innerhalb des Systems Einfluss auf den Behälterdurchsatz auf einer Route, was wiederum Änderungen an der geforderten Versorgungsfrequenz nach sich ziehen kann. Die Planung von Routenzugsystemen stellt somit eine komplexe Aufgabenstellung dar. Erschwerend kommt hinzu, dass logistische Systeme

³ Eine genauere Definition des Transportmodus Direkttransport erfolgt in Abschnitt 2.1

⁴ Eine genauere Definition des Transportmodus Sammeltransport erfolgt in Abschnitt 2.1

⁵ Eine Route beschreibt in diesem Zusammenhang einen festgelegten Fahrweg, auf dem die Transportmittel verkehren und die der Route zugewiesenen Bedarfsorte zyklisch mit Material ver- und entsorgen. Es sind jedoch auch andere Steuerungsformen von Routenzugsystemen möglich. Siehe hierzu Abschnitt 2.2.3

⁶ Eine genauere Definition des Begriffs Routenzugsystem erfolgt in Abschnitt 2.1

⁷ Abschnitt 2.2.4 bietet einen Überblick über die technische Gestaltung von Routenzugsystemen

fortwährenden Änderungen unterworfen sind, welche eine Überplanung bereits bestehender Systeme notwendig machen, um die zeit- und mengengerechte Versorgung der Produktion unter geänderten Rahmenbedingungen sicherzustellen. Wissenschaftliche Ansätze fokussieren zumeist die Routenfindung innerhalb von Routenzugsystemen⁸, wobei sie von einer flexiblen Routenführung und/oder flexiblen Versorgungsfrequenzen ausgehen. Die Forderung nach einem festen Takt als „Rhythmus- und Impulsgeber für alle Produktions- und Logistikprozesse im Unternehmen“ [Klu-2010, S. 257] ist jedoch integraler Bestandteil des Lean-Managements, weshalb die Mehrzahl an Routenzugsystemen in der Praxis nach einem Taktfahrplan ähnlich denen im öffentlichen Verkehr gesteuert wird [Lie-2017, S. 42; Gün-2012, S. 24]. In den Abschnitten 2.3.3 und 3.3 wird hingegen gezeigt, dass die Generierung von Taktfahrplänen für Routenzugsysteme derzeit ein unzureichend betrachtetes Problem in Wissenschaft und Praxis ist. Daher widmet sich diese Arbeit der Beantwortung folgender Forschungsfrage:

Wie kann ein anwendungsorientierter Ansatz zur operativen Planung getakteter Routenzugsysteme in der Produktionslogistik ausgestaltet werden?

Der entwickelte Ansatz soll den Logistikplaner bei der Planung getakteter Routenzugsysteme unterstützen. Ferner soll dieser auch für die kontinuierliche Überplanung bestehender Routenzugsysteme eingesetzt werden können, bspw. wenn die Versorgungsfrequenzen an andere Behälterdurchsätze angepasst werden müssen. Grundsätzlich fokussieren sich die Inhalte dieser Arbeit auf die Kurzfristplanung (operative Planung) von Routenzugsystemen. Taktische Planungsaufgaben wie bspw. die Prozess- und Layoutplanung oder Technikauswahl im Rahmen des Designs neuer Routenzugsysteme werden nicht durchgeführt, wenngleich deren Ergebnisse natürlich während der operativen Planung berücksichtigt werden.

Die Inhalte dieser Arbeit entstanden während der wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik im Rahmen einer Forschungskooperation mit der BMW Group. Darin sind die in Tabelle 1-1 aufgelisteten acht Veröffentlichungen entstanden, auf welche in den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit Bezug genommen wird.

⁸ Für einen umfassenden Literaturüberblick zu Planungs- und Dimensionierungsmethoden für Routenzugsysteme sei an dieser Stelle auf Abschnitt 2.3.3 verwiesen

Tabelle 1-1: Veröffentlichungen des Autors bzw. dessen Mitwirkung mit Bezug zu den Inhalten dieser Arbeit

Kurzbeleg	Titel	Erstautor
[Dew-2012a]	Drive-Thru Loading Concept for InPlant Milk Runs	Ja
[Gün-2012]	Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport - Ergebnisse einer Studie	Nein
[Dew-2013]	Routenzug ist nicht gleich Routenzug	Ja
[Gal-2013]	Drive-Thru für Routenzüge Effizienzsteigerung bei der Beladung von Routenzügen mit Kleinladungsträgern	Nein
[Keu-2014]	Mehr Transparenz Routenzugauswahl - Mehr als eine Investitionsentscheidung	Nein
[Dew-2014]	Fahrplanoptimierung für innerbetriebliche Routenverkehre	Ja
[Gün-2015a]	Der Verbrauch bestimmt den Takt - Erstellung von Fahrplänen für getaktete Routenzüge	Nein
[Sta-2015]	Modelling and Simulating the Assembly Line Supply by Tugger Trains	Nein

1.4 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Zum Erreichen der Zielsetzung ist die Arbeit in neun Kapitel gegliedert: Im ersten Kapitel vermittelte bereits grundlegenden Informationen zur Einordnung der in dieser Arbeit behandelten Problemstellung. Anhand aktueller Megatrends wurden Herausforderungen für die Produktionslogistik insb. im Bereich der Automobilindustrie abgeleitet und Vorteile durch den Einsatz von Routenzügen aufgezeigt. Es folgte eine erste inhaltliche Abgrenzung und eine Darlegung der Struktur dieser Arbeit.

In Kapitel 2 werden Grundlagen zu Routenzugsystemen vermittelt. Hierzu wird aufbauend auf Begriffsdefinitionen ein Überblick zum Routenzugeinsatz in der Produktionslogistik gegeben. Dabei stehen Konzepte zur Organisation und Steuerung sowie notwendige Tätigkeiten bei der Planung von Routenzugsystemen im Fokus. Zudem werden in Wissenschaft und Technik verbreitete Modelle und Methoden zur Dimensionierung von Routenzugsystemen vorgestellt. Grundlage hierfür bilden Literaturrecherchen sowie die Ergebnisse einer Studie.

Kapitel 3 dient der weiteren Eingrenzung der Problemstellung und Präzisierung der Forschungslücke und des Forschungsziels. Die vorgestellten Modelle und Methoden werden zunächst den im vorherigen Kapitel identifizierten Planungstätigkeiten zugeordnet und hinsichtlich Ihrer Eignung zur Erreichung des Forschungsziels bewertet. Darauf aufbauend werden konkrete Anforderungen an den zu entwickelnden Ansatz zur operativen Routenzugplanung abgeleitet und die Forschungsfrage konkretisiert.

Kapitel 4 beschreibt den entwickelten Ansatz in seiner Gesamtheit. Es werden die beiden grundlegenden Planungsaufgaben „Taktzeitplanung“ und „Fahrplanplanung“ hergeleitet sowie deren Wechselwirkungen dargelegt. Darauf aufbauend wird ein Modell präsentiert, wie diese Planungsaufgaben in einem Gesamtplanungsmodell zusammengeführt werden können. Dies bildet die Grundlage für die Struktur der darauffolgenden Kapitel, in denen die Ausgestaltung dieser Planungsaufgaben beschrieben wird.

In Kapitel 5 wird die erste Planungsaufgabe „Taktzeitplanung“ dargelegt. Mittels der präsentierten Berechnungszusammenhänge kann berechnet werden, wie häufig eine Route bedient werden muss, um eine gegebene Transportnachfrage zu decken. Hierzu werden sowohl die Transportnachfrage als auch das Transportangebot analytisch beschrieben.

Kapitel 6 widmet sich der zweiten identifizierten Planungsaufgabe „Fahrplanplanung“. Aufbauend auf einer erfolgten Taktzeitplanung wird der Frage nachgegangen, wie ein Routenzugfahrplan ausgestaltet sein muss, sodass er mit einer minimalen Anzahl an Ressourcen, d. h. Routenzügen und Mitarbeitern, ausgeführt werden kann. Hierzu werden zunächst Formeln präsentiert, mit Hilfe derer die Dauer einer Tour bestimmt und ein Taktfahrplan analytisch beschrieben werden kann. Diese werden zu einem mathematischen Optimierungsmodell zusammengeführt, mit dessen Hilfe ein überschneidungsfreier und einsatzoptimaler Routenzugfahrplan generiert werden kann.

In Kapitel 7 werden die einzelnen Planungsaufgaben in einem integrierten Gesamtplanungsmodell zusammengeführt. Dieses wird ebenfalls durch ein mathematisches Optimierungsproblem repräsentiert. Zur Lösung wird ein Branch & Bound Algorithmus hergeleitet, welcher die Taktzeiten und den resultierenden Routenzugfahrplan optimal bestimmt.

Kapitel 8 beschreibt die Evaluierung des entwickelten Ansatzes zur operativen Routenzugplanung anhand zweier Fallbeispiele aus der Automobilindustrie.

Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung sowie der Ableitung weitergehender Forschungsaspekte.

2 Stand der Forschung und Technik für Routenzugsysteme

Dieses Kapitel vermittelt die notwendigen Grundlagen zur Gestaltung und Planung von Routenzugsystemen. Abschnitt 2.1 behandelt grundlegende Begriffe zur Definition und Abgrenzung von Routenzugtransporten zu anderen Transportarten. Aufbauend darauf werden in Abschnitt 2.2 mögliche Gestaltungsformen für Routenzugsysteme beschrieben und eine Morphologie zur Einordnung von Routenzugsystemen erarbeitet. Abschnitt 2.3 widmet sich schließlich dem Vorgehen bei der Planung von Routenzugsystemen. Dieses Kapitel schließt mit Abschnitt 2.3.3, in welchem ein Überblick zu bestehenden Planungsverfahren und -modellen zur operativen Routenzugplanung gegeben wird.

2.1 Grundlegende Begriffsbestimmungen

Innerhalb dieses Abschnitts wird ein Überblick zu verwandten Begrifflichkeiten und Konzepten im Kontext Routenzugsysteme gegeben, Definitionslücken aufgezeigt und daraus eine einheitliche Nomenklatur für diese Arbeit abgeleitet.

Wesentliche Bestandteile des Routenzugkonzeptes waren bereits in dem bis in das 20. Jahrhundert, insb. in Großbritannien und den USA, verbreiteten Konzept der Milchbelieferung enthalten [Dro-2013b, S. 27]. Darin übernimmt ein „Milchjunge“ (engl. milkman) die Auslieferung voller Milchflaschen von einer regionalen Molkerei oder Verteilzentrum auf einer festgelegten Route und tauscht dabei volle gegen leere Milchflaschen im eins-zu-eins Tausch [Pio-2013, S. 175; Wer-2013, S. 262f.].

Das Prinzip eines gebündelten Transports mit integriertem Leerguttausch wurde auf die (externe) Beschaffungslogistik adaptiert. Der **milk run** oder **Sammelrundtour-Transport** bildet dabei neben dem Direkt- und Sammelguttransport eines der drei Haupttransportkonzepte [Klu-2010, S. 212; VDA-5010], welche in Abbildung 2-1 dargestellt sind.

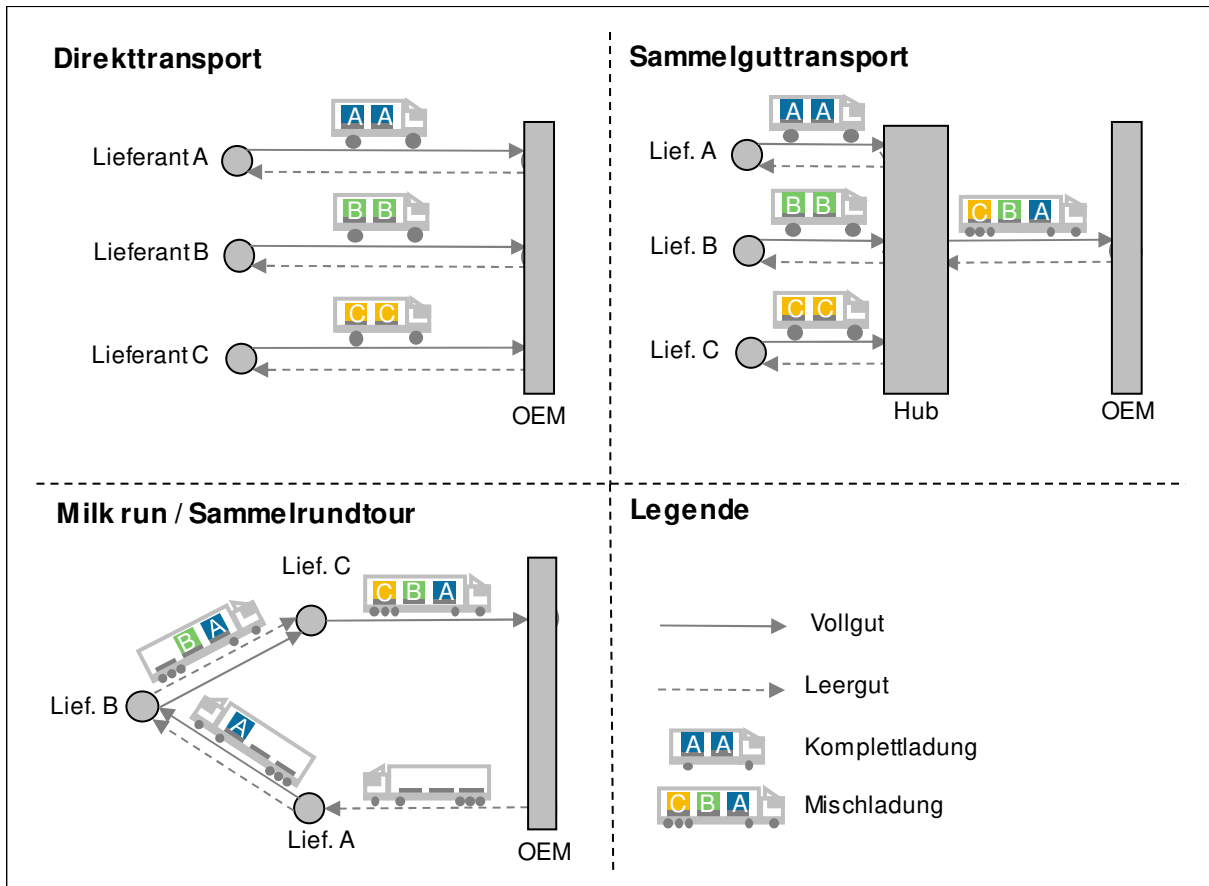


Abbildung 2-1: Standardbelieferungskonzepte in Anlehnung an [Klu-2010, S. 224]

Während beim Direkttransport die Ware direkt von jedem Lieferanten ohne Umschlag zum Werk geliefert wird, werden beim Sammelguttransport die Lieferungen der Lieferanten in einem Hub gesammelt und von dort konsolidiert zum Werk geliefert. Eine weitere Möglichkeit der Belieferung bildet der Milk Run / Sammelrundtour: *Gudehus* definiert einen milk run als einen quellengemischten Transport, bei dem kleinere Warenmengen von mehreren Quellen in einer Sammeltour abgeholt und einem (naheliegenden) Zielort zugestellt werden [Gud-2011, S. 17]. *Piontek* konkretisiert die charakteristischen Merkmale eines Milk runs wie folgt [Pio-2013, S. 176]:

- Direkter Transport ohne Umschlag
- Vorgegebene Route / Strecke und Stationen
- Festgelegte Mengen / Volumen
- Vorgeschriebene Zeitfenster für Abholungen und Lieferung
- Integrierte Leergutabwicklung

Sind die Randbedingungen für den Einsatz externer milk runs gegeben⁹, lassen sich dadurch zahlreiche Vorteile realisieren. So führt eine hochzyklische Belieferung mit kleineren Sendungsgrößen zu geringeren Beständen und damit auch einer Reduzierung der benötigten Lagerflächen [Pio-2013, S. 176f.; Wan-2010, S. 365]. Ein weiterer Effekt einer erhöhten Anlieferfrequenz ist die Glättung des Transportvolumens, was insgesamt zu einer Harmonisierung der Logistikkette und einer besseren Planbarkeit beitragen kann [Arl-2012]. Dadurch lassen sich die Transportmittel höher auslasten und die Routen und Anlieferzyklen an aktuelle Transportbedarfe anpassen, was zu einer Senkung der Transportkosten führen kann. *Wildemann und Niemeyer* nennen hier exemplarisch Kostensenkungspotenziale von bis zu 30 % [Wil-2006].

Innerbetrieblich wurden an das Sammelrundtourprinzip angelehnte Transportkonzepte realisiert, welche im Rahmen dieser Arbeit als **innerbetriebliche Routenverkehre** bezeichnet werden. In deutsch- und englischsprachiger Fachliteratur werden allerdings unterschiedliche Begrifflichkeiten teils synonym zueinander verwendet:

- Deutsch:
 - Innerbetrieblicher / interner milk run
[Dro-2013b; Bru-2012, S. 16ff.; Nyh-2012, S. 297]
 - Routenzug
[Gün-2012, S. 15f.]
 - Schleppzug-Transport
[Gud-2011, S. 804ff.; Klu-2010, S. 184ff.]
 - Zirkulierendes Transportsystem
[Tak-2013, S. 75ff.]
- Englisch:
 - In-plant milk run
[Boz-2013; Kil-2012; Dro-2011; Bau-2004, S. 67ff.]
 - Tow / tigger train
[Aln-2013; Boz-2013; Emd-2012b]

Nach *Günthner et al.* ist ein innerbetrieblicher Routenverkehr dadurch charakterisiert, dass ein Transportfahrzeug mehrere¹⁰ Bereitstellorte (Senken) mit unterschiedlichen Materialien auf einer Tour beliefert und hierzu auf einer festgelegten Route (Fahrweg) zwischen den Bereitstellorten verkehrt [Gün-2012, S. 15f.]. *Emde und Boysen* spezifizieren weiter, dass die Transportfahrten durch ein manuell bedientes Schleppfahrzeug

⁹ Die VDA-Empfehlung 5010 und Klug geben einen Überblick zu wichtigen Kriterien und Randbedingungen zur Auswahl des geeigneten Transportkonzepts [VDA-5010; Klu-2010, S. 216ff.].

¹⁰ Bei einem Bereitstellort pro Tour würde es sich um einen Direkttransport handeln, also keine Sammelrundtour

mit mehreren Anhängern ausgeführt werden. Nach *Klug* bestehen die Anhänger aus einem Stahlrahmen mit vier Rollen und Deichsel und sollten derart konstruiert sein, dass diese unterschiedliche Ladungsträgerabmessungen transportieren können [Klu-2010, S. 184f.].

Darüber hinaus zählen *Bozer und Ciemnoczowski* einen hochfrequenten Materialnachschub in genau festgelegten Intervallen nach einem festen Takt und Fahrplan als grundlegende Eigenschaft eines innerbetrieblichen Routenverkehrs [Boz-2013]. So vergleicht *Baudin* einen Routenverkehr mit Transportsystemen des öffentlichen Nahverkehrs, bei dem die Ankunfts- und Abfahrtszeiten von bspw. Bussen oder U-Bahnen je Station über Fahrpläne festgelegt sind [Bau-2004, S. 68]. Bei der Festlegung von Routen und Taktzeiten, in denen Transportfahrzeuge auf diesen Routen fahren, müssen nach *Kilic, Durmusoglu und Baskak* zahlreiche Restriktionen wie bspw. verfügbare Flächen zur Materialbereitstellung, die Größe der Fahrzeugflotte und deren Transportkapazitäten berücksichtigt werden [Kil-2012].

Takeda fasst obige Eigenschaften in seiner Definition eines zirkulierenden Transportsystems wie folgt zusammen: „Auf den Wagen sind für die Herstellung eines bestimmten Teils notwendige Vormaterialien satzweise gemischt zusammengestellt. Es werden verschiedene Bearbeitungsstationen versorgt. Der Transportwagen soll nach Fahrplan in bestimmten Intervallen Material an die Linien heranbringen und abziehen.“ [Tak-2013, S. 75].

Auf Basis dieser Literaturübersicht lassen sich folgende Definitionslücken erkennen:

1. Eine einheitliche Definition für das Transportkonzept innerbetrieblicher Routenverkehr existiert nicht.

Jeder Autor schließt einige spezifische Ausprägungsformen eines innerbetrieblichen Routenverkehrs mit in dessen Definition ein (bspw. fester Taktfahrplan, betrieben mit Schleppzug), wodurch wiederum andere, ebenfalls denkbare Ausprägungen, mit dieser Definition ausgeschlossen würden.

2. Ein innerbetrieblicher Routenverkehr ist kein milk run.

Der Begriff milk run steht für ein externes Sammeltransportkonzept, bei dem mehrere Lieferanten (Quellen) mit einem Empfangswerk (Senke) in einer n:1-Korrelation verknüpft sind (vgl. Abbildung 2-1). Innerbetrieblich handelt es sich allerdings oftmals um Verteilverkehre, in denen aus einem zentralen Lager (Quelle) mehrere Bereitstellorte (Senken) in einer 1:m-Korrelation beliefert werden.

3. Eine Begriffsdefinition sollte den Gestaltungsspielraum für individuelle Ausprägungen erhalten.

Aufgrund der vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten von Materialflussprozessen und Steuerung eines innerbetrieblichen Routenverkehrs (vgl. Abschnitt 2.2) erscheint eine Einschränkung hinsichtlich deren Ausprägungen im Rahmen der Begriffsdefinition als nicht sinnvoll. Bspw. werden in der Praxis innerbetriebliche Routenverkehre teils getaktet nach Fahrplan gesteuert. In anderen Anwendungsfällen erfolgt die Festlegung der Abfahrtszeiten flexibel anhand des aktuellen Transportvolumens oder wird gänzlich den operativen Mitarbeitern überlassen [Gün-2012, S. 39f.].

Umfangreiche Übersichten zu möglichen Gestaltungsformen innerbetrieblicher Routenverkehre bieten *Droste, Brungs* und *Günthner et al.*, welche die Grundlage für die Abschnitte 2.2.1 bis 2.2.4 bilden [Dro-2013b; Bru-2012; Gün-2012]. Allerdings verzichten diese auf eine klare Definition oder Abgrenzung der Begriffe, weshalb im Folgenden eine möglichst allgemeingültige und für diese Arbeit einheitliche Begriffsdefinition erarbeitet wird.

Innerbetrieblicher Routenverkehr

Als innerbetrieblicher Routenverkehr wird ein Konzept zum Transport von Material für begrenzte Entfernungen verstanden, in dem mindestens zwei Haltestellen mit unterschiedlichen Materialien gebündelt ver- oder entsorgt werden. Die Reihenfolge, in welcher die Haltestellen bedient werden, sowie die Fahrwege zwischen den Haltestellen können über s. g. Routen festgelegt sein (statische Routenführung, vgl. Abschnitt 2.2.3). Ein innerbetrieblicher Routenverkehr kann eine Verteilfunktion von Material übernehmen, bei dem mehrere Senken mit Material aus einer Quelle versorgt werden. Ebenso kann ein innerbetrieblicher Routenverkehr als Sammeltransport ausgebildet sein, bei dem Material von mehreren Quellen zu einer gemeinsamen Senke transportiert wird. Es sind auch Mischkonzepte mit mehreren Quellen und mehreren Senken denkbar.

Routenzugsystem

Als Routenzugsystem wird im Kontext dieser Arbeit ein innerbetriebliches Transportsystem verstanden, welches nach dem Konzept eines innerbetrieblichen Routenverkehrs betrieben wird. Ein Routenzugsystem ist zudem dadurch gekennzeichnet, dass ein oder mehrere Transportmittel ihre Fahrten in einem gemeinsamen **Routenzugbahnhof** starten und sich dort gemeinsame Ressourcen (u. a. Fläche, Transportmittel, Personal) teilen. Der Bahnhof fungiert im Falle von Verteiltransporten als Schnittstelle zu vorgelagerten Prozessen (bspw. dem Wareneingangslager) und im Falle von Sammeltransporten als Schnittstelle zu nachgelagerten Prozessen (bspw. dem Warenaus-

gang oder Fertigwarenlager). Eine einzelne Ver- oder Entsorgungsfahrt innerhalb eines Routenzugsystems wird als **Tour** bezeichnet. Eine Tour startet und endet am Routenzugbahnhof und umfasst alle Tätigkeiten, welche im Rahmen der Materialversorgung bzw. -entsorgung anfallen. Physisch werden zur Ausführung der Touren innerhalb eines Routenzugsystems s. g. **Routenzüge** eingesetzt. Im engeren Sinne werden darunter im Folgenden manuelle bediente, gleislose Flurförderzeuge verstanden, welche entsprechend der obigen Definitionen eine Transportkapazität von mindestens zwei Ladungsträgern besitzen. In der Praxis werden hierzu in vielen Fällen, jedoch nicht ausschließlich, elektrische Schleppfahrzeuge mit mehreren Anhängern eingesetzt [Gün-2012, S. 46ff.].

In Abbildung 2-2 sind die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Begriffe schematisch dargestellt und in einen Zusammenhang gebracht.

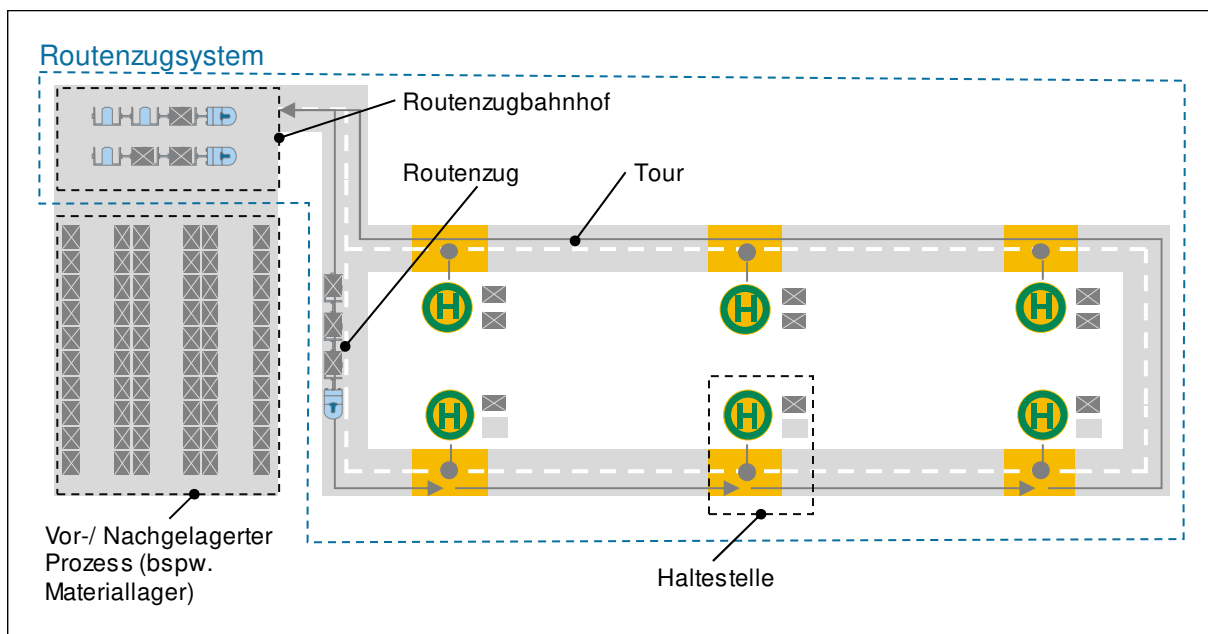


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Routenzugsystems sowie verwendeter Begriffe (eigene Darstellung)

2.2 Organisatorische und technische Gestaltungsmöglichkeiten von Routenzugsystemen

In der betrieblichen Praxis existiert trotz zum Teil ähnlicher Einsatzfelder eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungsformen von Routenzugsystemen, welche sich hinsichtlich Abläufen und Technik stark unterscheiden [Gün-2012, S. 8; Bau-2004, S. 69]. Dieser Abschnitt dient daher dazu, einen Überblick über mögliche Gestaltungsformen zu geben. Wesentliche Elemente hiervon wurden bereits in der im Jahr 2012 durch den Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik veröffentlichten Feldstudie „Stand 14

und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport“ publiziert, an deren Entstehung der Autor ebenfalls mitwirkte [Gün-2012]. Diese werden auf Basis aktueller Literatur ergänzt. Zur systematischen Klassifizierung werden, angelehnt an die Definition eines allgemeinen Transportsystems nach *Martin* sowie *Günthner*, die folgenden Systemelemente separat behandelt [fml-2015b; Mar-2014, S. 98]:

- Transporteinheiten und Transporthilfsmittel: Was wird transportiert?
- Transportorganisation: Welche dispositiven und kontrollierenden Tätigkeiten fallen an und wie wird der Transport gesteuert?
- Transportmittel: Welche Geräte werden für den Transport eingesetzt?

2.2.1 Transporteinheiten

Durch das Systemelement Transporteinheit werden grundsätzliche Alternativen hinsichtlich der zu bewegenden Güter beschrieben. Die Transporteinheit entspricht dabei derjenigen Materialflusseinheit, welche durch einen RZ transportiert wird. Sie bestimmt mit ihren Abmaßen und weiteren Merkmalen (z. B. Gewicht) wesentlich die technische Gestaltung der RZ und Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Prozessen [fml-2015a]. Da die Transporteinheit selbst aus mehreren Transportgütern und Ladehilfsmitteln bestehen kann, ist eine differenzierte Betrachtung notwendig. In Abbildung 2-3 sind die verschiedenen Materialflusseinheiten innerhalb eines Routenzugsystems dargestellt und werden im Folgenden näher beschrieben.

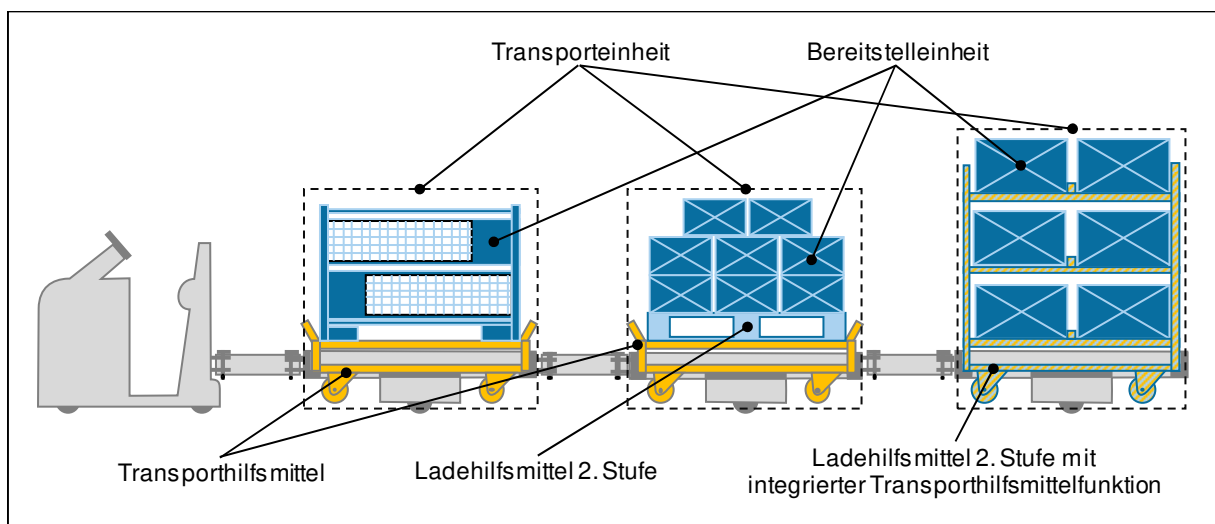


Abbildung 2-3: Materialflusseinheiten innerhalb eines Routenzugsystems (eigene Darstellung)

Die Bereitstelleinheit bezeichnet die Materialflusseinheit, welche im Falle eines Verteiltransports an den Senken entladen oder mit dem der RZ im Falle eines Sammeltransports an den Quellen beladen wird. Dabei kann es sich um Einzelteile oder Ladehilfsmittel handeln. Je nach Anwendungsfall können zudem weitere Ladehilfsmittel, s. g. Ladehilfsmittel zweiter Stufe, zur Bündelung der Bereitstelleinheiten auf dem RZ eingesetzt werden (bspw. Paletten, auf welchen die Bereitstelleinheiten aufgestapelt sind). Die verwendeten Ladehilfsmittel lassen sich nach *Klug* einteilen in Kleinladungsträger (KLT) und Großladungsträger (GLT) [Klu-2010, S. 149ff.]. Für beide Kategorien existieren nationale und internationale Standards, welche Form und Abmessungen spezifizieren. Insbesondere in der Automobilindustrie sind KLT konform zur *VDA-Empfehlung 4500* verbreitet, während für GLT die Europoolpalette nach *EN 13698* und Boxpaletten nach *EN 13626* die wohl wichtigsten Ladehilfsmittel darstellen [VDA-4500; EN-13698; EN-13626]. Spezialladungsträger hingegen sind angepasste, meist individuell konstruiert und gefertigte Ladehilfsmittel. Beispiele hierfür sind auf die Bauteilgeometrie angepasste Kleinladungsträger aus expandierten Polypropylen (s. g. EPP-Behälter) oder Sequenzbehälter zur Bereitstellung von Bauteilen in Montagereihenfolge. Ebenfalls in die Kategorie der Spezial-GLT fallen Fächergestelle oder Tablaraufbauten zur Aufnahme mehrerer KLT.

Da GLT aufgrund Abmessungen und Gewicht nicht ohne Hilfsmittel manuell handhabbar sind, können weitere Transporthilfsmittel zum Einsatz kommen, welche eine ebenerdige Handhabung oder Übergabe auf Fördertechnik i. d. R. durch Ziehen oder Schieben ermöglichen. Durch zusätzliche Installationen wie bspw. Rollen kann auch die Bereitstelleinheit oder das Ladehilfsmittel zweiter Stufe die Funktion eines Transporthilfsmittels übernehmen.

Die beschriebenen Ausführungen der Transporteinheiten im Routenzugsystem sind im morphologischen Kasten gemäß Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Morphologie Transporteinheit

Merkmal	Gestaltungsvarianten				
Bereitstelleinheit	Einzelteil	Standard-KLT	Spezial-KLT	Standard-GLT	Spezial-GLT
Ladehilfsmittel 2. Stufe	Nicht vorhanden	Standard-KLT	Spezial-KLT	Standard-GLT	Spezial-GLT
Transporthilfsmittel	Nicht vorhanden	Trolley	Tragrahmen (zur Übergabe auf Rollenbahn)	Funktionell integriert in Bereitstelleinheit	Funktionell integriert in Ladehilfsmittel 2. Stufe

2.2.2 Gestaltungsfeld Transportorganisation – Routenzugprozess

Die Ausgestaltung der dispositiven und kontrollierenden Tätigkeiten, welche auf einer Routenzugtour anfallen, werden durch das Systemelement Routenzugprozess als Bestandteil der Transportorganisation beschrieben. Diese lassen sich in Tätigkeiten bei der Routenzugbe- und –entladung einteilen, wobei die vorherrschende Transportrelation die Wiederholungszahl dieser Tätigkeiten während einer Tour bestimmt. Bei Verteiltransporten wird der RZ i. d. R. an einer zentralen Quelle beladen und an mehreren Senken entladen, während bei Sammeltransporten die Beladung an mehreren (dezentralen) Quellen erfolgt und der RZ anschließend an einer zentralen Senke entladen wird.

Die Routenzugbeladung kann durch den RZ-Fahrer selbst erfolgen oder von einem separaten Logistikmitarbeiter durchgeführt werden. Die Zusammenstellung der Transporteinheiten zu einer RZ-Tour gestaltet sich im komplexesten Fall dreistufig. Hierzu werden die Bereitstellereinheiten zunächst aus einem manuellen oder automatisierten Lager oder Supermarkt entnommen und ggf. auf Ladehilfsmittel kommissioniert. Diese werden anschließend an einem Routenzugbahnhof auf Transporthilfsmittel oder Routenzuganhänger verladen und bis zum Start der Tour zwischengepuffert. In einem dritten Handhabungsschritt wird schließlich der Routenzug für eine Tour bspw. durch an-kuppeln mehrerer Anhänger zusammengestellt. An den Senken wird der RZ entweder durch den RZ-Fahrer selbst oder einen separaten Logistikmitarbeiter, welcher die Feinverteilung der Bereitstellereinheiten übernimmt, entladen [Gün-2016, S. 44]. Das Einsammeln von Leergut kann im Routenzugprozess in Form eines 1:1-Tauschs oder einer Mitnahme auf Sicht integriert sein oder durch einen separaten Prozess abgewickelt werden.

Die beschriebenen Ausprägungen des Routenzugprozesses sind im morphologischen Kasten gemäß Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Morphologie Routenzugprozess

Merkmal		Gestaltungsvarianten				
Transportrelation		Verteiltransport (1:m)		Sammeltransport (n:1)		Gemischter Transport (m:n)
Routenzugbelastung	Prozessschnittstelle an Quelle(n)	Manuelles Lager	Automatisiertes Lager	Supermarkt	Pufferfläche	Arbeitsplatz
	Art der Kommissionierung	Als Teil der Tour			Vorgepuffert	
	Anzahl Handhabungsstufen	1-stufig		2-stufig		3-stufig
Routenzugentlastung	Prozessschnittstelle an Senke(n)	Manuelles Lager	Automatisiertes Lager	Supermarkt	Pufferfläche	Arbeitsplatz
	Art der Feinverteilung	Als Teil der Tour			Nachgelagert	
	Leergutabwicklung	1:1-Tausch		Mitnahme auf Sicht		Separater Leergutprozess

2.2.3 Gestaltungsfeld Transportorganisation – Routenzugsteuerung

Die Routenzugsteuerung spezifiziert die Transportorganisation hinsichtlich der dispositiven, zumeist IT-gestützten Entscheidungen, welche im Vorfeld an eine Tour getroffen werden. Hierunter fallen die Strategien zur Nachschubsteuerung und Disposition von Transportaufträgen, die Festlegung der Abfahrtszeitpunkte und der Routenführung, sowie Regeln zur Zuweisung von Fahrzeugen und Fahrern auf Touren. Die jeweiligen Charakteristika werden im Folgenden beschrieben.

Die Nachschubsteuerung legt fest, auf welche Weise ein Transportbedarf ermittelt wird. Es wird zwischen bedarfs- und verbrauchsorientierten Verfahren unterschieden. Bedarfsgesteuerte Systeme basieren auf dem s. g. Push- oder Bring-Prinzip [Bul-1994, S. 15ff.]. Ausgehend vom geplanten Produktionsprogramm (Primärbedarfen) wird der Bedarf an Sekundärmaterial je Bereitstellort stückzahlgenau berechnet und terminiert [Nyh-2012, S. 294]. Die hierzu notwendige Stücklistenauflösung und Nettobedarfsrechnung ist in der Praxis in der s. g. MRP-Funktion (Material Requirements Planning) eines PPS-Systems (Produktionsplanung und -steuerung) abgebildet [Tem-2006, S. 375]. Demgegenüber verlangen verbrauchsgesteuerte Verfahren keine Vo-

rausplanung des Produktionsprogramms. Entsprechend des s. g. Pull- oder Hol-Prinzips wird Material nur dann angefordert, falls eine definierte Menge an Material am Bereitstellort verbraucht wurde.

Die Transportauftragsdisposition legt in einer darauffolgenden Stufe fest, wie die durch die Nachschubsteuerung generierten Transportaufträge den Touren zugeordnet werden. *Klenk, Galka und Günthner* beschreiben mögliche Strategien, welche hier zum Einsatz kommen können [Kle-2015b]. Die Einfachste bildet demnach die Zuweisung entsprechend der Regel First in First out (FiFo). Wird eine Routenzugtour gestartet, werden diejenigen Transportaufträge mit den ältesten Erstellungszeitpunkten zuerst zugewiesen bis die verfügbare Transportkapazität ausgeschöpft ist. Demgegenüber können auch verschiedene Prioritätsregeln bei der Zuweisung berücksichtigt werden. Sind bspw. Informationen über den geplanten Bereitstellzeitpunkt bekannt (vgl. bedarfsgesteuerte Nachschubstrategie), können früher bereitzustellende Transportaufträge entsprechend priorisiert werden. Bei zeitfensterbasierten Verfahren liegen sowohl Informationen über den frühest- und spätestmöglichen Anlieferzeitpunkt vor. Dadurch können verfrühte Lieferungen ausgeschlossen werden und definierte Maximalbestände an den Senken garantiert werden. Die durch *Klenk, Galka und Günthner* weiterhin genannte Dispositionsstrategie des „kritischen Transportauftrags“ entspricht der im nächsten Abschnitt beschriebenen Leitteilsteuerung.

Verfahren zur Festlegung der Abfahrtszeiten eines Routenzuges lassen sich nach *Takeda, Droste* sowie *Brungs* grundsätzlich einteilen in Verfahren mit festgelegten oder variablen Zeitpunkten [Tak-2013, S. 77; Dro-2013b, S. 38f.; Bru-2012, S. 35ff.]. Erstere sind dadurch gekennzeichnet, dass die Abfahrtszeitpunkte in Form eines Fahrplans fixiert sind. Ein Spezialfall hiervon sind s. g. getaktete Routenzugsysteme, bei denen Routenzüge in regelmäßigen Zeitabständen auf einer Route verkehren. Bei Steuerungsansätzen mit variablen Zeitpunkten werden die Abfahrtszeitpunkte für jede Tour anhand bestimmter Auslöser dynamisch bestimmt. Bei einer auslastungsorientierten Steuerung sind die Transportaufträge mit einem spätestmöglichen Anlieferzeitpunkt gekennzeichnet. Eine Tour wird gestartet, sobald genügend Transportaufträge zur Erreichung einer definierten Mindestauslastung des Routenzugs gemeldet sind oder die Zeitschranke erreicht ist [Gün-2012, S. 39]. Beim Verfahren „feste Menge“ wird eine Tour dann gestartet, wenn eine festgelegte Menge an Material, bspw. ein kompletter Ladungsträger, ausgeliefert werden muss [Dro-2013b, S. 38]. Hierzu sind für alle Materialien Mindestbestände festgelegt, deren Unterschreitung als Auslöser für eine Tour fungieren [Bru-2012, S. 36]. Daran angelehnt ist die s. g. Leitteilsteuerung. Unterschied hierbei ist, dass nur einzelne Materialien (Leitteile) als Auslöser für eine Tour fungieren. Andere Materialien, für welche Bedarfe zu diesem Zeitpunkt gemeldet

wurden, werden ebenfalls dieser Tour zugewiesen [Abe-2009]. Die einfachste Steuerungsvariante mit variablen Abfahrtszeitpunkten stellt das permanente Fahren dar, bei dem der Routenzugfahrer unmittelbar nach Abschluss der vorangegangenen Tour eine neue Tour startet.

Die Routenführung beschreibt die Strategie, nach derer Haltestellen und Fahrwege für eine Tour bestimmt werden. Bei statischen Ansätzen sind diese über einen längeren Zeitraum durch s. g. Routen festgelegt. Routenzüge auf derselben Route benutzen immer die gleichen Wege und passieren alle zugewiesenen Haltestellen, auch wenn u. U. nicht an allen Haltestellen angehalten wird. Bei einer dynamischen Routenführung existieren keine im Vorfeld geplanten Routen. Vielmehr werden die Haltestellen und deren Anfahrreihenfolge für jede Tour entsprechend der aktuellen Auftragslage neu bestimmt.

Das Merkmal Fahrzeugzuordnung lässt sich ebenso in statische und dynamische Ausprägungen unterteilen. Bei einer statischen Fahrzeugzuordnung sind die Routenzüge fix einer Route zugeordnet. Das Gegenteil bildet eine dynamische Fahrzeugdisposition, bei der die Routenzüge nach bestimmten Regeln den Touren zugewiesen werden, welche auch auf unterschiedlichen Routen stattfinden können. Dadurch lassen sich Wartezeiten und die resultierende Fahrzeuganzahl reduzieren [Kil-2012].

Die beschriebenen Ausprägungen der Routenzugsteuerung sind im morphologischen Kasten gemäß Tabelle 2-3 zusammengefasst.

Tabelle 2-3: Morphologie Routenzugsteuerung

Merkmal	Gestaltungsvarianten					
Nachschubsteuerung	Bedarfsgesteuert			Verbrauchsgesteuert		
Transportauftragsdisposition	FiFo		Priorität		Nach Zeitfenstern	
Festlegung Abfahrtszeitpunkte	Fester Zeitpunkt		Variabler Zeitpunkt			
	Getaktet	Ungetaktet	Auslastungsorientiert	Feste Menge	Leitteilsteuerung	Permanent
Routenführung	Statisch			Variabel		
Fahrzeugzuordnung	Statisch			Variabel		

2.2.4 Gestaltungsfeld Transportmittel

Das Transportmittel spezifiziert die Geräte, welche zur innerbetrieblichen Raumüberbrückung, bei innerbetrieblichen Routenverkehren vornehmlichen horizontalen Transport, zum Einsatz kommen [fml-2015b]. Hierunter fallen ein kraftgetriebenes Flurförderzeug und etwaige Anhänger als wesentliche Bestandteile eines Routenzugs.

Als Flurförderzeuge kommen in vielen Anwendungsfällen Schlepper¹¹ zum Einsatz, welche einen oder mehrere Anhänger ziehen. Prinzipiell lassen sich aber auch mittels Niederhub-Spreizenstaplern¹¹ (auch Niederhubwagen oder Niederflurkommissionierer) und Gabelstaplern¹¹ mehrere Transporteinheiten auf einer Tour transportieren und damit die beschriebenen Transportaufgaben innerhalb eines Routenzugsystems erfüllen. So setzt z. B. Mercedes-Benz im Werk Würth Niederhub-Spreizenstapler ein, welche zwei Transportgestelle mit jeweils mehreren KLT transportieren [Jor-2011]. Der Einsatz von Gabelstaplern bietet zudem den Vorteil, dass auch schwere Ladungsträger an Quellen oder Senken ohne zusätzliche Hilfsmittel manipuliert werden können [Klu-2010, S. 150].

Werden Anhänger verwendet, so lassen sich diese entsprechend ihrer Bauform in sieben Kategorien einteilen, welche in Abbildung 2-4 schematisch dargestellt sind. Die Möglichkeit einer Ein- bzw. beidseitigen Be- und Entladung bestimmt auch die Flexibi-

¹¹ Nomenklatur und Abgrenzung entsprechend ISO-Norm 5053 [ISO-5053]

lität bei der Routen- und Tourenplanung. Können die Anhänger nur zu einer Seite entladen werden, müssen die Routenverläufe daran angepasst bzw. längere Handhabungszeiten bei Be- und Entladung eingeplant werden, bspw. um die Anhänger in richtiger Ausrichtung zu kuppeln.

Bei C-, E-, H- und U-Frames sowie Taxiwagen kommen Trolleys als Transporthilfsmittel zum Einsatz, welche manuell in den Anhänger geschoben und während der Fahrt – abhängig vom Hersteller – mitlaufen oder angehoben werden können. Bei C-Frames handelt es sich um zweiachsige Anhänger, bei denen der Ladungsträger zwischen den beiden Achsen positioniert ist. E-Frames sind hingegen einachsig ausgeführt und der Ladungsträger steht mittig auf der Achse. Beide Anhängertypen können, bedingt durch die Rahmenkonstruktion, nur von einer Seite be- und entladen werden. Eine Besonderheit bilden hier H-Frames, bei denen der Stützrahmen entlang der Mittenachse des Anhängers verläuft. Dies macht einerseits zwar spezielle Trolleys notwendig, andererseits können diese Anhänger von beiden Seiten beladen werden. Die Entladung kann dann zur selben Seite erfolgen. Die bezüglich der Be- und Entladeseite flexibelsten, trolleybasierten Anhänger stellen s.g. U-Frames und Taxiwagen dar. Bei U-Frames verläuft der Stützrahmen vertikal über dem Trolley, wodurch dieser beidseitig be- und entladen werden kann. Bei Taxiwagen wird der Trolley seitlich über klappbare Rampen auf den Anhänger geschoben, was jedoch insb. bei schweren Ladungsträgern mit einer entsprechenden ergonomischen Belastung verbunden ist. Bei Plattformwagen hingegen werden die Transporteinheiten direkt auf den Anhängern platziert. Durch zusätzliche Installationen wie bspw. Rollen auf den Anhänger können die Transporteinheiten manuell von / auf stationären Rollenbahnen übernommen / abgegeben werden [Keu-2014].

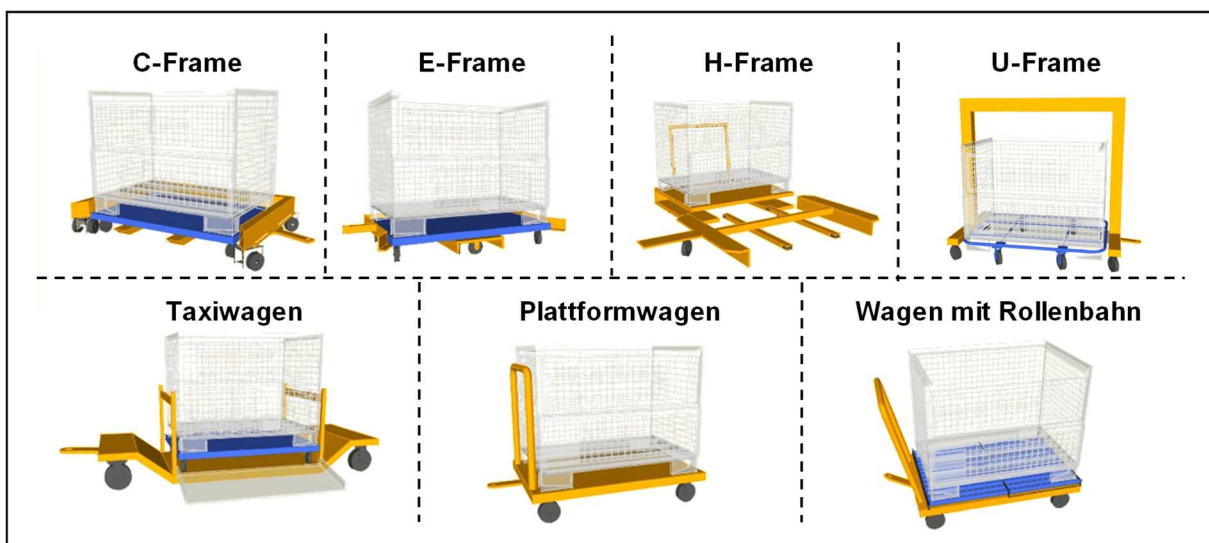


Abbildung 2-4: Anhängerbauformen für Routenzüge (eigene Darstellung)

Die Anzahl an gelenkten Achsen und Rädern entscheidet über Tragfähigkeit, Nachlaufverhalten und weitere Eigenschaften der Anhänger. Für Routenzuganhänger werden Drehschemel- oder Achsschenkellenkungen eingesetzt. Eine Besonderheit bilden einachsige Anhänger, welche über keine Lenkung verfügen [Gün-2012, S. 50]. Für eine detaillierte Übersicht zu möglichen Lenk- und Fahrwerkskonfigurationen sowie deren Eigenschaft sei an dieser Stelle auf die *VDI-Richtlinie 2406* verwiesen [VDI-2406].

Die beschriebenen Ausprägungen der Routenzugtechnik sind im morphologischen Kasten gemäß Tabelle 2-4 zusammengefasst.

Tabelle 2-4: Morphologie Transporttechnik

Merkmal		Gestaltungsvarianten							
Art des Flurförderzeugs		Schlepper		Niederhub Spreizenstapler			Gabelstapler		
Anhänger	Bauform	Kein Anhänger	Einschubanhänger (mit Trolley)					Tragende Anhänger (ohne Trolley)	
			C-Frame	E-Frame	H-Frame	U-Frame	Taxiwagen	Plattformwagen	Rollenbahn
	Beladeseite	Einseitig				Beidseitig			
	Entladeseite	Festgelegt durch Beladeseite				Beidseitig			
	Lenksystem	Einachsige Anhänger (ungelenkt)	Zweiachsige Anhänger						
			Einachs-Drehschemel-Lenkung	Zweiachs-Drehschemel-Lenkung	Zweirad-Achsschenkel-Lenkung	Vierrad-Achsschenkel-Lenkung			

2.3 Planung von Routenzugsystemen

Analog zu anderen Feldern der Unternehmens- und insb. Fabrikplanung lassen sich auch logistische Planungsprozesse in Abhängigkeit des Planungshorizontes in eine strategische, taktische und operative Planungsphase unterteilen [Sch-2008a, S. 13ff.; Wei-2004, S. 12ff.]. Im Rahmen der strategischen Logistikplanung werden vornehmlich Standortfragen geklärt und Grobkonzepte auf Basis von Prämissen, Grobmengengerüsten und Annahmen entwickelt [Sch-2008a, S. 14; Bie-2004, S. 57]. Die taktische Logistikplanung greift die strategischen Zielsetzungen auf und konkretisiert die Prozesse und hierzu verwendeten Ressourcen. Ergebnis der taktischen Logistikplanung ist ein Katalog von einmalig zu treffenden Maßnahmen zur Gestaltung eines Logistiksystems [Sch-2008b, S. 57]. Im Rahmen der operativen Logistikplanung erfolgt schließlich eine wiederholende Planung logistischer Aktivitäten auf betrieblicher Ebene, wie bspw. die kurzfristige Tourenplanung oder Distributionsplanung [Kla-2009, S. 395]. Demnach lassen sich Aufgaben bei der Einführung von Routenzügen in die taktische Logistikplanung einordnen. Aktivitäten wie z. B. die Anpassung von Routen und Fahrplänen müssen hingegen rollierend im Systembetrieb durchgeführt werden, weshalb diese der operativen Logistikplanung zugeordnet werden. Dieser Abschnitt dient daher der Beschreibung von Planungsansätzen im Rahmen der taktischen Routenzugplanung (vgl. Abschnitt 2.3.1) sowie Entscheidungsproblemen im Rahmen der operativen Routenzugplanung (vgl. Abschnitt 2.3.2).

2.3.1 Taktische Routenzugplanung

Die Auslegung von Routenzugsystemen stellt eine komplexe Planungsaufgabe dar. Einerseits resultiert aus den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Konzepten zur Organisation und Technik ein großer Gestaltungsspielraum. Zum anderen müssen spezielle Planungsaufgaben wie bspw. die Festlegung von Routen und Fahrplänen gelöst werden, welche bei anderen logistischen Systemen nicht von Relevanz sind. In diesem Abschnitt werden deshalb zwei Planungsverfahren für Routenzugsysteme vorgestellt, welche in Abbildung 2-5 dargestellt und im Folgenden näher beschrieben sind.

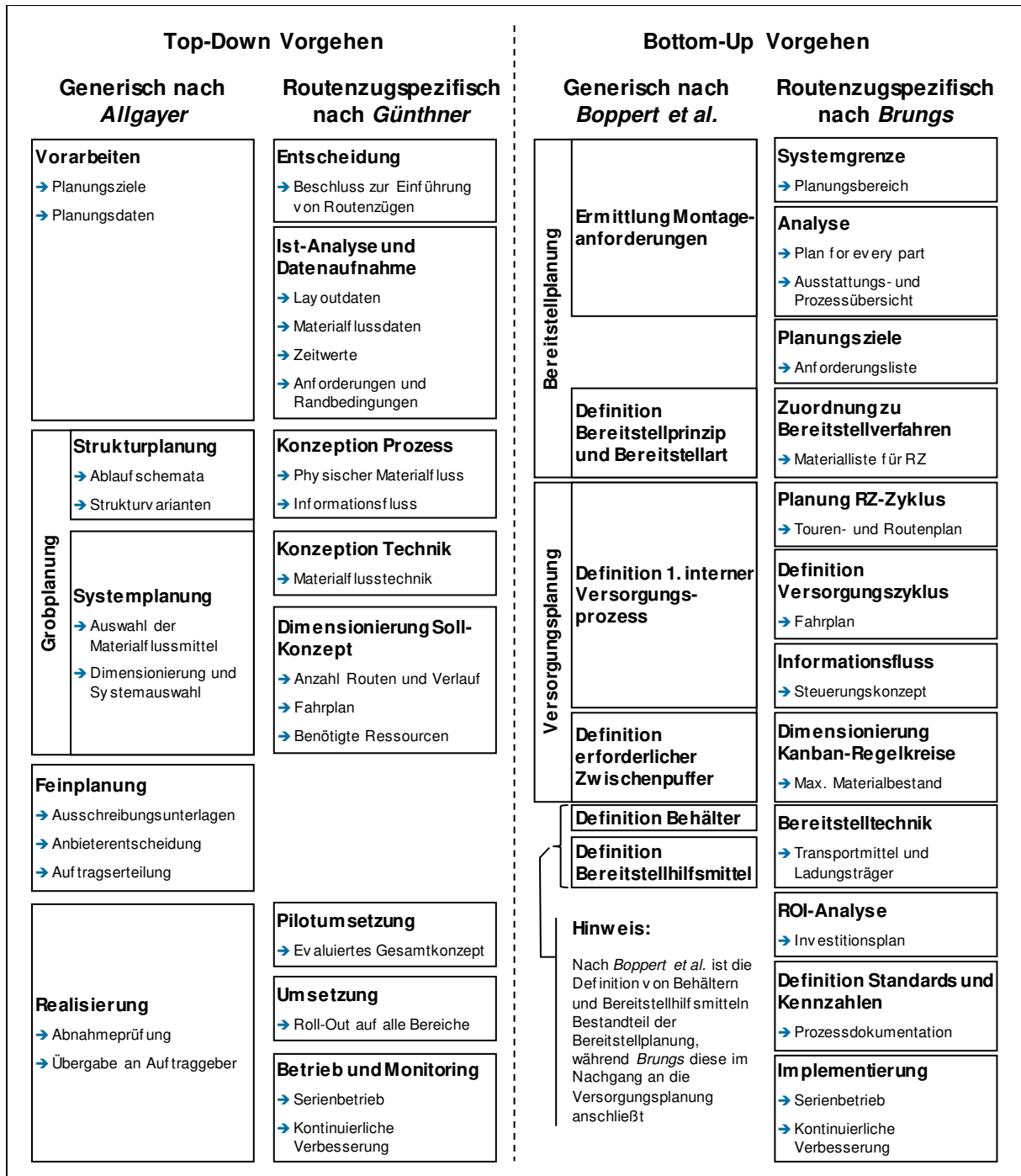


Abbildung 2-5: Vorgehensmodelle zur taktischen Planung logistischer Systeme allgemein und Routenzugsystemen im Speziellen (in Anlehnung an [All-1999, S. 36ff.], [Gün-2012, S. 31ff.], [Bop-2007, S. 349ff.] und [Bru-2012, S. 40ff.]

In der Literatur werden typischerweise zwei Modelle für das Vorgehen und die Organisation eines Planungsprozesses logistischer Systeme unterschieden, das s. g. Top-Down und das Bottom-Up Vorgehensmodell. In anderen Quellen werden im Kontext der Fabrikplanung auch die Begriffe analytische Planung für Top-Down und synthetische Planung für Bottom-Up Vorgehen synonym verwendet [Gru-2015, S. 24]. *Allgayer* schlägt in Anlehnung an *VDI-Richtlinie 2498* ein auf die Planung logistischer

Systeme angepasstes Top-Down Vorgehensmodell vor [All-1999, S. 36ff.; VDI-2498]. Typisch ist hierin das sequenzielle Vorgehen vom Allgemeinen über mehrere Schritte hin zum Speziellen. In jedem Schritt werden die Ergebnisse des jeweils vorherigen Schrittes konkretisiert, wobei auch Rücksprünge zugelassen sind. Ein gegensätzliches Vorgehensmodell bildet das von *Boppert, Schedlbauer und Günthner* beschriebene Line-Back Prinzip [Bop-2007, S. 349ff.]. Wesentlich ist hierin die zentrale Prämisse, dass der Bereitstellort am Produktionsort der Engpass im System ist und somit den Ausgangspunkt des Planungsprozesses bilden muss [Klu-2010, S. 80]. Die Planung und Ausgestaltung der Einzelschritte beginnt beim eigentlichen Kunden, der Produktion, und verläuft schrittweise entgegengesetzt des physischen Materialflusses bis zum Lieferanten. Beide Vorgehensmodelle wurden für die Planung von Routenzugsystemen konkretisiert.

So stellen *Günthner et al.* ein Top-Down Vorgehen vor [Gün-2012, S. 31ff.]. Aufbauend auf der Entscheidung, Routenzüge einzuführen, werden in einem ersten Schritt die Planungsdaten aufgenommen und ggf. der Ist-Prozess analysiert. Auf Basis der darin ermittelten Daten und Anforderungen wird die Organisation des Routenzugsystems konzipiert (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3) und geeignete Transportmittel ausgewählt (vgl. Abschnitt 2.2.4). Anschließend wird das favorisierte Soll-Konzept dimensioniert, was insb. die Auslegung der Routen und Fahrpläne beinhaltet sowie die Ermittlung des Flächen-, Personals- und Transportmittelbedarfs. Da die Einführung und Planung von Routenzugsystemen i. d. R. unternehmensintern durchgeführt wird und keine Ausschreibung erfordert, entfällt die Feinplanungsphase des generischen Vorgehensmodells [Gün-2012, S. 31]. Anschließend erfolgt die Umsetzung, ggf. zunächst in einem kleinen Pilotbereich und schließlich der Serienbetrieb.

Brungs präsentiert ein Planungsvorgehen für Routenzugsysteme, welches sich am Bottom-Up Ansatz orientiert [Bru-2012, S. 40ff.]. Ausgehend von den Anforderungen aus der Montage werden die für die Routenzugversorgung geeigneten Materialien bestimmt. Unmittelbar darauf folgt die Dimensionierung des Routenzugsystems unter den Prämissen einer statischen Routenführung und Fahrzeugzuordnung. Unterschiedliche Organisationsformen, wie diese bereits in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 beschrieben wurden, werden nicht betrachtet. Anschließend wird das Steuerungskonzept für das Routenzugsystem spezifiziert und die geeignete Routenzugtechnik sowie Ladungsträger ausgewählt. Es folgen Maßnahmen zur Vorbereitung und Durchführung der Realisierung.

2.3.2 Operative Routenzugplanung

Logistische Systeme sind fortwährenden externen Einflüssen unterworfen (siehe Abschnitt 3.1). Bspw. führen beim build-to-order Prinzip Veränderungen im Nachfrageverhalten der Kunden unmittelbar zu schwankenden Materialbedarfen in der Produktion [Las-2015]. Aufgabe der operativen Logistikplanung ist es deshalb, die Ziele und Ergebnisse vorheriger Planungsphasen an Veränderungen des Unternehmensumfeldes anzupassen [Goe-1997, S. 84]. Es werden vorrangig Entscheidungen in einem Horizont von wenigen Tagen bis 3 Monaten und detaillierte Vorgaben für die verschiedenen Logistikbereiche erarbeitet [Wei-2004, S. 13]. Die Übersichtsarbeit von *Boysen et al.* bietet einen umfassenden Überblick zu operativen Planungsaufgaben und Entscheidungsproblemen entlang der Prozesskette ab dem Abruf beim Lieferanten bis zur Anstellung am Verbauort [Boy-2015]. Diese sind in Abbildung 2-6 dargestellt.

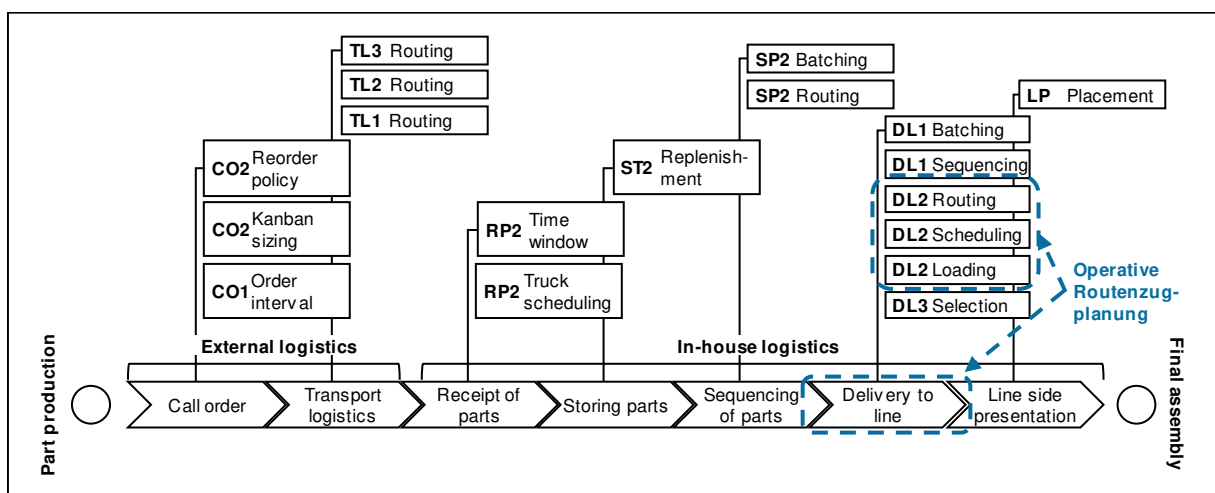


Abbildung 2-6: Operative Planungsaufgaben im Rahmen der Beschaffungs- und Produktionslogistik in der Automobilindustrie (in Anlehnung an [Boy-2015])

Die Routenzugversorgung lässt sich demnach der Kategorie „delivery to line“ im Transportmodus zwei (s. g. DL2-Probleme) zuordnen. Bereits *Battini, Boysen und Emde* charakterisierten die hier relevanten Entscheidungsprobleme hinsichtlich ihrer Planungsaufgabe zu [Bat-2012]:

- **DL2-routing**

Jedem Routenzug muss eine Abfolge von Haltestellen zugewiesen werden, welche nacheinander bedient werden. Die Erreichbarkeit der Haltestellen sind durch das Wegenetz und ggf. weitere Verkehrsrestriktionen wie bspw. Einbahnregelungen definiert.

- **DL2-scheduling**

Für jede Route müssen Zeitpunkte für die Abfahrt und Rückkehr des zugewiesenen Routenzuges am Startpunkt definiert werden.

- **DL2-loading**

Jeder sich aus dem DL2-scheduling ergebenden Tour müssen die auszuliefernden Artikel und deren Mengen (Transportaufträge, vgl. Abschnitt 2.2.3) zugewiesen werden.

Es ist einfach erkennbar, dass zwischen allen drei Entscheidungsproblemen starke Abhängigkeiten bestehen. So entscheidet bspw. bereits die Routenführung und die Anzahl Haltestellen darüber, wie viel Zeit eine Tour in Anspruch nimmt. Die aus den Abfahrtszeiten hervorgehenden Belieferungszeitpunkte sind wiederum Basis für die Zuweisung der Transportaufträge im Rahmen der Beladeplanung, während die tatsächliche Anzahl an Transportaufträgen auf einer Tour die Dauer dieser bestimmt. Im folgenden Abschnitt werden daher Modelle und Methoden vorgestellt, welche sich der sequenziellen oder integrierten Lösung dieser Entscheidungsprobleme widmen.

2.3.3 Literaturübersicht – Modelle und Methoden im Rahmen der operativen Routenzugplanung

In diesem Abschnitt werden Modelle und Methoden im Kontext der operativen Routenzugplanung hinsichtlich der betrachteten Planungsaufgaben und Zielgrößen, der berücksichtigten Restriktionen sowie des Lösungswegs detailliert betrachtet. Basis für die Auswahl der hier behandelten Literatur bilden die Übersichtsarbeiten von *Boysen et al.*, *Battini*, *Boysen und Emde* und sowie die Dissertation von *Alnahhal* [Boy-2015; Bat-2012; Aln-2015, S. 24ff.]. Weitere Ansätze insb. aus dem deutschsprachigen Raum wurden entsprechend ergänzt. Eine Übersicht zu den Modellen und Methoden sowie deren Komponenten bietet Tabelle 2-5 am Ende dieses Abschnitts. Zur strukturierten Einordnung der Modelle und Methoden werden folgende Kriterien verwendet:

- **Planungsaufgabe**

Zuordnung zu den betrachteten operativen Planungsaufgaben DL2-routing, DL2-scheduling und DL2-loading (vgl. Abschnitt 2.3.2)

- **Zielgrößen**

Aufzählung der (quantitativen) Zielgrößen, welche durch die Modelle und Methoden berechnet bzw. optimiert werden

- **Restriktionen**

Zuordnung zu den angenommenen Restriktionen seitens der Routenzugsteuerung (vgl. Abschnitt 2.2.3) und ggf. Aufzählung zusätzlicher Restriktionen, welche anwendungsfallbezogen berücksichtigt werden

- **Art des Modells**

Einteilung unter Verwendung der „Modellklassifizierung nach Einsatzzweck“ nach *Arnold et al.* in Erklärungs-, Simulations- und Optimierungsmodelle [Arn-

2008b, S. 36], bei Optimierungsmodellen zusätzlich bzgl. eines exakten bzw. heuristischen Lösungswegs

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden zunächst isolierte Ansätze zur Lösung der einzelnen Planungsaufgaben vorgestellt und anschließend integrierte Routen- und Fahrplanplanungsprobleme bzw. Fahrplan- und Beladeprobleme betrachtet. Der Abschnitt schließt mit integrierten Routen-, Fahrplan und Beladeproblemen.

DL2-routing Modelle

Kilic, Durmusoglu und Baskak stellen einen Ansatz zur Routenplanung vor und gehen darin davon aus, dass die Taktzeiten der zu bestimmenden Routen bereits durch taktische Vorgaben definiert sind. Eine explizite Fahrplanplanung ist demnach nicht notwendig. Mittels eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems werden für ein gegebenes Layout und konstanten Materialbedarfen statische Routenverläufe berechnet. Als Optimierungskriterium werden die Transportkosten heran gezogen, welche aus der Anzahl an Routenzügen sowie der zurückgelegten Wegstrecke resultieren [Kil-2012].

DL2-scheduling Modelle

Costa et al. widmen sich der Untersuchung und Optimierung eines Routenzugsystems für einen industriellen Anwendungsfall und nutzen hierzu ein dynamisches Simulationsmodell. Durch zeitliche Verschiebung der einzelnen Routen zueinander wird nachgewiesen, dass die vor- und nachgelagerten Prozesse gleichmäßiger ausgelastet und dadurch Ressourcen eingespart werden können [Cos-2008].

Droste schlägt ein Modell zur Berechnung der idealen Zykluszeit unter zeitlichen und ergonomischen Restriktionen vor. Darin wird die Zykluszeit des Routenzuges iterativ derart berechnet, dass die zeitliche Auslastung des Fahrers optimal ist und die körperliche Belastung des Fahrers durch den manuellen Behältertausch definierte Grenzwerte nicht überschreitet [Dro-2013b].

Der *VDI-Richtlinienentwurf 5586 Blatt 2* präsentiert Formeln zur Berechnung der Takt- und Umlaufzeit einer Route basierend auf einer gegebenen Routendefinition und bekannten Transportbedarfen. Diese Zusammenhänge werden auf eine repräsentative Route zur GLT Versorgung angewendet und Wechselwirkungen zwischen der Tourenfrequenz und kapazitiven sowie zeitlichen Nutzungsgraden der Routenzüge beispielhaft aufgezeigt [VDI-5586].

DL2-loading Modelle

Ein Ansatz zur operativen Beladeplanung wird von *Emde, Fliedner und Boysen* vorgestellt. Das von ihnen formulierte s. g. „tow train loading problem“ (TTL) berechnet die optimale Anzahl an Behältern, welche innerhalb eines Routenzyklus ausgeliefert werden müssen. Das Prinzip hierfür lautet wie folgt: Die Gesamtbestände in der Produktion sowie die Bereitstellplätze an den Bedarfsorten müssen minimal sein. Dabei werden die Materialbedarfe je Produktionstakt, Routenverläufe sowie der Routenzugfahrplan als bekannt vorausgesetzt [Emd-2012a].

Bozer und Ciernoczkowski präsentieren eine Reihe analytischer Formeln zur Berechnung der zeitlichen und kapazitiven Auslastung von Routenzügen in Abhängigkeit des Materialverbrauchs an den Bedarfsorten und den daraus resultierenden Transportaufträgen. Dabei wird von einer verbrauchsgesteuerten Nachschubsteuerung mittels Kanban ausgegangen. Durch Variation verschiedener Parameter wie bspw. dem Mindestbestand an den Bedarfsorten, dem Nachfrageverhalten oder der Anzahl an Kanbans werden Auswirkungen auf die zeitliche und kapazitive Auslastung der Routenzüge untersucht. Zudem werden Prioritätsregeln für den Fall betrachtet, dass Transportaufträge aufgrund mangelnder Kapazität erst auf nachfolgenden Touren ausgeliefert werden können [Boz-2013; Cie-2013].

Klenk, Galka und Günthner entwickeln unterschiedliche Betriebsstrategien für den Umgang mit einer schwankenden Transportnachfrage. Demnach können untertägige Spitzen in der Transportnachfrage dazu führen, dass, abhängig von der geplanten Routenauslastung, eine Anzahl an Transportaufträgen nicht durch den Standardprozess ausgeliefert werden können. Diese werden dann entweder als Einzeltransport (Strategie 1), gebündelt über eine s. g. „exception tour“ (Strategie 2) oder auf nachfolgende Touren verschoben (Strategie 3). Anhand von Datensätzen aus der Automobilindustrie und eines vorgestellten Kostenmodells werden die Betriebsstrategien vergleichend gegenübergestellt, wobei für jede Strategie auch die geplante kapazitive Auslastung der Routen variiert wird [Kle-2015a].

Integrierte DL2-routing & DL2-scheduling Modelle

Ein erster Ansatz zur integrierten Routen- und Fahrplanplanung wurde 1999 durch *Vaidyanathan et al.* vorgestellt. Das Ziel des s. g. „just-in-time capacitated vehicle routing problem“ (JITCVRP) ist die Berechnung von statischen Routen und deren Taktzeiten unter Minimierung der Gesamtdauer aller Touren. Der resultierende Transportbedarf je Bedarfsort wird dabei in Korrelation mit dem Routentakt gesetzt, wobei der Materialverbrauch als konstant angenommen wird. Es wird zudem eine zweistufige Heuristik zur Lösung des JITCVRP vorgestellt [Vai-1999].

Emde und Boysen entwickeln ebenfalls einen zweistufigen Algorithmus zur integrierten Routen- und Fahrplanplanung mittels dynamischer Programmierung. Im Unterschied zu *Vaidyanathan et al.* sind jedoch keine konstanten Materialverbräuche vorausgesetzt. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass der Materialbedarf je Bedarfsort und Produktionstakt als Eingangsdaten bekannt sind. Es werden zwei Teilprobleme behandelt: ein s. g. „supermarket routing problem“ (SRP) und ein s. g. „supermarket scheduling problem“ (SSP). Das SRP weist jedem Routenzug ein zusammenhängendes Segment an Bedarfsorten zu. Die Zielfunktion enthält Terme für die Transportkosten, welche sich aus der Gesamtzahl an Routenzügen ergeben, sowie resultierende Bestandskosten an den Bedarfsorten. Letztere bedürfen einer eingebetteten Lösung des SSP, welches aufbauend auf den im SRP generierten Touren die Startzeitpunkte berechnet. Zusätzliche Restriktionen wie bspw. die Annahme, dass alle Touren unabhängig ihrer Länge und Anzahl an Bedarfsorten gleich lang dauern oder die genaue Kenntnis über alle Materialbedarfe pro Bedarfsort erlauben eine optimale Lösung vergleichsweise kleiner Probleme (≤ 60 Bedarfsorte) [Emd-2012b].

Eine ähnliche Problemstellung wird von *Satoglu und Sahin* betrachtet, welche zur Bestimmung von Routenverläufen und deren Taktzeiten einen heuristischen Ansatz vorstellen [Sat-2013].

Integrierte DL2-scheduling & DL2-loading Modelle

Emde und Gendreau erweitern das TTL um den Aspekt der Fahrplanplanung und entwickeln das s. g. „tow train scheduling and loading problem“ (TTSL). Dieses berechnet für jede zuvor bestimmte Route einen gültigen Fahrplan, welcher die zeit- und mengengerechte Versorgung aller Bedarfsorte garantiert. Zudem wird mittels einer Heuristik aus der Vielzahl möglicher Fahrpläne derjenige ausgewählt, welcher möglichst minimale Bestände an den Bedarfsorten verursacht [Emd-2015]. *Fathi et al.* präsentieren einen alternativen Ansatz zur integrierten Fahrplan- und Beladepaltung, betrachten hierbei jedoch andere Zielgrößen und Restriktionen. Sie formulieren ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem, entwickeln verschiedene Heuristiken und vergleichen die Ergebnisse anhand mehrerer synthetischer und realer Anwendungsfälle [Fat-2014].

Faccio et al. verfolgen einen umfassenden Ansatz zur Analyse und Optimierung von Routenzugfahrplänen mittels eines dynamischen Simulationsmodells. Sie präsentieren zudem analytische Formeln, mit denen sich der Bedarf an Routenzügen im Vorfeld an eine konkrete Simulationsstudie abschätzen lässt [Fac-2013].

Integrierte DL2-routing, DL2-scheduling & DL2-loading Modelle

Choi und Lee stellen einen Ansatz zur integrierten Routen-, Fahrplan- und Beladeplanung anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Automobilindustrie vor. Basierend auf den Fahrzeugen, welche sich im KarosSENSpeicher oder bereits auf dem Montageband befinden und einer mittleren Wiederbeschaffungszeit werden Transportaufträge generiert und anschließend lokal zugewiesen, d. h. basierend auf den aktuellen Positionen und Routen der Fahrzeuge. Mittels einer Einfüge-Heuristik wird der Transportauftrag in die Route desjenigen Fahrzeuges eingefügt, so dass minimale Strafkosten resultieren. Hierbei werden Bestandskosten einer verfrühten Anlieferung, Strafkosten für eine Unterschreitung des Sicherheitsbestands sowie zusätzliche Transportkosten aus längeren Wegen und Fahrzeiten berücksichtigt [Cho-2002].

Dreher, Nürnberger und Kulus beschreiben mehrere heuristische Ansätze zur integrierten Routen-, Fahrplan und Beladeplanung für getaktete Routenzugsysteme mit statischen Routen und statischer Fahrzeugzuordnung. Diese sind in das kommerzielle Softwareprodukt MALAGA der Firma ZIP eingebettet. Dem Nutzer werden verschiedene Optimierungsvarianten inkl. deren Kennzahlen vorgeschlagen, darunter die Anzahl an Routenzügen, welche sich aus den Fahr- und Handhabungszeiten bei der jeweiligen Routenführung und dem resultierenden Fahrplan ergeben [Dre-2009].

Golz et al. stellen einen auf die Automobilindustrie ausgerichteten zweistufigen Ansatz ebenfalls zur integrierten Routen-, Fahrplan- und Beladeplanung vor. In einer ersten Stufe werden basierend auf dem Produktionsprogramm Transportaufträge generiert und Anlieferzeitfenster bestimmt. Es wird demnach davon ausgegangen, dass alle Materialien bedarfsorientiert gesteuert werden. In einer zweiten Stufe werden die Touren, wiederum in einem zweistufigen Verfahren, zunächst gebildet („tour building“) und anschließend terminiert („tour scheduling“). Während des s. g. „tour building“ wird für jeden Transportauftrag eine eigene Tour generiert (Direktverkehr) und diese anschließend mittels einer Savings-Heuristik derart zusammengefasst, dass die resultierende Tourdauer unter Berücksichtigung der Fahrzeugkapazität minimiert wird. Die Touren starten jeweils zum spätestmöglichen Zeitpunkt, sodass die Transportaufträge eben rechtzeitig am Bedarfsort eintreffen. Das s. g. „tour scheduling“ baut auf den initialen Touren auf und verschiebt diese zeitlich nach vorn, so dass die resultierende Anzahl an gleichzeitig aktiven Touren minimiert wird. Hierbei wird für jedes Material ein Maximalbestand am Bedarfsort derart berücksichtigt, dass ein Transportauftrag erst ab einem frühest möglichen Anlieferzeitpunkt bereitgestellt werden darf. Der Algorithmus wurde als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formuliert [Gol-2012].

Teschemacher und Reinhart präsentieren ein Modell zur Bestimmung von Routen und Abfahrtszeiten innerhalb eines Routenzugsystems mit variabler Routenführung und

variablen Abfahrtszeiten. Der präsentierte Ameisenalgorithmus kann spontan eingehende, höher priorisierte Transportaufträge in der Planung berücksichtigen und die Routenführung und Abfahrtszeiten diesbezüglich anpassen. Zudem wird ein Verfahren vorgestellt, mittels dessen die geforderte Transportnachfrage innerhalb eines Routenzugsystems basierend auf Vergangenheitsdaten prognostiziert werden kann [Tes-2019]

Tabelle 2-5: Übersicht zu Modellen und Methoden zur Routenzugplanung sowie deren Zielgrößen und Restriktionen

	Aufgabe			Zielgrößen										Restriktionen										Modellart					
	DL2-routing	DL2-scheduling	DL2-loading	Bestand(-skosten)	Transportkosten	Fahrtstrecke / Fahrzeit	Zeitliche Auslastung	Kapazitive Auslastung	Liefertreue	Anzahl Touren	Fahrzeuganzahl	Bedarfsgesteuert	Verbrauchsgesteuert	FIFO	Priorität	Zeitfenster	Fester Zeitpunkt	Variabler Zeitpunkt	Statische Routen	Variable Routen	Statische Fahrzeugzuordnung	Variable Fahrzeugzuordnung	Maximalbestand	Ergonomie	Erklärungsmodell	Simulationsmodell	Exakt	Heuristik	
[Cho-2002]	x	x	x	x	x							x			x			x		x		x						x	
[Boz-2013; Cie-2013]			x				x	x					x		x		x		x		x					x			
[Cos-2008]		x					x					x					x		x		x					x			
[Dre-2009]	x	x	x			x	x	x		X	x	x				x	x		x		x		x						x
[Dro-2013b]		x					x						x				x		x		x			x	x				
[Emd-2012a]			x	x				x				x				x	x		x		x							x	
[Emd-2012b]	x	x		x	x							x					x ¹²	x ¹²	x		x							x	
[Emd-2015]		x	x	x								x				x		x		x									x
[Fac-2013]		x	x	x			x	x	X	X	x		x	x			x		x		x					x	x		
[Fat-2014]		x	x	x						X		x		x			x		x		x			x					x
[Gol-2012]	x	x	x								x	x				x		x		x		x	x						x
[Kil-2012]	x				x							x					x		x		x ¹³	x ¹³						x	
[Kle-2015a]			x		x			x				x		x ¹⁴	x ¹⁴		x		x		x					x			
[Sat-2013]	x	x		x	x							x					x		x		x			x					x
[Tes-2019]	x	x	x				x				x					x		x		x		x							x
[Vai-1999]	x	x				x							x				x		x		x								
[VDI-5586]		x					x	x				x	x				x		x		x					x			

12 Die Autoren präsentieren neben einer allgemeinen Modellformulierung zwei Erweiterungen dieses hinsichtlich getakteter Routen und Routen mit einheitlicher Länge

13 Es werden zwei Modelle für s. g. „one routed vehicles“ (statische Fahrzeugzuordnung) und „multiple routed vehicles“ (dynamische Fahrzeugzuordnung) vorgestellt.

14 Es werden mehrere Strategien ohne und mit Priorisierung von Transportaufträgen entwickelt und vergleichend gegenübergestellt.

3 Forschungsbedarf und Aufgabenstellung

Nachdem in den vorherigen Kapiteln das allgemeine Untersuchungsgebiet dieser Arbeit sowie der aktuelle Stand der Technik und Forschung dargelegt wurde, konkretisiert dieses Kapitel die Aufgabenstellung. Grundlage hierfür bildet eine Diskussion von Unsicherheiten in der innerbetrieblichen Logistik und deren Auswirkungen auf ein Routenzugsystem, welche als Auslöser einer operativen Logistikplanung fungieren. Auf Basis der identifizierten Unsicherheiten werden Anforderungen an den zu entwickelnden Ansatz zur operativen Fahrplanplanung für Routenzugsysteme abgeleitet. Das Kapitel schließt mit einem Abgleich dieser Anforderungen mit verfügbaren operativen Planungsmodellen und der Formulierung der Forschungsfragen.

3.1 Unsicherheiten in der innerbetrieblichen Logistik

Unsicherheit liegt immer dann vor, wenn eine zukünftige Abweichung von einem geplanten Zustand oder einer geplanten Zielgröße zu erwarten ist, deren Ausmaß oder Wirkung zum aktuellen Zeitpunkt jedoch nicht bekannt ist (epistemische Unsicherheit) oder nicht exakt abgeschätzt werden kann (aleatorische Unsicherheit) [Hel-2010]. Führen diese Unsicherheiten zu negativen Konsequenzen entsteht ein Risiko, vereinbarte Leistungen nicht oder nur zu erhöhten Kosten erbringen zu können [Fri-2010]. *Zäpfel und Piekarz* unterscheiden drei Faktoren, welche zu logistischer Planungsunsicherheit führen können: **Prozessunsicherheit** bezeichnet das Risiko, dass ein Prozess aufgrund interner Störgrößen wie bspw. Betriebsmittelausfällen oder krankheitsbedingten Personalmangel nicht die geplante Leistung erbringt. **Nachfrageunsicherheit** resultiert aus dem begrenzten Wissen und der daraus folgenden eingeschränkten Prognostizierbarkeit des zukünftigen Kundenbedarfs bzw. der tatsächlich geforderten Prozessleistung. Demgegenüber werden **Beschaffungsunsicherheiten** durch den Lieferanten hervorgerufen, bspw. wenn vereinbarte Liefermengen oder Liefertermine nicht eingehalten werden [Zäp-1998; Wil-2011, S. 72].

Diese Unsicherheitsfaktoren können auch auf innerbetriebliche Routenverkehre übertragen werden. Das Routenzugsystem stellt dabei die zur Verfügung stehende Prozessleistung bereit und ist einer Prozessunsicherheit aufgrund möglicher interner Störungen unterworfen. In diesem Fall resultiert eine Abweichung zwischen dem geplanten und tatsächlichen Transportangebot. Die entstehende Differenz muss durch das

Vorhalten kostenintensiver Sicherheiten bspw. in Form von Springerfahrern ausgeglichen werden. Die Auswirkungen von Prozessunsicherheiten sind in Abbildung 3-1 links schematisch dargestellt.

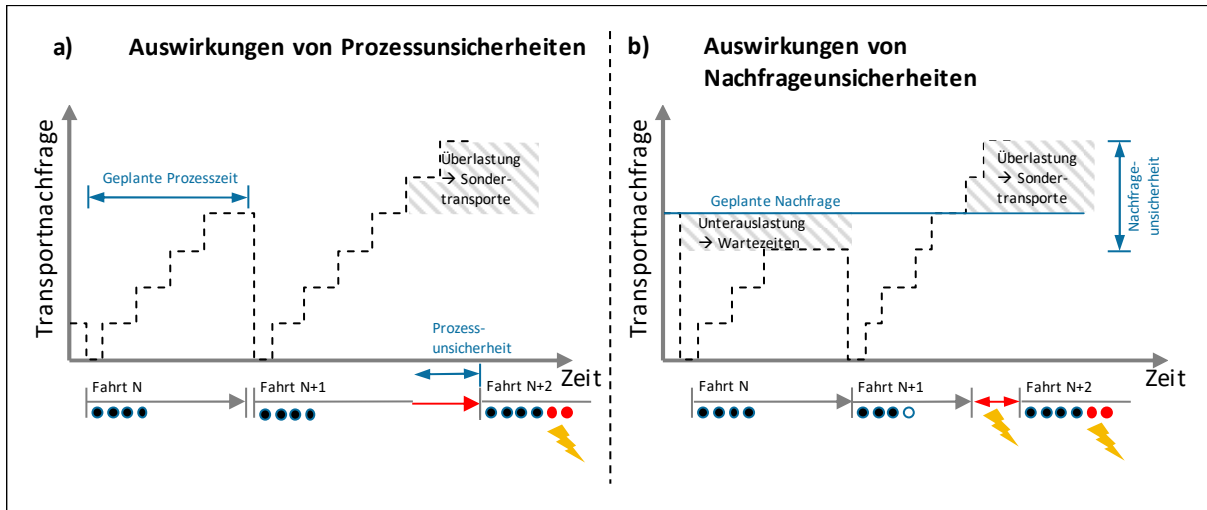


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Folgen von Prozessunsicherheiten (links) und Nachfrageunsicherheiten (rechts) (eigene Darstellung)

Bei konstanter Transportnachfrage (ohne Nachfrageunsicherheiten) fällt in jeder Zeitperiode eine identische Anzahl an Transportaufträgen an, welche durch das Routenzugsystem transportiert werden muss. Im Beispiel ist das Routenzugsystem darauf ausgelegt, vier Transportaufträge auf einer Fahrt auszuliefern¹⁵, für welches eine bestimmte Prozesszeit benötigt wird (Dauer Fahrt N). Verlängert sich diese Prozesszeit aufgrund von Prozessunsicherheiten, kehrt der Routenzug später an die Quelle zurück (Dauer der Fahrt N+1 > Dauer der Fahrt N). Da in dieser längeren Zeitspanne jedoch auch mehr Transportaufträge angefallen sind, übersteigt die Transportnachfrage auf der darauffolgenden Fahrt (Fahrt N+2) die Kapazität des Routenzuges, und es muss bspw. mit einer Springerfahrt reagiert werden.

Die Kunden innerhalb eines Routenzugsystems stellen die zu beliefernden Senken dar, deren Nachfrageverhalten einer Nachfrageunsicherheit unterworfen sein kann. Hier besteht ein Risiko, dass der tatsächliche Transportbedarf gegenüber dem der Planung zugrunde gelegten Transportbedarf abweicht. Die Auswirkungen hiervon sind in Abbildung 3-1 rechts schematisch dargestellt. Wird davon ausgegangen, dass die Prozesszeit für die Tour eines Routenzugs konstant ist (ohne Prozessunsicherheiten), steht in konstanten Abständen ein bestimmtes Transportangebot zur Verfügung, im Beispiel vier Transportaufträge pro Fahrt¹⁵. Ist der reale Transportbedarf, welcher in dieser Zeitspanne anfällt (Fahrt N), geringer als die geplante Nachfrage, zieht dies eine

¹⁵ Dies entspricht einem in der Praxis häufigen Anwendungsfall für den Transport von Großladungsträgern mit Routenzügen bestehend aus einer Zugmaschine und vier GLT-Anhängern [Gün-2012].

reduzierte kapazitive Auslastung der Routenzüge sowie Wartezeiten auf Fahrt N+1 nach sich. Eine erhöhte Transportnachfrage führt hingegen zu einer Überschreitung der verfügbaren Routenzugkapazität auf der darauffolgenden Fahrt (Fahrt N+2). Dadurch können wiederum kostenintensive Sondertransporte notwendig werden.

Im Falle von Störungen vorgelagerter Prozesse kann im übertragenen Sinne auch eine Beschaffungsunsicherheit entstehen. Da Letztere jedoch nicht im direkten Einflussbereich der operativen Routenzugplanung liegen, werden im Folgenden nur Prozess- und Nachfrageunsicherheiten betrachtet.

Für die detaillierte Analyse der Prozess- und Nachfrageunsicherheit wurden Einflussfaktoren mittels Literaturrecherche¹⁶ und Leitfadeninterviews aufgenommen. Deren Ergebnisse wurden bereits im Rahmen einer Studie veröffentlicht, an deren Erstellung der Autor mitgewirkt hat (siehe hierzu [Gün-2012, S. 53ff.]). Zur strukturierten Darstellung der Kausalbeziehungen zwischen Unsicherheitsfaktoren (Ursachen) und deren Wirkung (Transportangebot bzw. -nachfrage) werden die nach seinem Erfinder *Karou Ishikawa* benannten Ishikawa-Diagramme verwendet [Ish-1986].

Die Unsicherheitsfaktoren auf das Transportangebot zeigt Abbildung 3-2.

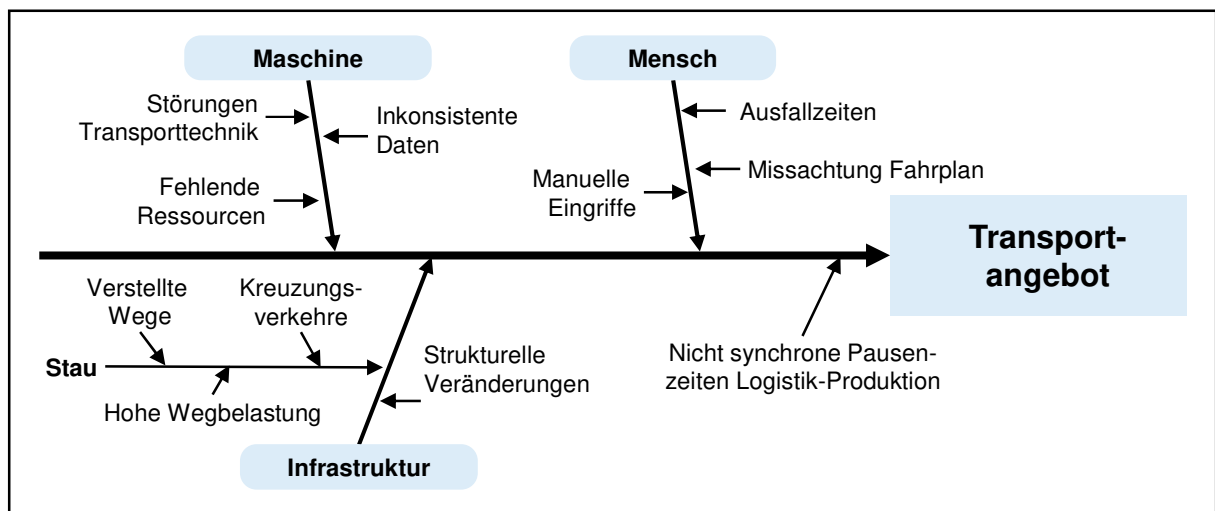


Abbildung 3-2: Ishikawa-Diagramm zu Prozessunsicherheiten innerhalb eines Routenzugsystems (eigene Darstellung)

Neben technischen Faktoren wie störungsbedingten Ausfällen oder inkonsistenten Daten im Steuerungssystem kann der Mitarbeiter zur Nicht-Einhaltung der geplanten Pro-

¹⁶ Siehe hierzu u. a. [Gün-2012, S. 63ff.; Mei-2009, S. 58ff.; Gün-2007]

zesse beitragen. Weitere Einflussfaktoren existieren seitens der Infrastruktur und Arbeitszeitregelungen, wenn die Logistikmitarbeiter einem anderen Schicht- oder Pausenmodell als dem der Produktion folgen.

Seitens der in Abbildung 3-3 dargestellten Unsicherheitsfaktoren auf die Transportnachfrage wird eine weitere Unterscheidung in Einflussgrößen, welche die mittlere Transportnachfrage beeinflussen und solche, welche untertägige Schwankungen hervorrufen, getroffen.

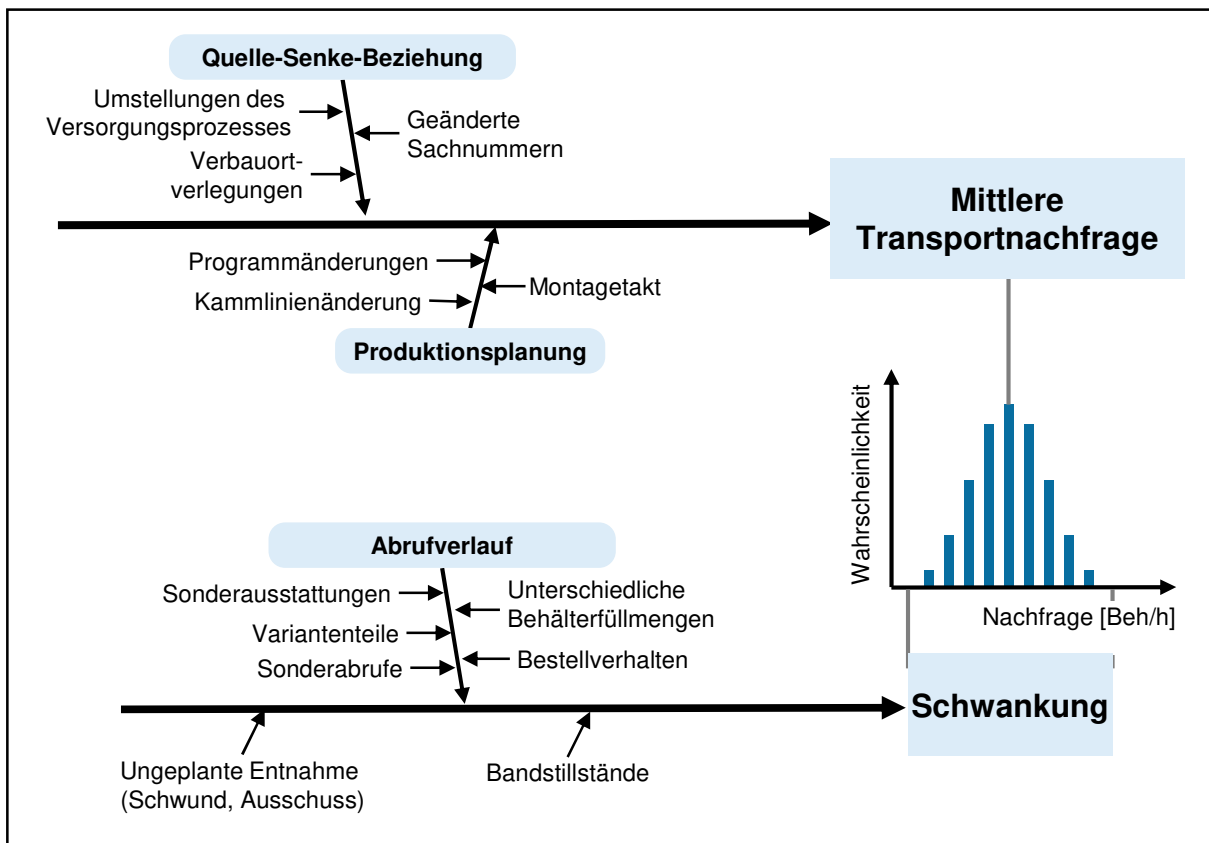


Abbildung 3-3: Ishikawa-Diagramm zu Nachfrageunsicherheiten hinsichtlich der mittleren Transportnachfrage und untertägiger Schwankungen (in ähnlicher Form bereits in [Dew-2015] durch den Autor veröffentlicht)

Erstere liegen u. a. in Änderungen im Produktionsprogramm oder der Gesamtausbringung begründet. Zudem kann die Umstellung der Quelle-Senke-Beziehung einzelner Materialien bspw. durch eine Verlegung des Materialverbauortes oder durch Umstellung des Versorgungsprozesses zu einer geänderten Transportnachfrage je Route führen. Schwankungen hingegen liegen vor, wenn die Transportnachfrage untertägigen Änderungen unterworfen ist. Gründe hierfür liegen u. a. darin, wenn einzelne Materialien nicht in jedes Fahrzeug verbaut werden (bspw. Sonderausstattungen, Varian-

tenteile). Zudem führen unterschiedliche Ladungsträgerfüllmengen und daraus folgende unterschiedliche Ladungsträgerreichweiten verschiedener Materialien zu zufälligen Überlagerungen von Transportaufträgen [Las-2015].

Die Vielfalt dieser Unsicherheitsfaktoren und deren Wirkungen machen deutlich, dass in der Praxis Überplanungen bestehender Routenzugsysteme notwendig werden können. Ein strukturiertes, regelbasiertes und weitgehend automatisiertes Vorgehen bei der operativen Routenzugplanung kann dazu beitragen, die Effizienz bei der Planung und beim Betrieb von Routenzugsystemen dauerhaft sicher zu stellen.

3.2 Anforderungsanalyse und Restriktionen

Nachdem in Kapitel 2 bereits die Grundlagen zur Ausgestaltung von Routenzugsystemen vermittelt wurden, sollen in diesem Abschnitt konkrete Anforderungen und Restriktionen an die operative Routenzugplanung und damit an den zu entwickelnden Ansatz zur operativen Planung für Routenzugsysteme abgeleitet werden. Durch den direkten Einfluss auf den physischen Materialflussprozess muss sich dieser zunächst an der organisatorischen Ausgestaltung des Routenzugsystems orientieren (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3). Des Weiteren können aus den in Abschnitt 3.1 diskutierten Unsicherheiten und betrieblichen Restriktionen konkrete Anforderungen an dessen Ausgestaltung und Integration in den operativen Planungsprozess abgeleitet werden.

Organisatorische Gestaltung des Routenzugsystems

Die Ausgestaltung der Nachschubsteuerung ist i. d. R. kein Freiheitsgrad der Routenzugplanung, sondern muss sich nach den Anforderungen des internen Kunden richten. Insb. in komplexen Anwendungsfällen werden verschiedene Nachschubstrategien parallel verwendet. Muss eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten eines Materials bereitgestellt werden, verbunden mit individuell schwankenden Einzelverbräuchen, so eignen sich bedarfsgesteuerte Nachschubstrategien [Arl-2012]. Dadurch gesteuerte Materialien können „just-in-time“ zum Bedarfszeitpunkt angeliefert werden, wodurch sich der Bestand am Bedarfsort reduzieren lässt [Klu-2010, S. 177f.]. Eine verbrauchsgesteuerte Nachschubstrategie mittels Kanban ist hingegen ein einfaches und robustes Abrufverfahren für Materialien mit konstanten Verbräuchen und geringer Variantenzahl. Ein Nachteil einer verbrauchsgesteuerten Nachschubstrategie kann jedoch sein, dass die Materialbedarfe nicht im Vorfeld bekannt sind und somit nicht vorausschauend disponiert werden können. Diese werden erst zum Verbrauchszeitpunkt gemeldet und müssen dann relativ zeitnah nachversorgt werden. Dabei ist die Einhaltung einer garantierten Wiederbeschaffungszeit (WBZ) von besonderer Relevanz, welche auch in ungünstigen Szenarien seitens der Materialversorgung garantiert werden

kann. Auf deren Basis werden u. a. Melde- und Sicherheitsbestände an den Bedarfsorten ausgelegt. Bei Routenzugsystemen können in verschiedenen Prozessschritten Zeitverzögerungen zwischen dem Erkennen eines Nachschubauftrages und dessen Auslieferung entstehen (vgl. Abschnitt 5.1), welche bei der Fahrplanerstellung berücksichtigt werden müssen. So muss bspw. sichergestellt werden, dass ein Routenzug in einem definierten Intervall die Bedarfsorte passiert, um etwaige Nachschubaufträge zu erkennen. Da der zu entwickelnde Ansatz also sowohl für bedarfs- als auch verbrauchsgesteuerte Nachschubstrategien angewendet werden soll, müssen zudem zeitliche Restriktionen in die Planung des Routenzugsystems mit einfließen.

Ebenfalls grundlegender Natur sind die Entscheidungen hinsichtlich der Abfahrzeitsteuerung des Routenzugsystems und der Routenführung. Diese definieren Freiheitsgrade der operativen Planung. Bei Routenzugsystemen mit variablen Routen und / oder (Abfahrts-) Zeitpunkten entfällt ein wesentlicher Teil der Entscheidungen auf die untertägige, i. d. R. IT-gestützte Steuerung. Die operative Planung hat hier lediglich sicherzustellen, dass ausreichend Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Bei getakteten Routenzugsystemen mit statischen Routen wiederum obliegt es der operativen Planung, die Routen und Fahrpläne festzulegen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Vorteilhaftigkeit getakteter Routenzugsysteme mit statischen Routen wird in der Literatur umfangreich dargelegt. So verweist *Droste* auf eine „erhöhte Transparenz und Standardisierung für die Montage“ [Dro-2013b, S. 51]¹⁷. Gleichermäßen argumentiert *Klug* und sieht einen Takt als „Rhythmus- und Impulsgeber für alle Produktions- und Logistikprozesse im Unternehmen“ und damit integralen Bestandteil einer schlanken Logistik [Klu-2010, S. 257].

In der Dissertation von *Klenk* werden die unterschiedlichen Steuerungsstrategien für Routenzugsysteme auch quantitativ bewertet. Sie zeigt, dass bei getakteten Routenzugsystemen eine kürzere und stabilere Auftragsdurchlaufzeit erreicht werden kann als bei Routenzugsystemen mit auslastungsorientierter Wahl der (Abfahrts-)Zeitpunkte (vgl. Abschnitt 2.2.3) [Kle-2017, S. 255]. Abhängig von der Wahl der Routenführung und -taktzeit lässt sich die mittlere sowie maximale Auftragsdurchlaufzeit bei getakteten Routenzugsystemen um 25 % bis 35 % reduzieren gegenüber einer auslastungsorientierten Steuerung [Kle-2017, S. 250]. Die Höhe der Auftragsdurchlaufzeit sowie deren Schwankungsbreite korreliert direkt mit der Höhe der Melde- und Sicherheitsbestände an den Bedarfsorten: Benötigt die Nachversorgung (einzelner) Materialien/Transportaufträge länger, müssen an den Bedarfsorten höhere Bestände vorgehalten werden, um diese Zeitspanne zu überbrücken. Angesichts der in Abschnitten 1.1 und 1.2 dargelegten Anforderungen an die Produktionslogistik sind Strategien mit

¹⁷ Ähnliche Schlussfolgerungen ziehen bspw. auch Boppert; Kilic, Durmusoglu und Baskak; Baudin sowie Smalley und Womack [Bop-2008, S. 84; Kil-2012; Bau-2004, S. 68ff.; Sma-2004, S. 57]

geringeren Auftragsdurchlaufzeiten und damit Melde- und Sicherheitsbeständen zu präferieren. Nicht zuletzt sind getaktete Routenzugsysteme mit statischen Routen in der industriellen Praxis am weitesten verbreitet [Lie-2017, S. 42; Gün-2012, S. 39], weshalb diese auch im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen. Bei dieser Ausprägungsform von Routenzugsystemen ergibt sich jedoch die Gefahr, dass bei ungünstigem Verhältnis zwischen Taktzeiten der Routen und Umlaufzeiten der Routenzüge erhöhte Wartezeiten entstehen (vgl. Abschnitt 6.4). Dieser negative Effekt kann durch eine flexible Fahrzeugzuordnung kompensiert werden [Dew-2014; Kil-2012].

Aus diesen Ausführungen lassen sich die folgenden Anforderungen zusammenfassen:

- **A-1 Beliebige Nachschubsteuerung:** Es sollen sowohl verbrauchs- als auch bedarfsorientierte Nachschubsteuerung abgebildet werden können.
- **A-2 Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen:** Es muss sichergestellt werden, dass Transportaufträge innerhalb einer definierten Zeitspanne erkannt und ausgeliefert werden.
- **A-3 Statische Routenführung:** Die Routenführung erfolgt starr, d. h. jede Senke ist genau einer Route zugewiesen und es werden auf jeder Tour auf einer Route alle zugewiesenen Senken passiert.
- **A-4 Getaktete Abfahrtszeitsteuerung:** Auf einer Route werden Touren in gleichmäßigen Zeitabständen nach einem festen Takt gestartet.
- **A-5 Variable Fahrzeugzuordnung:** Durch eine variable Zuweisung der Routenzüge auf Touren unterschiedlicher Routen soll eine gute zeitliche Auslastung erzielt werden.

Betriebliche Anforderungen und Restriktionen

Bereits in Abschnitt 3.1 wurde aufgezeigt, dass sowohl die Transportnachfrage als auch das Transportangebot zahlreichen Unsicherheiten unterworfen sind, welche zu ständig wechselnden Transportvolumina innerhalb eines Routenzugsystems führen können. Entsprechend der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Planungsaufgaben lassen sich drei Freiheitsgrade der operativen Routenzugplanung ableiten, durch welche auf diese Unsicherheiten reagiert werden kann:

- Anpassung der Routenverläufe
- Anpassung der Routentakte / des Routenzugfahrplans

- Anpassung der Ladelisten, bspw. indem dringende Transportaufträge vorgezogen werden.

Eine Anpassung der Routenverläufe würde voraussetzen, dass die Bedarfsorte flexibel zu Routen gruppiert werden können. In der industriellen Praxis würden sich dadurch u. a. ein wiederkehrender Einweisungsaufwand für Mitarbeiter, ein hoher Datenpflegeaufwand in Produktivsystemen (insb. Routenzugsteuerung, Abrufsysteme) und eine rollierende Anpassung von Visualisierungen (bspw. Routenverläufe, Beschriftungen, Behälterlabel etc.) ergeben. Demnach kann es aus betrieblichen Gesichtspunkten von Vorteil sein, vordefinierte Routenverläufe nicht zu überplanen, sondern auf Veränderungen primär über Anpassungen des Fahrplans im Rahmen der Fahrplanerstellung zu reagieren. So können Transportnachfrageänderungen über eine Veränderung des Routentaktes abgefangen werden. Änderungen des Streckennetzes oder geänderte Senken führen dann auch nur zu Anpassungen der dadurch betroffenen Route(n) anstatt zu Änderungen des Gesamtsystems. Die Anpassung der Ladelisten wiederum wird im vorliegenden Fall ebenfalls nicht als Freiheitsgrad der operativen Routenzugplanung gesehen, da nicht sichergestellt werden kann, dass alle Transportaufträge im Vorfeld bekannt sind. So werden verbrauchsgesteuerte Nachschubaufträge oder ungeplante Aufträge bspw. aufgrund von Qualitätsmängeln oder Schwund erst zum Bedarfszeitpunkt gemeldet.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung. Es handelt sich hier um Verteiltransporte, bei denen mehrere Routenzüge aus derselben Quelle die Bedarfsorte bedienen. Somit stellt der Routenzugbahnhof an der Quelle einen Engpass innerhalb des Routenzugsystems dar. Unterschiedliche Taktzeiten der einzelnen Routen können dort dazu führen, dass sich Routenzüge bezüglich ihrer Abfahrtszeiten ungünstig überlagern. Es resultieren Behinderungen im Routenzugbahnhof und vorgelagerte Prozesse werden ungleichmäßig ausgelastet. Mittels einer geeigneten Logik zur Wahl der Taktzeiten und Staffelung der einzelnen Touren zueinander sind diese Überschneidungen zu vermeiden.

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Anforderungen und Restriktionen (ergänzend zu den bereits formulierten):

- **A-6 Taktanpassung:** Durch eine Anpassung des Routentaktes an die mittlere Transportnachfrage einer Route soll eine gute kapazitive Auslastung erzielt werden. Dies bedeutet insb., dass bei Änderungen der Transportnachfrage der Takt der betroffenen Routen angepasst wird.

- **A-7 Synchronisation mit Quelle:** Überschneidungsfreie Abfahrzeiten an der Quelle (Routenzugbahnhof) sollen eine geglättete Auslastung vorgelagerter Prozesse garantieren.
- **R-1 Keine Routenanpassung:** Aufgrund des hohen Datenpflege- und Änderungsaufwands ist die Routenführung nicht kurzfristig anpassbar.
- **R-2 Keine Beladeplanung:** Transportaufträge sind erst zum Bedarfszeitpunkt bekannt, weshalb die Beladeplanung kein Bestandteil der operativen Routenzugplanung ist. Dies obliegt der untätigen Steuerung.

3.3 Anforderungsabgleich

Ein Abgleich der zuvor hergeleiteten Anforderungen mit den in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Ansätzen zur operativen Routenzugplanung ist notwendig, um die Notwendigkeit eines neuen Ansatzes zur Fahrplanplanung für Routenzugsysteme zu belegen. Entsprechend Anforderung A-6 werden nur diejenigen Modelle und Methoden weiter betrachtet, welche das DL2-scheduling isoliert oder integriert beinhalten. Zur Kennzeichnung des Erfüllungsgrads der jeweiligen Anforderungen wird dabei die folgende, dreistufige Skala gewählt:

- ● (erfüllt): Die Anforderung/Restriktion wird vollumfänglich unterstützt
- ◐ (neutral) Auf die entsprechende Anforderung/Restriktion wird nicht explizit eingegangen, jedoch kann dies entsprechend der Modellbeschreibung auch nicht ausgeschlossen werden.
- ○ (nicht erfüllt): Die Erfüllung der Anforderung/Restriktion ist gänzlich durch die Formulierung des Modells ausgeschlossen.

Folgende Tabelle dient hierfür als Übersicht und wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts erläutert:

Tabelle 3-1: *Abgleich der Modelle und Methoden zur Routenzugplanung mit den Anforderungen an die operative Planung getakteter Routenzugsysteme mit statischen Routen*

Beitrag	A-1 Beliebige Nachschubsteuerung	A-2 Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen	A-3 Statische Routenführung	A-4 Getaktete Abfahrtszeitsteuerung	A-5 Variable Fahrzeugzuordnung	A-6 Fahrplananpassung	A-7 Synchronisation mit Quelle	R-1 Keine Routenanpassung	R-2 Keine Beladeplanung
[Cho-2002]	○	◐	○	○	●	○	○	○	○
[Cos-2008]	○	◐	●	●	●	○	●	●	●
[Dre-2009]	○	◐	●	●	○	●	○	○	○
[Dro-2013b]	○	○	●	●	○	◐	○	●	●
[Emd-2012b]	○	◐	●	●	○	●	○	○	●
[Emd-2015]	○	◐	●	○	○	●	○	●	○
[Fac-2013]	○	◐	●	●	○	●	○	●	○
[Fat-2014]	○	◐	●	●	○	●	○	●	○
[Gol-2012]	○	◐	○	○	●	●	○	○	○
[Sat-2013]	○	○	●	●	○	●	○	○	○
[Tes-2019]	●	●	○	○	●	●	○	○	◐
[Vai-1999]	○	○	●	●	○	○	○	○	●
[VDI-5586]	●	○	●	●	○	○	○	●	●

Hinsichtlich der Nachschubsteuerung (Anforderung A-1) kann festgehalten werden, dass alle Modelle entweder eine bedarfs- oder verbrauchsorientierte Nachschubstrategie voraussetzen. Eine universelle Anwendbarkeit ist nicht gegeben. Damit einhergehend werden z. T. zeitliche Restriktionen (Anforderung A-2) seitens der Transportaufträge betrachtet, allerdings repräsentieren diese nur Restriktionen der jeweiligen Nachschubstrategie. So werden definierte Maximalbestände in Form von frühest- und spätestmöglichen Bereitstellzeitpunkten bei der Fahrplanplanung berücksichtigt,

wodurch jedoch nicht sichergestellt ist, dass auch die Auslösung von Nachschubaufträgen bspw. durch Einsammeln von Kanbans in gewissen Intervallen erfolgt. Viele der vorgestellten Ansätze betrachten die Routenplanung als ein entscheidendes Optimierungskriterium und fokussieren die Findung einer möglichst optimalen Route mittels angepasster vehicle routing Probleme. Auch wenn einige Modelle auf die Generierung statischer Routen mit getakteten Abfahrtszeiten angepasst sind, würde deren Anwendung bei veränderten Eingangsdaten eine andere Routendefinition ergeben bzw. sich diese aufgrund der z. T. heuristischen Verfahren zwischen mehreren Lösungen unterscheiden. Deren Einsatz würde demnach eine flexible Routenführung voraussetzen, welche in der Praxis nicht gewährleistet werden kann (Anforderung A-3, Restriktion R-1). Eine variable Fahrzeugzuordnung (Anforderung A-5) wird darüber hinaus nur in den wenigsten Ansätzen betrachtet. Auch bleiben Kapazitätsbeschränkungen seitens der Quelle und vorgelagerter Prozesse (Anforderung A-7) in der Literatur zur operativen Routenzugplanung gänzlich unberücksichtigt. Lediglich der simulationsbasierte Ansatz von *Costa et al.* bewertet die Folgen von Überlagerungen unterschiedlicher Touren, ohne dass diese explizit in die Fahrplanplanung einfließen.

Da kein verfügbarer Ansatz die vorgestellten Anforderungen erfüllt, ist die Entwicklung eines neuen Modells zur operativen Routenzugplanung erforderlich. Da das Modell explizit die Fahrplanplanung für getaktete Routenzugsysteme adressieren soll, wird dieses im Folgenden als Modell zur Generierung von Taktfahrplänen für Routenzugsysteme bezeichnet.

3.4 Präzisierung der Forschungsfrage

Auf Basis des dargelegten Wissensstandes zu Routenzugsystemen sowie der operativen Routenzugplanung widmet sich der folgende Abschnitt der Präzisierung der übergeordneten Forschungsfrage:

Wie kann ein anwendungsorientierter Ansatz zur operativen Planung getakteter Routenzugsysteme in der Produktionslogistik ausgestaltet werden?

Der Anwendungsbezug soll dabei sicherstellen, dass praktische Probleme erkannt und beschrieben werden. Die zu entwickelnde Lösung soll dabei zu einer tatsächlichen Verbesserung der Situation führen und für den potenziellen Nutzer anwendbar sein [Mil-2008]. Hierzu ist zunächst festzulegen, welche konkrete Planungsaufgaben im Rahmen der operativen Routenzugplanung getakteter Routenzugsysteme mit statischer Routenführung durchzuführen sind. Hierfür sind die notwendigen Eingangsdaten und Prozesse zu definieren, um diese analytisch zu beschreiben. Gleichzeitig müssen

Wechselwirkungen zwischen den Planungsaufgaben erkannt und quantifiziert werden, um diese in einem Gesamtplanungsmodell (vgl. Kapitel 4) abzubilden. Die Anwendbarkeit des Planungsmodells für einen potenziellen Nutzer ist dabei nur gegeben, wenn das Planungsmodell regelbasiert lösbar ist. Darüber hinaus sollten die Ergebnisse empirisch belegt und Ergebnisse sowie Lösungsweg verallgemeinerbar sein [Lin-2012, S. 20ff.].

Daraus ergeben sich folgende, konkrete Teilfragen zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage:

1. Welche Planungsaufgaben sind im Rahmen der operativen Routenzugplanung getakteter Routenzugsysteme mit statischer Routenführung durchzuführen?

Diese Teilfrage wird in Kapitel 4 beantwortet.

2. Wie lassen sich die Inhalte der jeweiligen Planungsaufgabe analytisch beschreiben?

Diese Teilfrage wird in den Kapiteln 5 und 6 beantwortet.

3. Welche Wechselwirkungen und Schnittstellen existieren zwischen den unterschiedlichen Planungsaufgaben?

Diese Teilfrage wird in Kapitel 7 beantwortet.

4. Lassen sich die Planungsaufgaben in einem Gesamtplanungsmodell abbilden und lösen?

Dies Teilfrage wird in Kapitel 7 beantwortet.

5. Welche Methoden, Eingangsdaten und Softwarewerkzeuge sind hierfür notwendig?

Diese Teilfrage wird in den Kapitel 5 und 6 für die jeweiligen Planungsaufgaben und in Kapitel 7 für das Gesamtplanungsmodell beantwortet.

6. Wie kann der entwickelte Planungsansatz sowie dessen Ergebnisse evaluiert und verallgemeinert werden?

Diese Teilfrage wird in Kapitel 8 beantwortet.

4 Herleitung eines Modells zur operativen Routenzugplanung

Die Lösung einer realen Problemstellung mittels formalisierter, automatisierbarer Algorithmen setzt die Abstraktion der Realität in Form eines Modells voraus. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrades realer Probleme werden Modelle stets auf eine konkrete Fragestellung hin aufgestellt und Zusammenhänge, welche zur Beantwortung dieser Fragestellung nicht notwendig sind, werden entsprechend vereinfacht und approximiert [Gün-2015b, S. 45; Hof-2014, S. 1f.]. Die *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1* definiert ein Modell als eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. [...] Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“ [VDI-3633a, S. 3].

Modelle, welche speziell im Rahmen der Planung eingesetzt werden, werden als Planungsmodelle bezeichnet. Darin sind alle Planungsaufgaben und zu planenden Teilbereiche mittels Variablen beschrieben. Werden jeweils nur einzelne / wenige Planungsaufgaben simultan gelöst wird die Planung mittels mehrerer s. g. Teilplanungsmodelle sukzessive durchgeführt. Hierzu sind zunächst die einzelnen Planungsaufgaben und deren Lösungsreihenfolge zu definieren. Da bei einem sukzessiven Vorgehen die Ergebnisse des jeweils vorhergehenden Planungsschrittes weiter konkretisiert werden, sind die Schnittstellen und Übergabewerte entsprechend zu definieren. Auf dieser Ebene stellen die Modelle der einzelnen Teilbereiche noch s. g. black-box Modelle dar. Deren beschreibende Variablen werden in der Ausgestaltung der jeweiligen Planungsaufgabe spezifiziert. Dadurch kann die übergeordnete Planungsaufgabe schrittweise gelöst werden, wobei die einzelnen Teilplanungsmodelle eine geringere Komplexität besitzen und einfacher analytisch beschrieben und gelöst werden können. In der Praxis werden Teilplanungsmodelle daher häufig verwendet [Ali-2004, S. 2336]. Diese bringen jedoch den Nachteil mit sich, dass sie nur lokale Optima für die jeweilige Planungsaufgabe liefern. Wechselwirkungen zwischen den Ergebnissen aufeinanderfolgender Planungsaufgaben bleiben unberücksichtigt und es wird i. d. R. kein Gesamtoptimum gefunden. Im Unterschied sind in s. g. Gesamtplanungsmodellen die Variablen aller Planungsaufgaben in einer Zielgleichung verknüpft und es kann das Gesamtoptimum ermittelt werden. Deren Lösung erfordert jedoch i. d. R. Methoden der mathematischen Optimierung sowie die Unterstützung durch die elektronische Datenverarbeitung.

Im Sinne einer durchgängigen, prozessoptimalen Routenzugplanung soll in dieser Arbeit ein Gesamtplanungsmodell für die operative Routenzugplanung erarbeitet werden. Hierfür werden zunächst einzelne Teilplanungsaufgaben formuliert und deren beschreibende Variablen und Wirksummenhänge beschrieben. Die Teilplanungsaufgaben werden anschließend in einem Gesamtplanungsmodell integriert und dessen Lösungsweg beschrieben.

Bereits in Abschnitt 2.3.2 wurden die Planungsaufgaben zur operativen Routenzugplanung, basierend auf der Arbeit von *Battini, Boysen und Emde*, definiert zu:

- Routenplanung (DL2-routing)
- Zeitpunktplanung (DL2-scheduling)
- Beladeplanung (DL2-loading) [Bat-2012]

Entsprechend der übergeordneten Anforderungen wird die Routenfindung nicht als Freiheitsgrad der operativen Routenzugplanung gesehen. Deren Anzahl und Verlauf sind Eingangsgrößen für das Planungsmodell. Weiterhin soll die Beladeplanung ebenfalls nicht betrachtet werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Transportaufträge zum Planungszeitpunkt bekannt sind. Dementsprechend fokussiert die vorliegende Arbeit die Planungsaufgabe Zeitpunktplanung, deren Inhalte im Folgenden näher betrachtet werden und in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt sind.

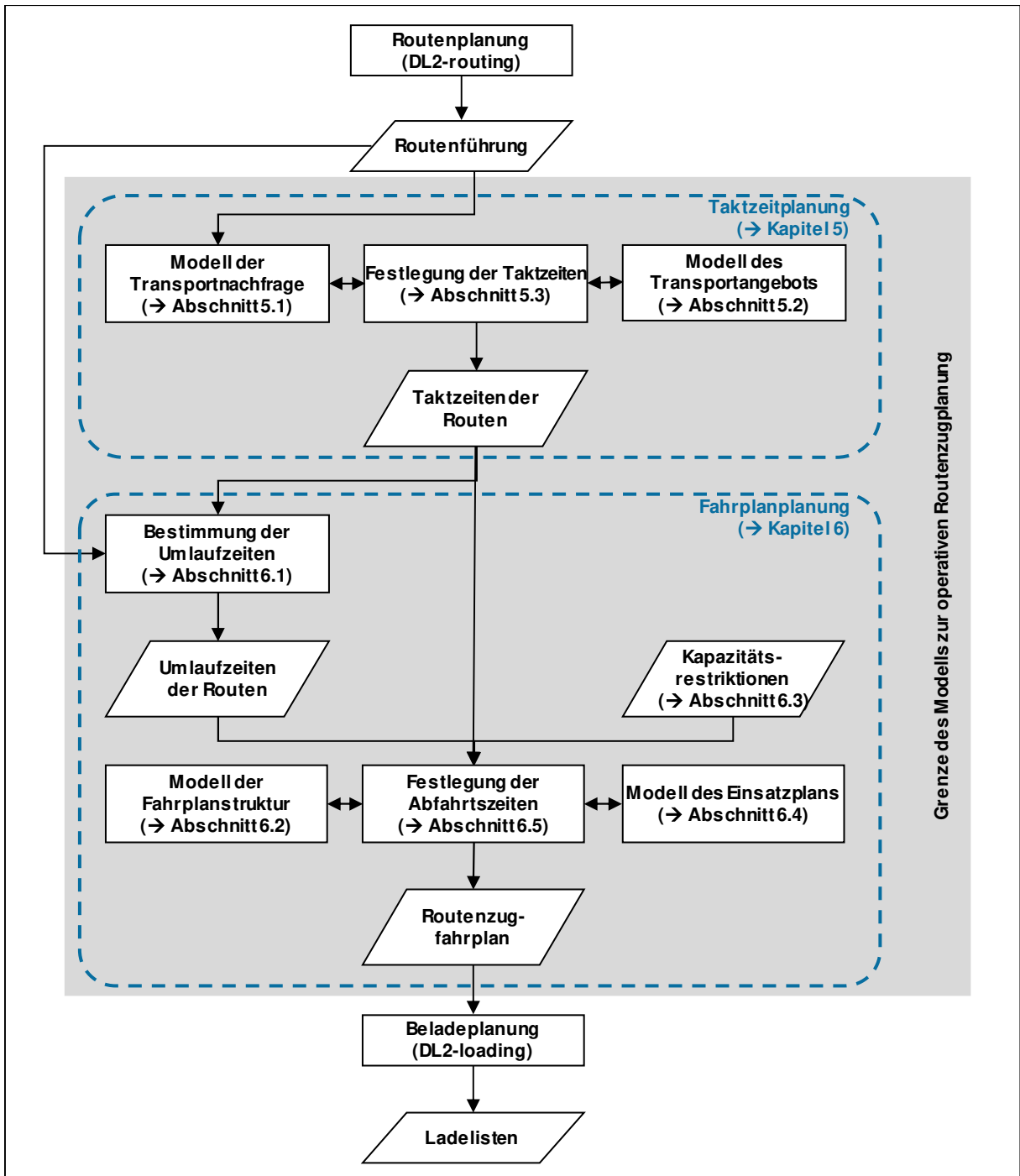


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Modells zur operativen Routenzugplanung sowie den darin enthaltenen Teilplanungsaufgaben (eigene Darstellung)

Grundsätzlich ist es Ziel der Zeitpunktplanung, einen Routenzugfahrplan zu generieren, welcher Zeitpunkte für die Abfahrt und Rückkehr des zugewiesenen Routenzuges beinhaltet. Hierfür muss zunächst bestimmt werden, welches Transportangebot zur Deckung einer gegebenen Transportnachfrage zur Verfügung gestellt werden muss. Das Transportangebot korreliert direkt mit der Taktzeit der einzelnen Routen. Eine hohe Taktzeit bedeutet, dass eine Route seltener durch einen Routenzug bedient wird

und im zeitlichen Mittel entsprechend weniger Ladungsträger transportiert werden können. Bei einer niedrigen Taktzeit steigt die Frequenz, in der Routenzüge die Route bedienen und es können mehr Ladungsträger transportiert werden. Demnach beinhaltet die Teilplanungsaufgabe **Taktzeitplanung** den Abgleich zwischen geforderter Transportnachfrage und verfügbarem Transportangebot. Ziel ist es, die Taktzeiten derart einzustellen, dass die Transportnachfrage unter Berücksichtigung aller zeitlichen Restriktionen gedeckt werden kann und die Transportkapazität der Routenzüge bestmöglich ausgenutzt wird. Hierzu sind zum einen die Transportnachfrage (Wie viele Ladungsträger müssen transportiert werden?) und dem Transportangebot (Wie viele Ladungsträger können auf einer Route transportiert werden?) zu berücksichtigen. Die Zusammenhänge im Rahmen der Taktzeitplanung sind im Kapitel 5 beschrieben.

Ausführungsdauern sowie konkrete Zeitpunkte innerhalb einer Schicht, wann die Routen bedient werden, sind dadurch jedoch noch nicht definiert. Allein durch die Taktzeitplanung lässt sich somit noch kein Routenzugfahrplan erstellen. Ziel der anschließenden Teilplanungsaufgabe **Fahrplanplanung** ist es, einen möglichst optimalen Fahrplan zu generieren, welcher mit einer minimalen Anzahl an Ressourcen, d. h. Routenzügen und Mitarbeitern, ausgeführt werden kann. Hierfür ist es zunächst notwendig, die zeitliche Dauer der Tätigkeiten mittels mathematischer Zusammenhänge zu modellieren um damit die Umlaufzeit¹⁸ einer Tour ermitteln zu können. Gemeinsam mit den Taktzeiten der Routen bietet dies die Grundlage dafür, die Anzahl notwendiger Ressourcen zu ermitteln. Hierfür ist aber noch ein dritter Einflussfaktor relevant: die Abfahrtszeiten der einzelnen Touren. Überlagern sich diese ungünstig, kann dies in bestimmten Zeitintervallen dazu führen, dass mehr Touren gleichzeitig aktiv sind als in anderen Intervallen¹⁹. Um die Abfahrtszeiten im Rahmen der Fahrplanplanung möglichst optimal festzulegen, ist die formale Beschreibung eines Fahrplans sowie des sich daraus ergebenden Ressourceneinsatzplans in einem Modell notwendig. Gemäß den übergeordneten Anforderungen sollen bei der Fahrplanplanung ebenfalls Kapazitätsrestriktionen seitens vorgelagerter Prozesse berücksichtigt werden. Der resultierende Routenzugfahrplan soll überschneidungsfrei sein, d. h. Abfahrten von Routenzügen an der Quelle sollen zeitlich gestaffelt sein, sodass die vorgelagerten Prozesse möglichst gleichmäßig ausgelastet sind. Auch hierfür ist eine mathematische Beschreibung dieser Fahrplanüberschneidungen notwendig.

Bereits aus Abbildung 4-1 ist ersichtlich, dass zwischen den beiden Teilplanungsaufgaben Taktzeit- und Fahrplanplanung Abhängigkeiten bestehen. So bestimmt die Taktzeit einer Route zum einen deren Abfahrtszeiten (Touren auf einer Route werden im Abstand der Taktzeit gestartet), zum anderen aber auch deren Umlaufzeit. Bei einer

¹⁸ Eine Definition folgt in Abschnitt 6.1

¹⁹ ein grafisches Beispiel zeigt Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8

höheren Taktzeit werden mehr Ladeeinheiten pro Tour transportiert, was mehr Zeit beansprucht. Diese Abhängigkeiten können dazu führen, dass bei einer sequentiellen Durchführung der Taktzeit- und Fahrplanplanung u. U. kein optimaler Fahrplan in Bezug auf Ressourceneinsatz und Fahrplanüberschneidungen ermittelt werden kann. Hierzu sei der in Abbildung 4-2 dargestellte Routenzugfahrplan beispielhaft erläutert. Betrachtet wird ein Routenzugsystem bestehend aus zwei Routen, welche von identischen Routenzügen bedient werden sollen, welche jeweils 30 Ladeeinheiten pro Tour transportieren können. Auf Route $R1$ sollen 30 Ladeeinheiten pro Stunde und auf Route $R2$ 20 Ladeeinheiten pro Stunde bereitgestellt werden. In diesem Beispiel würde die Routenzugkapazität optimal ausgenutzt, wenn Route $R1$ mit einer Taktzeit $t_{Takt}^{R1} = 60 \text{ min}$ und Route $R2$ mit $t_{Takt}^{R2} = 90 \text{ min}$ gefahren werden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass für eine Tour auf Route $R1$ 15 Minuten für Beladen, Fahren und Entladen anfallen (Fixzeit unabhängig von der Anzahl transportierter Ladeeinheiten) und pro Ladungsträgerbereitstellung 30 Sekunden zusätzlich anfallen. Damit dauert eine Tour auf Route $R1$ im Mittel 30 Minuten, wenn diese mit einer Taktzeit i. H. v. 60 Minuten gefahren wird. Auf Route $R2$ betragen die Fixzeiten, bspw. bedingt durch längere Fahrwege, 20 Minuten, was zu einer mittleren Dauer pro Tour auf Route $R2$ von 35 Minuten führt, ebenfalls eine auslastungsoptimale Taktzeit i. H. v. 90 Minuten vorausgesetzt. Für diese Konfiguration ergibt sich der in Abbildung 4-2 links dargestellte Fahrplan, worin die Dauer als Balken visualisiert ist (blau: Route $R1$, gelb: Route $R2$). Es ist ersichtlich, dass sich die Touren der beiden Routen überschneiden, unabhängig wie die Abfahrtszeit der ersten Tour auf $R2$ relativ zur ersten Tour auf Route $R1$ gelegt wird. Es müssen in diesem Beispiel also zwei Routenzüge und Mitarbeiter vorgesehen werden. Würde hingegen die Route $R2$ ebenfalls mit einer Taktzeit i. H. v. 60 Minuten gefahren werden, werden pro Tour im Mittel nur noch 20 Behälter transportiert, weshalb sich deren Umlaufzeit auf 30 Minuten reduzieren würde. In diesem Fall könnten die Touren auf Route $R1$ und $R2$ zeitlich so zueinander gelegt werden, dass diese durch einen Routenzug im Wechsel bedient werden können. Der resultierende Fahrplan ist in Abbildung 4-2 rechts dargestellt. In diesem Beispiel ist es also vorteilhaft, eine geringere kapazitive Auslastung zugunsten einer besseren zeitlichen Auslastung der Ressourcen zu akzeptieren.

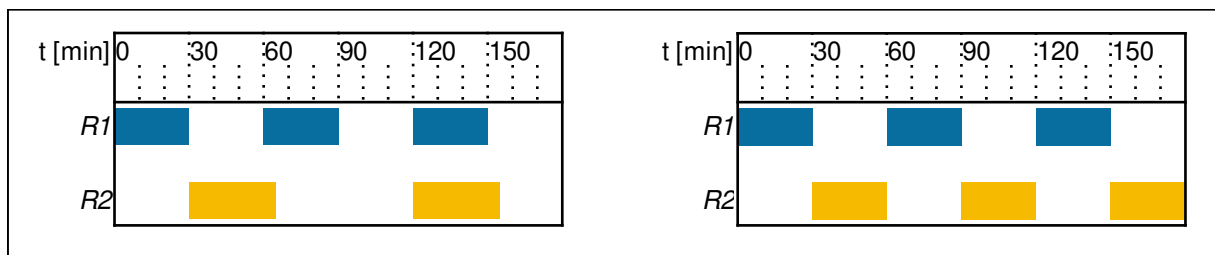


Abbildung 4-2: Beispielhafter Fahrplan für ein Routenzugsystem mit 2 Routen, wenn diese mit der auslastungsoptimalen Taktzeit gefahren werden (links) und wenn die Taktzeit einer Route reduziert würde (rechts) (eigene Darstellung)

Dieses vergleichsweise einfache Beispiel zeigt: Um ein optimales Routenzugsystem operativ zu planen, ist eine integrierte Taktzeit- und Fahrplanplanung notwendig. Daher werden beide Planungsaufgaben in Kapitel 7 zu einer **integrierten Taktzeit- und Fahrplanplanung** zusammengeführt. Hierin werden die Teilplanungsaufgaben Taktzeitplanung und Fahrplanplanung mittels einer gemeinsamen Zielfunktion integriert betrachtet, wobei die Inhalte der Teilplanungsaufgaben über Nebenbedingungen und analytische Zusammenhänge berücksichtigt werden. Im Gesamtplanungsmodell wird derjenige Fahrplan ermittelt, welcher die Transportnachfrage inkl. aller zeitlicher Restriktionen deckt und mit einer minimalen Anzahl an Ressourcen ausgeführt werden kann.

Mittels der in diesem Kapitel beschriebenen Sachverhalte wurde die erste Teilfrage **Welche Planungsaufgaben sind im Rahmen der operativen Routenzugplanung getakteter Routenzugsysteme mit statischer Routenführung durchzuführen?**

beantwortet. In den folgenden Kapiteln werden die Planungsaufgaben Taktzeitplanung (Kapitel 5) und Fahrplanplanung (Kapitel 6) zunächst einzeln analytisch beschrieben. Das Modell zur integrierten Taktzeit- und Fahrplanplanung sowie dessen Lösung erfolgt darauf aufbauend in Kapitel 7.

5 Taktzeitplanung

Aufgabe der Taktzeitplanung ist es, das zur Verfügung zu stellende Transportangebot so zu bemessen, dass die Transportnachfrage gedeckt werden kann. Hierzu ist zunächst festzulegen, welche Daten und Berechnungszusammenhänge für die Bemessung der Transportnachfrage benötigt werden. Dies erfolgt in Abschnitt 5.1. Unabhängig davon wird in Abschnitt 5.2 beschrieben, wie sich das Transportangebot, also die Anzahl an Ladungsträgern, welche auf einer Route transportiert werden können, berechnet. Diese beiden Teilmodelle werden in Abschnitt 5.3 zusammengeführt, um die eingangs formulierte Planungsaufgabe zu beantworten. Viele der in diesem Kapitel beschriebenen Formeln und Berechnungszusammenhänge wurden bereits im Rahmen der Forschungstätigkeit des Autors veröffentlicht (siehe hierzu [Dew-2014]).

5.1 Modellierung der Transportnachfrage

Gegenstand des Transportnachfragemodells ist es, die Anzahl an Ladungsträgern sowie deren Kapazitätsbedarf zu ermitteln, welche je Material im zeitlichen Mittel bereitgestellt werden müssen. Als Bezugsgröße hierfür wird die Absolutzeit, also bspw. die Reichweite eines Ladungsträgers in Zeiteinheiten (ZE), gewählt.

Die Reichweite eines Ladungsträgers $t_{RW,i}$ des Materials i ist verallgemeinert eine Funktion der Bedarfsmenge $n_{Bedarf,i}$ des Materials über einen Betrachtungszeitraum und der Ladungsträgerfüllmenge²⁰ $n_{Füll,i}$:

$$t_{RW,i} = f(n_{Bedarf,i}, n_{Füll,i}) \quad (5-1)$$

Sowohl die Bedarfsmenge als auch die Ladungsträgerfüllmenge sind im allgemeinen Fall nicht als Konstanten anzusehen, sondern obliegen Schwankungen und Veränderungen, welche wiederum zu einer nicht-konstanten Ladungsträgerreichweite führen. In vielen Anwendungsfällen können allerdings einige vereinfachende Annahmen getroffen werden. Die Ladungsträgerfüllmenge eines Materials kann für die operative Routenzugplanung als gegeben und konstant angenommen werden. Diese sowie die Abmessungen eines Ladungsträgers werden im Rahmen der Verpackungsplanung bereits schon im Produktentstehungsprozess festgelegt und können als verlässliche

²⁰ In Wissenschaft und Praxis wird auch der Begriff Füllgrad synonymisch verwendet, welcher sich jedoch stets auf eine Stückmenge bezieht (siehe hierzu bspw. [Klu-2010; Sch-2008a]).

Datengrundlage angesehen werden [Klu-2010, S. 94ff.; Sch-2008a, S. 115]. Dadurch lässt sich Gleichung (5-1) wie folgt vereinfachen:

$$f(n_{Füll,i}) = konst. \rightarrow t_{RW,i} = \frac{n_{Füll,i}}{f(n_{Bedarf,i})} \quad (5-2)$$

Bei Produktionssystemen, welche nach dem Prinzip einer getakteten Variantenfließfertigung betrieben werden (vgl. Abschnitt 8.1), durchlaufen unterschiedliche Produkte und Produktvarianten dieselbe Produktionslinie. Innerhalb eines betrachteten Zeitraums bleibt die Geschwindigkeit der Linie und damit der Produktionstakt t_{PT} gleich [Mol-1997, S. 3ff.]. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass ein Material, sofern es ein Bestandteil eines Produkts bzw. -variante ist, mit einer bekannten Stückmenge Teile pro Produkt $n_{TPP,i}$ benötigt wird. Dieser Wert kann bspw. mittels der Produktstücklisten ermittelt werden. Demnach verbleibt die Zusammensetzung bzgl. Art und Menge der zu produzierenden Produkte PP über einen Betrachtungszeitraum als einziger variabler Parameter und Gleichung (5-2) ergibt sich zu:

$$t_{RW,i} = \frac{n_{Füll,i} \cdot t_{PT}}{n_{TPP,i} \cdot f(PP)} \quad (5-3)$$

Im Rahmen der kurzfristigen Produktionsprogrammplanung und Reihenfolgenbildung kann sich die Zusammensetzung der Produkte sowie deren Produktionsreihenfolge ändern. Da der hier entwickelte Ansatz laut Anforderung A-1 für beliebige Nachschubstrategien anwendbar sein soll, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Produktionsreihenfolge und damit die Reichweite eines Ladungsträgers exakt bekannt sind. Um dennoch berücksichtigen zu können, dass bestimmte Materialien in Abhängigkeit der Produktionsprogrammplanung nicht in jedes Produkt einfließen, wird eine s. g. Verbauquote $P_{VQ,i}$ eingeführt. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Material in einer Produktvariante enthalten ist (siehe auch [Las-2015; Dre-2009]). Für Materialien²¹, welche in jedes Produkt einfließen, beträgt diese 100%. Bei Materialien mit einer Verbauquote kleiner 100% handelt es sich entweder um Materialien, von denen unterschiedliche Varianten am Bedarfsort sortenrein bereitgestellt werden oder um Materialien, welche nur in bestimmten Produktkonfigurationen verbaut werden (z. B. Sonderausstattungen). Für eine Ermittlung der Verbauquote können entweder Vergangenheitsdaten, lang- und mittelfristige Produktionsprogrammpläne oder Stückzahlprognosen herangezogen werden. Mit einer über einen Betrachtungszeitraum ermittelten Verbauquote berechnet sich die mittlere Ladungsträgerreichweite $\overline{t_{RW,i}}$ eines Materials in diesem Zeitraum entsprechend Formel (5-4). Der reziproke

²¹ Darunter können auch Teile mit mehreren Varianten (s. g. Variantenteile) fallen, sofern diese sequenziert oder als Warenkorb an den Bedarfsorten bereitgestellt werden. Deshalb wird bewusst der neutrale Begriff Material gewählt.

Wert der mittleren Ladungsträgerreichweite bildet folglich den mittleren Ladungsträger-Durchsatz²² $\overline{\lambda_{LT,i}}$ lt. Formel (5-5), also diejenige Anzahl an Ladungsträgern, welche pro Zeiteinheit bereitgestellt werden muss.

$$\overline{t_{RW,i}} = \frac{n_{Füll,i} \cdot t_{PT}}{n_{TPP,i} \cdot P_{VQ,i}} \quad (5-4)$$

$$\overline{\lambda_{LT,i}} = \frac{1}{\overline{t_{RW,i}}} = \frac{n_{TPP,i} \cdot P_{VQ,i}}{n_{Füll,i} \cdot t_{PT}} \quad (5-5)$$

- mit $\overline{t_{RW,i}}$ mittlere Ladungsträgerreichweite des Materials i in [min/LT]
 $\overline{\lambda_{LT,i}}$ mittlerer Ladungsträger-Durchsatz des Materials i in [LT/min]
 $n_{Füll,i}$ Ladungsträgerfüllmenge des Materials i in [Stk/LT]
 t_{PT} Produktionstakt in [min]
 $n_{TPP,i}$ Teile pro Produkt des Materials i in [Stk]
 $P_{VQ,i}$ Verbauquote des Materials i in [%]

Die zuvor genannten Parameter und Zusammenhänge sind anhand zweier exemplarischer Bestandsverläufe in Abbildung 5-1 dargestellt.

²² In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3978 bezeichnet der Ladungsträger-Durchsatz diejenige „Fördergutmenge, die in einer bestimmten Zeiteinheit die betrachtete Stelle des Systems passiert.“ [VDI-3978, S. 2]

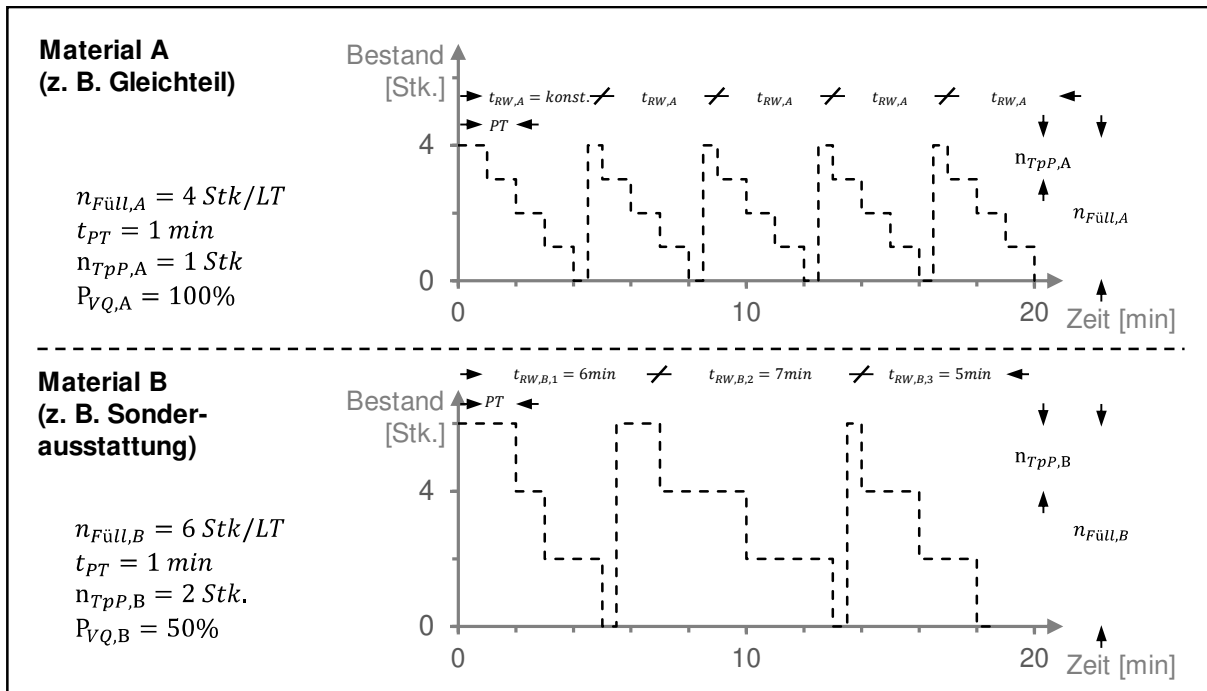


Abbildung 5-1: Exemplarische Bestandsverläufe und Ladungsträgerreichweiten bei unterschiedlichen Verbauquoten (eigene Darstellung)

Bei Material A (Abbildung 5-1 oben) handelt es sich um ein Gleichteil, welches in jede Produktvariante einfließt. Ausgehend vom initialen Bestand am Bedarfsort i. H. v. vier Stück²³, welches gleichzeitig der Ladungsträgerfüllmenge $n_{Füll,A}$ entspricht, wird in jedem Produktionstakt (im Beispiel eine Minute) ein Stück entnommen. Nach vier Produktionstakten ist der Ladungsträger leer und es wird ein neuer Ladungsträger benötigt. Die Ladungsträgerreichweite $t_{RW,A}$ beträgt konstant vier Minuten. Ein gegensätzliches Beispiel zeigt der Bestandsverlauf von Material B (Abbildung 5-1 unten). Dabei handelt es sich um ein Variantenteil mit einer Verbauquote i. H. v. 50 %, d. h. Material B fließt im Mittel nur in jedes zweite Produkt ein. In den ersten beiden Produktionstakten wird Material B nicht benötigt, im dritten hingegen schon und es werden zwei Stück aus dem Behälter entnommen (Teile pro Produkt $n_{TPP,B} = 2$). Die Ladungsträgerreichweite $t_{RW,B}$ ist in diesem Fall nicht konstant, sondern schwankt abhängig von der Reihenfolge der Produkte und deren Ausstattung.

Neben dem Ladungsträger-Durchsatz muss bei der Ermittlung der Transportnachfrage ebenfalls einfließen, welchen Kapazitätsbedarf die Ladungsträger auf dem Routenzug einnehmen. Entsprechend der Bauteilgeometrie und weiterer materialspezifischer Einflussgrößen wie bspw. notwendiger Transportsicherungen oder Gewichtsrestriktionen variieren auch die Größen der Ladungsträger (vgl. Abschnitt 2.2.1) und nehmen unter-

²³ In Realität würden bei einem solchen Beispiel mehrere Behälter des Materials am Bedarfsort bevorratet, sodass ein definierter Mindestbestand nicht unterschritten wird.

schiedliche Kapazitäten auf dem Routenzug ein. Zudem ist durch die technische Ausführung der Routenzüge vorgegeben (vgl. Abschnitt 2.2), wie die Ladungsträger auf den Anhängern oder Transporthilfsmitteln angeordnet werden können. So können Anhänger für den Transport von GLT je nach Anbieter zwischen einem und acht Ladungsträger aufnehmen. KLT hingegen werden auf speziell konzipierten Anhängern oder Transporthilfsmitteln (bspw. Tablarwagen) oftmals hintereinander gereiht und / oder gestapelt, wodurch diese bis zu 45 KLT transportieren können [Gün-2012, S. 54]. Abbildung 5-2 zeigt hierfür schematisch die unterschiedlichen Packschemata, welche je nach Anwendungsfall auf dem Routenzug resultieren können.

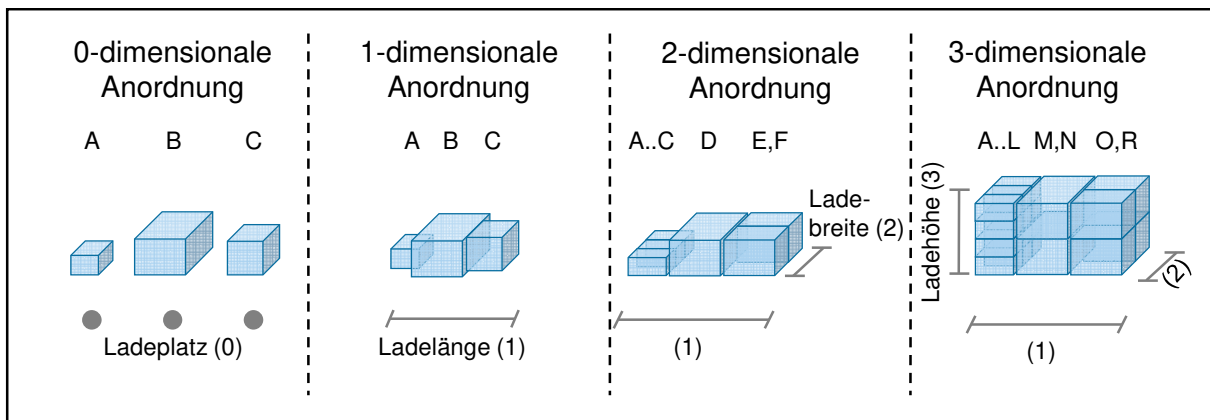


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Packschemen (eigene Darstellung)

Würde die Transportnachfrage nur in Anzahl Ladungsträgern gemessen, würde deren Größe und ggf. deren Packschema auf dem Routenzug nicht betrachtet werden. So würde bspw. ein Ladungsträger der Grundfläche 600 mm x 400 mm gleich zu einem Ladungsträger der Grundfläche 300 mm x 200 mm behandelt, obwohl auf gleicher Fläche entweder ein Ladungsträger 600 mm x 400 mm oder vier Ladungsträger 300 mm x 200 mm transportiert werden könnten. Daher wird die Transportnachfrage auf die Anzahl an Ladepositionen LP_i normiert, welche durch den Ladungsträger des Materials i vereinnahmt werden. Je nach Anordnung auf dem Routenzug kann diese Längen-, Flächen oder Volumeneinheiten repräsentieren. Folglich entspricht LP_i nicht, je nach Anordnung auf dem Routenzug, der Ladungsträgerlänge, -grundfläche oder -höhe, sondern einer natürlichen Zahl zwischen 1 und der verfügbaren Anhängerkapazität in Ladepositionen. Diese Diskretisierung ist möglich, da in der Praxis i. d. R. ein schwach heterogenes Sortiment an Ladungsträgern existiert, d. h. die Anzahl unterschiedlicher Ladungsträger ist gering im Vergleich zur absoluten Anzahl an im Umlauf befindlichen Ladungsträgern [Con-2014, S. 31ff.]. Zudem ist mit dem ISO-Modulmaß von 400 mm x 600 mm nach ISO-Norm 3394 ein internationales Standardmaß für Ladungsträger spezifiziert [ISO-3394]. Aus Vielfachen bzw. Teilern dieses Modulmaßes

lassen sich die Grundmaße der Mehrheit der in Europa verbreiteten Ladungsträger²⁴ ableiten [Fri-2013, S. 109f.].

Die Berechnung der Anzahl an Ladepositionen je Ladungsträger ist dabei abhängig von der gewählten Anordnung auf dem Routenzug. Bei einer 0-dimensionalen Anordnung, d. h. jeder verfügbare Ladeplatz kann unabhängig von dessen Größe nur durch genau einen Ladungsträger belegt werden, ist die Anzahl an Ladepositionen je Ladungsträger konstant 1. Werden die Ladungsträger in einer Dimension gepackt, also entweder aneinandergereiht oder gestapelt, ergibt sich $n_{LP,i}$ aus der Division der Ladungsträgerabmessung in Packrichtung durch das Längenraster. Das Längenraster entspricht, analog zum grundflächenbezogenen Modulmaß nach [ISO-3394], derjenigen Abmessung, aus deren ganzzahligen Vielfachen alle Ladungsträgerabmessungen in Packrichtung gebildet werden können. Formal lässt sich dieses über den größten gemeinsamen Teiler (ggT) der Ladungsträgerabmessungen in Packrichtung aller Ladungsträger im Sortiment berechnen. Bei einer 2-dimensionalen Anordnung erfolgt die Berechnung der Anzahl an Ladepositionen auf ähnlichem Weg, nur dass hier die Ladungsträgergrundfläche in Relation zum Flächenraster gesetzt wird. Bei einer 3-dimensionalen Anordnung dienen die Ladungsträgervolumina als Bezugsgröße. Diese Zusammenhänge sind in folgender Formel zusammengefasst:

$$n_{LP,i} = \begin{cases} 1 & \text{bei 0 – dimensionaler Anordnung} \\ \frac{l_i}{ggT(l_1, \dots, l_N)} & \text{bei 1 – dimensionaler Anordnung} \\ \frac{A_i}{ggT(A_1, \dots, A_N)} & \text{bei 2 – dimensionaler Anordnung} \\ \frac{V_i}{ggT(V_1, \dots, V_N)} & \text{bei 3 – dimensionaler Anordnung} \end{cases} \quad (5-6)$$

mit	$n_{LP,i}$	Anzahl Ladepositionen, welche ein Ladungsträger des Materials i vereinnahmt [1/LT]
	l_i	Abmessung eines Ladungsträgers des Materials i in Packrichtung [m/LT]
	$ggT(l_1, \dots, l_N)$	Längenraster bezogen auf alle Ladungsträger im Sortiment [m] A_i Grundfläche eines Ladungsträgers
	$ggT(A_1, \dots, A_N)$	Flächenraster bezogen auf alle Ladungsträger im Sortiment [m ²]

²⁴ Darunter die 3 verschiedenen drei Flächenraster (200 mm x 300 mm, 300 mm x 400 mm, 400 mm x 600 mm) der VDA-KLT nach [VDA-4500] sowie die Europoolpalette (800 mm x 1200 mm) und Industriepalette (1000 mm x 1200 mm) nach [EN-13698]

V_i	Volumen eines Ladungsträgers des Materials i
$ggT(V_1, \dots, V_N)$	Volumenraster bezogen auf alle Ladungsträger im Sortiment [m ³]

Für die in Abbildung 5-2 dargestellten Beispiele wird der Berechnungsweg exemplarisch in folgender Tabelle durchgeführt.

Tabelle 5-1: Berechnung der Anzahl Ladepositionen pro VDA-KLT basierend auf dem Beispiel in Abbildung 5-2

0-dimensionale Anordnung					
	-	-	-	-	LP [-]
A	-	-	-	-	1
B	-	-	-	-	1
C	-	-	-	-	1
1-dimensionale Anordnung					
	L [mm]	-	-	l [mm]	LP [-]
A	300	-	-	200	2
B	600	-	-	400	4
C	400	-	-	300	3
Längenraster				100	
2-dimensionale Anordnung					
	L [mm]	B [mm]	-	A [mm ²]	LP [-]
A..C	300	200	-	60000	1
D	600	400	-	240000	4
E,F	400	300	-	120000	2
Flächenraster				60000	
3-dimensionale Anordnung					
	L [mm]	B [mm]	H [mm]	V [mm ³]	LP [-]
A..L	300	200	140	8400000	1
M,N	600	400	280	67200000	8
O..R	400	300	280	33600000	4
Volumenraster				8400000	

Zusammengefasst aus Formeln (5-5) und (5-6) ergibt sich der mittlere Durchsatz an Ladepositionen $\overline{\lambda}_{LP,i}$ resultierend aus der Bedarfsmenge eines Materials i zu:

$$\overline{\lambda}_{LP,i} = \overline{\lambda}_{LT,i} \cdot n_{LP,i} = \frac{n_{TPP,i} \cdot P_{VQ,i}}{n_{Füll,i} \cdot t_{PT}} \cdot n_{LP,i} \quad (5-7)$$

Neben der bisher rein mengenorientierten Betrachtung müssen zur Bemessung der Transportnachfrage zusätzlich zeitliche Restriktionen beachtet werden. Zeitliche Restriktionen liegen dann vor, wenn für ein Material neben einer vorgegebenen Anzahl an bereitzustellenden Ladungsträgern pro Zeiteinheit (vgl. Formel (5-5)) zusätzlich maximale Versorgungsintervalle eingehalten werden müssen.

Ein maximales Versorgungsintervall kann sich zum einen aus beschränkten Platzverhältnissen an den Bedarfsorten ergeben. Ist die Stellplatzanzahl begrenzt, kann nicht eine beliebige Anzahl an Ladungsträgern eines Materials gleichzeitig mit einer Fahrt bereitgestellt werden, sondern nur so viele Ladungsträger, wie auch Stellplätze am Bedarfsort vorhanden sind. Müssen auf einer Route bspw. zwei unterschiedliche Materialien mit einer Ladungsträgerreichweite von jeweils 30 Minuten bereitgestellt werden und kann ein Routenzug vier Ladungsträger pro Fahrt transportieren, wäre es theoretisch ausreichend, dass dieser eine Fahrt pro Stunde ausführt mit jeweils zwei Ladungsträgern beider Materialien. Ist an den Bedarfsorten die Bereitstellfläche begrenzt sodass neben dem Ladungsträger, aus dem gerade entnommen wird, nur ein Ladungsträger als Nachschub bereitgestellt werden kann (s. g. 2-Behälter Prinzip, vgl. [Bul-2009, S. 584; Bul-1994, S. 34]), muss jeweils ein Ladungsträger alle 30 Minuten nachversorgt werden. Die Transportnachfrage beider Materialien besitzt die zeitliche Restriktion eines maximalen Versorgungsintervalls von 30 Minuten. Das maximale Versorgungsintervall eines Materials i $t_{VI,i}$ bei gegebener Stellplatzanzahl $n_{Stell,i}$ ist abhängig von der Ladungsträgerreichweite lt. Formel (5-4). Zudem ist zu berücksichtigen, dass ein Stellplatz für denjenigen Behälter benötigt wird, aus dem gerade entnommen wird und dieser somit nicht für den Materialnachschub zur Verfügung steht.

$$t_{VI,i} = (n_{Stell,i} - 1) \cdot \overline{t_{RW,i}} = (n_{Stell,i} - 1) \cdot \frac{n_{Füll,i} \cdot t_{PT}}{n_{TP,i} \cdot P_{VQ,i}} \quad (5-8)$$

Eine weitere zeitliche Restriktion ergibt sich bei verbrauchsgesteuerten Materialien aus der Einhaltung einer garantierten Wiederbeschaffungszeit (WBZ). Die WBZ ist nach *Günthner, Durchholz und Klenk* definiert als „die Zeit, die zwischen dem Auftreten eines Materialbedarfs bzw. -verbrauchs für einen Bereitstellort und der Materialbereitstellung am Bereitstellort vergeht.“ [Gün-2013, S. 269]. Diese umfasst neben der Zeit für den Materialtransport auch notwendige Vorlaufzeiten bis zur Signalisierung eines Verbrauchs (Nachschubsignal), Liegezeiten von Nachschubsignalen bis zur Bedarfserkennung, Zeiten für die Bedarfsweitergabe an die Materialnachschubquelle und Zeiten für die Auslagerung des Materials [Gün-2013, S. 118; Klu-2010, S. 178ff.]. Die maximal einzuhaltende WBZ t_{WBZ} ist in vielen Anwendungsfällen material- und bedarfsortübergreifend vorgegeben, da auf deren Basis u. a. Melde- und Sicherheitsbe-

stände ausgelegt werden [Gün-2012, S. 18f.]. Auch können Vorlaufzeiten für die Signalisierung eines Verbrauchs t_{Signal} und Auslagerzeiten $t_{Auslager}$ für die operative Routenzugplanung als gegeben angesehen werden, da diese von nach- bzw. vorgelegerten Prozessen bestimmt sind. Vorlaufzeiten für die Bedarfsübermittlung $t_{Bedarf,i}$ und den Materialtransport zum Bedarfsort $t_{Transport,i}$ muss an dieser Stelle u. U. auf Schätz- oder Durchschnittswerte zurückgegriffen werden, da diese abhängig von der Routenführung und den Routenzugfahrplan sind (vgl. Abschnitt 6.1).

Liegezeiten von Nachschubsignalen hingegen sind vom Versorgungsintervall abhängig²⁵, sofern der Routenzugfahrer für die Erkennung von Nachschubsignalen und die Bedarfsweitergabe zuständig ist. Im ungünstigsten Fall hat ein Routenzug den Bedarfsort kurz vor Auslösung eines Nachschubauftrags passiert, sodass eine Liegezeit des Nachschubsignals von einem Routentakt resultiert (vgl. [Dew-2012b, S. 22ff.; Klu-2010, S. 179f.]). Entsprechend ist das Bedarfserkennungsintervall eines Materials i begrenzt durch die maximal einzuhaltende WBZ abzüglich aller anderen Vorlaufzeiten lt. folgender Formel:

$$t_{BI,i} = \begin{cases} t_{WBZ} - t_{Vorlauf,i} & \text{verbrauchsgesteuerter Nachschub durch Fahrer} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-9)$$

mit $t_{Vorlauf,i} = t_{Signal} + t_{Auslager} + t_{Bedarf,i} + t_{Transport,i}$

5.2 Modellierung des Transportangebots

Bei der Modellierung des Transportangebots eines Routenzugsystems sind die Tourenfrequenz f_{Tour} sowie die Transportkapazität eines Routenzugs $K_{LT,RZ}$ zu berücksichtigen. Bei getakteten Routenzugsystemen korreliert die Tourenfrequenz direkt mit der Taktzeit t_{Takt} einer Route. Entsprechend ergibt sich der Ladungsträger-Grenzdurchsatz²⁶ $\lambda_{P,LT,Route}$ einer Route zu:

$$\lambda_{P,LT,Route} = f_{Tour} \cdot K_{LT,RZ} = \frac{1}{t_{Takt}} \cdot K_{LT,RZ} \quad (5-10)$$

²⁵ Natürlich könnten diese Liegezeiten auch durch organisatorische Maßnahmen reduziert oder beseitigt werden. Bspw. könnte Produktionsmitarbeiter die Nachschubaufträge auslösen oder das Nachschubverfahren umgestellt werden (vgl. Abschnitt 0). Dies Entscheidungen liegen allerdings nicht Aufgabengebiet der operativen Routenzugplanung.

²⁶ In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3978 bezeichnet der Ladungsträger-Grenzdurchsatz, auch technisch möglicher Durchsatz, „die durch die Konstruktion und Ausführung eines Förderers gesetzte Grenze für den Durchsatz (Grenzdurchsatz).“ [VDI-3978, S. 3f.]

Die Transportkapazität eines Routenzugs $K_{LP,RZ}$ wird durch dessen technische Ausführung bestimmt, also bspw. die Ausführung der Routenzuganhänger (vgl. Abschnitt 2.2.4) sowie deren Anzahl pro Verbund. Beides wird im Rahmen der taktischen Planung festgelegt und kann für die operative Routenzugplanung als konstant angesehen werden.

Die im vorherigen Abschnitt eingeführte Normierung der Ladungsträgergrößen auf Ladepositionen macht zunächst eine Umrechnung der Transportkapazität eines Routenzugs in eine Anzahl verfügbarer Ladepositionen je Routenzug notwendig. Analog zu (5-6) ergibt sich dieser Zusammenhang zu:

$$K_{LP,RZ} = \begin{cases} n_{LP,RZ} & \text{bei 0 – dimensionaler Anordnung} \\ \frac{l_{RZ}}{ggT(l_1, l_2, \dots, l_n)} & \text{bei 1 – dimensionaler Anordnung} \\ \frac{A_{RZ}}{ggT(A_1, A_2, \dots, A_n)} & \text{bei 2 – dimensionaler Anordnung} \\ \frac{V_{RZ}}{ggT(V_1, V_2, \dots, V_n)} & \text{bei 3 – dimensionaler Anordnung} \end{cases} \quad (5-11)$$

mit	$K_{LP,RZ}$	Transportkapazität eines Routenzugs in Ladepositionen [-]
	$n_{LP,RZ}$	Verfügbare Anzahl an Ladeplätzen eines Routenzugs [-]
	l_{RZ}	Verfügbare Ladelänge eines Routenzugs [m/LT]
	$ggT(l_1, l_2, \dots, l_n)$	Längenraster bezogen auf alle Ladungsträger im Sortiment [m]
	A_{RZ}	Verfügbare Ladefläche eines Routenzugs
	$ggT(A_1, A_2, \dots, A_n)$	Flächenraster bezogen auf alle Ladungsträger im Sortiment [m ²]
	V_i	Verfügbares Ladevolumen eines Routenzugs
	$ggT(V_1, V_2, \dots, V_n)$	Volumenraster bezogen auf alle Ladungsträger im Sortiment [m ³]

Die Bemessung des Ladungsträger-Grenzdurchsatzes allein auf Basis der maximalen Transportkapazität ist dabei nur bedingt aussagekräftig, da dieser weiteren konstruktiven und organisatorischen Einflussgrößen unterworfen ist. Betrachtet man, je nach Anordnung der Ladungsträger auf dem Routenzug, eine gegebene Ladelänge, Ladefläche oder ein gegebenes Ladevolumen (vgl. Abbildung 5-2), kann diese(s) bei einem heterogenen Ladungsträgersortiment i. d. R. nicht vollständig genutzt werden. Durch das Beladeschema entstehen Freiräume, welche die verfügbare Transportkapazität

reduzieren. In Wissenschaft und Praxis wird dieser Sachverhalt durch s. g. Behälterprobleme (engl. bin packing problems) adressiert. Je nach Anordnung (hinter- / neben- / übereinander) existieren ein-, zwei- und dreidimensionale Beladeprobleme, welche ein jeweils optimales Beladeschema für eine gegebene Ladeliste generieren. *Wäscher, Haußner und Schumann* sowie *Dyckhoff* bieten einen Überblick zu diesen Problemen [Wäs-2007; Dyc-1990]. Der Planer sieht sich hier allerdings mit dem Problem konfrontiert, dass die konkreten Ladelisten je Fahrt in der Fahrplanplanung nicht bekannt sind, sondern erst untertägig generiert werden (vgl. Anforderung B-3). Zudem decken die Behälterprobleme u. U. spezifische Restriktionen ungenügend ab. So werden in der Praxis z. T. feste Beladereihenfolgen der Routenzüge gefordert, welche der späteren Entnahmereihenfolge entsprechen soll. Hierdurch sollen Suchaufwände für den Routenzugfahrer und Fehlerquellen bei der Materialbereitstellung reduziert werden [Gal-2015; Dan-2013, S. 216ff.; Dew-2012b, S. 8f.], was allerdings die Erzeugung eines möglichst längen-, flächen-, oder volumenoptimierten Beladeschemas behindert.

Bei der Bemessung der verfügbaren Transportkapazität je Tour $K_{LP, Tour}$ wird deshalb ein kapazitiver Nutzungsgrad η_K berücksichtigt. Dieser beschreibt denjenigen Anteil der Transportkapazität eines Routenzugs, welcher unter Berücksichtigung von Kapazitätsverlusten bedingt durch das Ladungsträgersortiment und Beladeschema durchschnittlich zur Verfügung steht. Es gilt:

$$K_{LP, Tour} = \eta_K \cdot K_{LP, RZ} \quad (5-12)$$

mit $\eta_K \in [0,1]$

Der kapazitive Nutzungsgrad kann individuell je Route durch den Planer festgelegt werden. Er kann dafür auf Schätz- oder Erfahrungswerte heranziehen, welche anhand von Vergangenheitsdaten oder Referenzprozessen aufgenommen wurden. Alternativ bietet sich zur Ermittlung des durchschnittlichen kapazitiven Nutzungsgrades die Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation an. Darin wird das Routenzugsystem und insb. die geplante Beladelogik in einem Rechnermodell abgebildet und untersucht (simuliert). Hierbei werden jedoch keine festen Transportnachfragewerte als Eingangsdaten für die Simulation verwendet, sondern Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugrunde gelegt. Eine mehrfache Wiederholung der Simulationsläufe mit jeweils zufallsbasierter Auswahl der Transportnachfragewerte liefert eine Ausgangsverteilung für den kapazitiven Nutzungsgrad. Deren Schwankungsbreite wiederum gibt Aufschluss über den zu erwartenden kapazitiven Nutzungsgrad. Monte-Carlo-Simulationen bieten wie alle Simulationen den Vorteil, dass selbst komplexe Zusammenhänge, für welche

keine analytischen Berechnungen verfügbar sind, mit einer hohen Ergebnisgenauigkeit untersucht werden können [Reg-2011; All-1999, S. 45]. Die Vielzahl an Wiederholungen durch die Monte-Carlo-Technik trägt darüber hinaus zur Ergebnisvalidität bei und erlaubt Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausgangsgröße [Saw-2003]²⁷.

5.3 Zusammenführung des Transportnachfrage- und Transportangebotsmodells

Entsprechend der in Abschnitt 5.1 und 5.2 hergeleiteten Zusammenhänge lässt sich der Inhalt der Planungsaufgabe Taktzeitplanung wie folgt zusammenfassen: Die Summe der Ladungsträger-Durchsätze aller Materialien M auf einer Route muss kleiner oder gleich dem Ladungsträger-Grenzdurchsatz der Route bei gegebener Taktzeit sein. Normiert auf die Einheit Ladepositionen lautet dieser Zusammenhang:

$$\sum_{m \in M} \overline{\lambda_{LP,m}} \leq \lambda_{LP,P} \Rightarrow \sum_{m \in M} \frac{n_{TpP,m} \cdot P_{VQ,m}}{n_{Füll,m} \cdot t_{PT}} \cdot n_{LP,m} \leq \frac{1}{t_{Takt}} \cdot \eta_K \cdot K_{LP,RZ} \quad (5-13)$$

Umgeformt nach der zu wählenden Taktzeit ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$t_{Takt} \leq \frac{\eta_K \cdot K_{LP,RZ}}{\sum_{m \in M} \frac{n_{TpP,m} \cdot P_{VQ,m}}{n_{Füll,m} \cdot t_{PT}} \cdot n_{LP,m}} \quad (5-14)$$

²⁷ Eine solche Monte-Carlo-Simulation wurde anhand einer beispielhaften Anwendung bereits in der Diplomarbeit des Autors beschrieben. Darin wurde untersucht, welchen Einfluss schwankende Bedarfszeitpunkte und unterschiedliche Ladungsträgerformate auf den kapazitiven Nutzungsgrad einer Routenzuganwendung zur KLT-Versorgung haben. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei dieser Anwendung ca. 60 % der verfügbaren Ladefläche effektiv genutzt werden können, sodass zuvor genannte Schwankungen abgefangen werden können [Dew-2012b, S. 48ff.].

Weitere Nebenbindungen für die Wahl der Taktzeit ergeben sich aus den in Abschnitt 5.1 beschriebenen zeitlichen Restriktionen:

- Die zu wählende Taktzeit einer Route muss kleiner oder gleich dem Versorgungsintervall sein, welches aus der Stellplatzanzahl am Bedarfsort resultiert. Maßgeblich hierfür ist dasjenige Material m mit dem geringsten Versorgungsintervall bezogen auf alle Materialien M auf dieser Route:

$$t_{Takt} \leq \min(t_{VI,1}, t_{VI,2}, \dots, t_{VI,m}) \quad (5-15)$$

$$\text{mit } t_{VI,m} = (n_{Stell,m} - 1) \cdot \overline{t_{RW,m}} = (n_{Stell,m} - 1) \cdot \frac{n_{Füll,m} \cdot t_{PT}}{n_{TPP,m} \cdot P_{VQ,m}}$$

- Die zu wählende Taktzeit einer Route muss kleiner oder gleich dem Bedarfserkennungsintervall sein, welches für verbrauchsgesteuerte Materialien aus der Einhaltung einer garantierten WBZ resultiert. Maßgeblich hierfür ist dasjenige Material m mit dem geringsten Bedarfserkennungsintervall bezogen auf alle Materialien M auf dieser Route:

$$t_{Takt} \leq \min(t_{BI,1}, \dots, t_{BI,m}) \quad (5-16)$$

$$\text{mit } t_{BI,m} = \begin{cases} t_{WBZ} - t_{VORlauf,m} & \text{verbrauchsg. Nachschub durch Fahrer} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

Somit sind die Zusammenhänge zwischen Transportangebot und der geforderten Transportnachfrage analytisch beschreibbar und die zweite Teilfrage

Wie lassen sich die Inhalte der jeweiligen Planungsaufgabe analytisch beschreiben?

ist für die Planungsaufgabe Taktzeitplanung beantwortet.

6 Fahrplanplanung

Während die Taktzeitplanung nur der Frage nachging, in welchen Intervallen eine Route bedient werden muss um eine gegebene Transportnachfrage decken zu können, werden im Rahmen der Fahrplanplanung konkrete Abfahrtszeitpunkte für alle Touren definiert. Wie bereits dargelegt, soll der resultierende Fahrplan derart beschaffen sein, dass die Touren einer Route in festen Zeitintervallen gestartet werden sollen. Der sich daraus ergebende Fahrplan soll dabei die folgenden Eigenschaften besitzen (vgl. Abschnitt 3.2):

- Gute zeitliche Auslastung der Fahrzeuge / Mitarbeiter bei flexibler Disposition
- Geglättete Auslastung von Lager und vorgelagerten Prozessen durch überschneidungsfreie Abfahrtszeiten am Routenzugbahnhof

Als Grundlage für die Berechnung und Optimierung der Fahrzeug- und Mitarbeiteranzahl muss zunächst die zeitliche Dauer der Tätigkeiten modelliert werden, welche zur Aufrechterhaltung des Transportangebots notwendig sind. Dies erfolgt in Abschnitt 6.1. Die Zusammenhänge zur Abbildung eines Taktfahrplans in einem mathematischen Modell sind in Abschnitt 6.2 beschrieben. Abschnitt 6.3 widmet sich der Berücksichtigung der oben letztgenannten Eigenschaft, nämlich wie die Prozesse im Routenzugbahnhof abgebildet werden können, um einen überschneidungsfreien Fahrplan zu generieren. In Abschnitt 6.4 wird dargelegt, wie sich der notwendige Ressourceneinsatz für einen gegebenen Fahrplan bestimmt. Diese Einzelmodelle werden in Abschnitt 6.5 zusammengeführt. Darin wird ein Verfahren beschrieben, mithilfe dessen Routenzugfahrpläne automatisch generiert werden, sodass diese mit einer minimalen Anzahl an Ressourcen ausgeführt werden können.

6.1 Modellierung der Umlaufzeit-Bestandteile

Die s.g. Umlaufzeit einer Route t_{UZ} umfasst die Dauer aller Tätigkeiten, welche während einer Tour auf dieser Route anfallen. Diese setzt sich demnach aus den folgenden Zeitanteilen zusammen:

- t_{BZ} Beladezeit im Routenzugbahnhof [min]
- t_{FZ} Fahrzeit für die gesamte zurückzulegende Wegstrecke [min]
- t_{HZ} Haltestellenzeit für Start-Stopp-Vorgänge [min]

- t_{LB} Gesamtzeit für Ladungsträgerbereitstellung und ggf. Einsammeln von Leergut sowie Auslösen von Nachschubaufträgen [min]
- t_{EZ} Entladezeit im Routenzugbahnhof [min]
- t_{SO} Zeiten für sonstige Tätigkeiten (bspw. persönliche Verteilzeiten) und sonstige Prozesszeiten (bspw. Zeiten für Aufzugsfahrten bei Ebenenwechsel) [min]

Diese Zeitwerte sind auf geeignete Art und Weise zu bestimmen, sodass die Dauer der einzelnen Teilprozesse innerhalb eines Routenzugsystems korrekt berechnet werden können. Dabei sollen relevante Einflussgrößen sowie Kenngrößen des Routenzugsystems in Form von mathematischen Zusammenhängen modelliert werden, sodass diese automatisch in der Zeitberechnung berücksichtigt werden. Insb. soll zwischen den Ausführungszeiten eines einzelnen Vorgangs $t_{Vorgang}$ und der Häufigkeit der Vorgangsausführung $n_{Vorgang}$ unterschieden werden. Während Erstgenannte vorrangig von der Prozess- und Technikdefinition im Rahmen der taktischen Routenzugplanung bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.3.1), wird die Häufigkeit der Vorgangsausführung u. a. von der Anzahl an Haltestellen und Ladungsträgern definiert, also im Rahmen der operativen Routenplanung beeinflusst.

Da sich nahezu alle o. g. Zeiten auf manuelle Arbeitsvorgänge operativer Logistikmitarbeiter zurückführen lassen, baut diese Arbeit auf bestehenden Methoden zur Zeitdatenermittlung auf.

Zeitdaten lassen sich in Ist- und Soll-Zeiten unterscheiden. Ist-Zeiten entsprechen der zur Ausführung eines Ablaufs tatsächlich benötigten Zeiten. Soll-Zeiten hingegen sind planerisch vorgegebene Ausführungszeiten [Sch-2010, S. 669ff.]. Analog hierzu werden auch Methoden zur Zeitdatenermittlung in Verfahren zur Messung von Ist-Zeiten, s. g. direkte Verfahren, und Verfahren zur Berechnung von Soll-Zeiten ohne vorherige Aufnahme von Ist-Zeiten, s. g. indirekte Verfahren, unterschieden. Direkte Verfahren basieren auf der Zeitmessung einzelner Abläufe im konkreten Anwendungsfall und ggf. deren statistischer Auswertung und Ermittlung von Soll-Zeiten. Beispiele hierfür sind das Multimomentverfahren nach *Haller-Wedel* (vgl. [Hal-1969]) und das Standardprogramm zur Zeitaufnahme nach *REFA* (vgl. [REF-1997]). Demgegenüber sind indirekte Verfahren zu sehen. Darin werden Soll-Zeiten durch analytisch-rechnerischen Weg erhoben. Grundlage bilden Planzeiten für einzelne, genau beschriebene Arbeitsschritte oder Abläufe, welche entsprechend zu einem Gesamtablauf kombiniert werden [Sch-2010, S. 671]. Das wohl wichtigste indirekte Zeitermittlungsverfahren bildet das *Methods-Time Measurement (MTM)*. Nach dem *MTM-Grundverfahren (MTM-1)* werden die neun kleinstmöglichen Grundbewegungen mit Hand und Fingern, Blick-

funktionen und Körper-, Bein- und Fußbewegungen unterschieden, für welche Planzeiten in s. g. MTM-Normzeitwert-Tabellen vorgegeben sind [Bri-1974, S. 52f.]. Aufbauend auf diesem wurden für in der Praxis häufig wiederkehrende Abläufe spezielle, höher-verdichtete Zeitbausteine entwickelt und in weiterführenden MTM-Systemen zusammengefasst, insb. das MTM für Einzel- und Kleinserienfertigung (MTM-MEK) und das Universelle Analysier System (MTM-UAS) für die Serienfertigung [Bok-2006, S. 597ff.]. Die s. g. Standardvorgänge im Bereich der Logistik (MTM-SVL) fassen Zeitbausteine von logistischen Vorgängen zusammen, welche jedoch selbst wiederum auf MTM-UAS basieren [Sun-2014].

Prinzipiell kommen für die Fahrplanplanung in Routenzugsystemen sowohl direkte als auch indirekte Verfahren in Betracht, sofern dadurch die Soll-Zeiten für die im Folgenden genannten Einzeltätigkeiten ermittelt werden können. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird MTM verwendet. Viele der in diesem Abschnitt beschriebenen Formeln und Berechnungszusammenhänge wurden bereits im Rahmen der Forschungstätigkeit des Autors veröffentlicht (siehe hierzu [Dew-2014]).

Beladezeit im Routenzugbahnhof

Abhängig von der Prozessschnittstelle an der Quelle sowie der Art der Kommissionierung (vgl. Abschnitt 2.2.2) wird die Ladung für eine Tour von einem separaten Logistikmitarbeiter vorbereitet oder der Routenzug wird vom Routenzugfahrer selbst beladen.

Im erstgenannten Fall erfolgt die Kommissionierung der Transporteinheiten für eine Tour zeitlich parallel zur Durchführung der vorherigen Tour, was in der Praxis der häufigere Anwendungsfall ist [Gün-2012, S. 39]. Die Dauer für die Kommissionierung ist somit nicht relevant zur Berechnung der Umlaufzeit. Die Beladezeit setzt sich in diesem Fall nur aus der eigentlichen Zeit zur Bildung des Routenzugverbundes zusammen, also dem Kuppeln der Anhänger, und kann als Fixzeit angenommen werden. Nach MTM-SVL können hierfür die Bausteine EANM bzw. EANO (Ankuppeln mit / ohne Anhänger ausrichten), EAZZ (Wegzuschlag für zusätzlichen Anhänger), WF (Anhänger schieben pro Meter) sowie WV (Verzögerung Start und Stopp beim Schieben eines Anhängers). Die Bausteine WF und WV müssen dabei je nach Anhängergewicht gewählt werden.

$$\begin{aligned}
t_{BZ} = & \left(\underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Absteigen}} + \underbrace{\frac{n_{AH} \cdot [d_{BH}] \cdot KA}{\text{Laufweg zur Bereitstellzone der Anhänger}}}_{\text{Laufweg zur Bereitstellzone der Anhänger}} \right. \\
& + \underbrace{\frac{n_{AH} \cdot ([d_{BH}] \cdot WF + WV + EANM)}{\text{Rückweg mit Anhänger und Ankuppeln}}}_{\text{Rückweg mit Anhänger und Ankuppeln}} \\
& + \underbrace{\frac{(n_{AH} - 1) \cdot EAZZ}{\text{Wegzuschlag für jeden weiteren Anhänger}}}_{\text{Wegzuschlag für jeden weiteren Anhänger}} \\
& + \underbrace{\frac{[(n_{AH} - 1) \cdot (l_D + l_{AH}) + l_{ZF}] \cdot KA}{\text{Rückweg zum Zugfahrzeug}}}_{\text{Rückweg zum Zugfahrzeug}} + \underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Aufsteigen}} \left. \right) \\
& \cdot \frac{1}{0,036 \frac{TMU}{s}}
\end{aligned} \tag{6-1}$$

mit d_{BH} mittlerer Distanz zwischen Routenzug und Bereitstellzone der Anhänger im Routenzugbahnhof [m]

Fährt der Routenzugfahrer selbst durchs Lager, handelt es sich um ein Mann-zur-Ware Kommissioniersystem. Die Beladezeit entspricht der Kommissionierzeit eines Auftrags und ist nicht nur abhängig von der Ladeliste, sondern auch von der Lagereinrichtung, dem Lagerlayout, der Lagerbelegungsstrategie und der Wegestrategie im Lager [Ulbr-2010]. *Gudehus* urteilt deshalb, dass das Kommissionieren und die Planung von Kommissioniersystemen „[...] die schwierigste Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik [darstellt].“ [Gud-2011, S. 659]. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge und Berechnungen sei an dieser Stelle auf die verfügbare Fachliteratur verwiesen. *Hompel und Hömberg* bieten einen Überblick über die Berechnung der Kommissionierzeit [Hom-2008]. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die dadurch ermittelte durchschnittliche Kommissionierzeit repräsentativ für die Beladezeit ist und ebenfalls als Fixzeit angenommen werden kann.

Fahrzeit

Die Zeit zum Zurückzulegen der gesamten Wegstrecke einer Tour wird in der Fahrzeit zusammengefasst. Nach MTM-SVL wird diese maßgeblich von der zurückzulegenden Wegstrecke sowie der Anzahl an 90°-Kurven beeinflusst, da der Routenzug in diesen seine Geschwindigkeit reduzieren muss. Der Baustein EFIM beschreibt das Fahren eines Schleppzuges mit Anhänger innerhalb einer Produktionshalle je Meter. Der Baustein EFKM muss zusätzlich je 90°-Kurve berücksichtigt werden. Demnach ergibt sich die Fahrzeit zu:

$$t_{FZ} = EFIM \cdot [d_{Route}] + EFKM \cdot n_{Kurve} \quad (6-2)$$

- mit $EFIM$ MTM-SVL Baustein für Fahren je Meter [TMU/m]
 d_{Route} Gesamte zurückzulegende Wegstrecke [m]
 $EFKM$ MTM-SVL Baustein für Kurvenzuschlag je 90°-Kurve [TMU]
 n_{Kurve} Anzahl an 90°-Kurven auf Route [1]

Die Fahrzeitberechnung nach Formel (6-2) eignet sich besonders in frühen Planungsphasen, da vergleichsweise wenig Eingangsdaten benötigt werden. Allerdings ist damit auch die zu erwartende Abbildungsgenauigkeit bezogen auf ein konkretes Routenzugsystem vergleichsweise gering. So bleibt bspw. die Verkehrssituation und sich daraus ergebende Behinderungen und Wartezeiten unberücksichtigt. Liegen bereits konkretere Untersuchungen bspw. mittels direkter Verfahren aufgenommener Zeitdaten oder Materialflusssimulationen²⁸ vor, bietet sich die Verwendung einer anwendungsfallspezifischen Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} zur Berechnung der Fahrzeit an. In diesem Fall berechnet sich die Fahrzeit wie folgt:

$$t_{FZ} = \frac{d_{Route}}{\bar{v}} \quad (6-3)$$

Bei getakteten Routenzugsystemen mit statischer Routenführung kann davon ausgegangen werden, dass die reine Fahrzeit auf jeder Tour konstant bleibt und nur von den in Formel (6-2) bzw. (6-3) genannten Parametern abhängig ist. Nicht enthalten sind hingegen Zeiten an den Haltestellen, da diese vom Transportbedarf sowie dessen Verteilung über die Haltestellen abhängen.

Haltestellenzeit für Start-Stopp-Vorgänge

Die Haltestellenzeit beinhaltet Zuschläge für jede Haltestelle, an der der Routenzug während der Tour anhalten muss und setzt sich aus Zeiten für Abbremsen, Ab- und wieder Aufsteigen auf die Zugmaschinen sowie Beschleunigen zusammen. Hierzu sind zwei Faktoren zu berücksichtigen:

1. Die Anzahl an Haltestellen, an denen der Routenzug anhalten muss
2. Die Dauer für einen einzelnen Haltevorgang

Die Anzahl an Haltestellen lässt sich über eine Betrachtung der Wahrscheinlichkeit zum Halt an einer Haltestelle ableiten. Bezogen auf eine Haltestelle kann ein Halt notwendig sein, um Ladungsträger bereitzustellen. Die Wahrscheinlichkeit p_{Tausch} hierzu

²⁸ Fallbeispiele zur Durchführung von Materialflusssimulationen von RZS präsentieren u. a. Staab et al. sowie Staab, Klenk und Günthner [Sta-2015; Sta-2013].

ist abhängig vom mittleren Ladungsträgerdurchsatz dieser Haltestelle $\overline{\lambda_{LT,H}}$ sowie dem Routentakt t_{Takt} . Werden dort je Tour mehrere Ladungsträger bereitgestellt, ist lediglich ein Start-Stopp-Vorgang zu berücksichtigen. Entsprechend ergibt sich die Wahrscheinlichkeit p_{Tausch} zu:

$$p_{Tausch} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \overline{\lambda_{LT,H}} \cdot t_{Takt} \geq 1 \\ \overline{\lambda_{LT,H}} \cdot t_{Takt} & \text{sonst} \end{cases} \quad (6-4)$$

Darüber hinaus können zusätzliche Haltevorgänge anfallen, falls Nachschubaufträge für verbrauchsgesteuerte Materialien an Haltestellen erfasst werden müssen, wo sonst auf einer Fahrt kein Ladungsträger bereitgestellt werden müsste. Die Wahrscheinlichkeit $p_{Nachschub}$ hierzu ist in Anlehnung an Formel (6-4) abhängig vom mittleren Ladungsträgerdurchsatz aller verbrauchsgesteuerten Materialien an dieser Haltestelle $\overline{\lambda_{LT,VG,H}}$ sowie dem Routentakt t_{Takt} . Entsprechend ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $p_{Nachschub}$ zu:

$$p_{Nachschub} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \overline{\lambda_{LT,VG,H}} \cdot t_{Takt} \geq 1 \\ \overline{\lambda_{LT,VG,H}} \cdot t_{Takt} & \text{sonst} \end{cases} \quad (6-5)$$

Unter Kenntnis der beiden Einzelwahrscheinlichkeiten p_{Tausch} und $p_{Nachschub}$ lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für den Halt an einer Haltestelle p_{Halten} bzw. dem Passieren einer Haltestelle $p_{Passieren}$ in dem in Abbildung 6-1 dargestellten Entscheidungsbaum darstellen und wie folgt berechnen:

$$p_{Halten} = p_{Tausch} + (1 - p_{Tausch}) \cdot p_{Nachschub} \quad (6-6)$$

$$p_{Passieren} = (1 - p_{Tausch}) \cdot (1 - p_{Nachschub}) \quad (6-7)$$

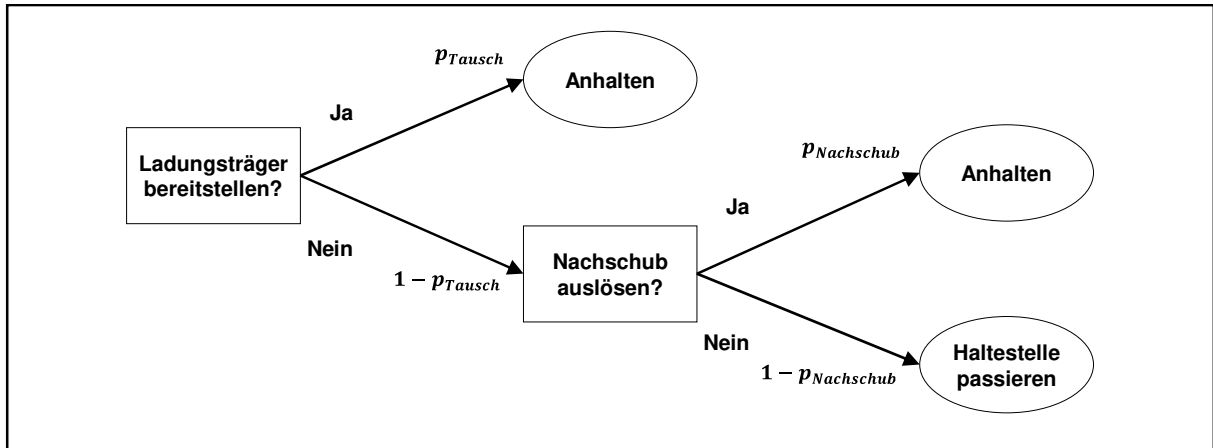


Abbildung 6-1: Entscheidungsbaum ob ein Routenzug an einer Haltestelle anhält oder diese ohne Halt passiert (eigene Darstellung)

Die Dauer eines Haltevorgangs umfasst Zeiten für Abbremsen, Absteigen, Laufweg zwischen Zugfahrzeug und Anhänger, Rückweg zum Zugfahrzeug und Aufsteigen auf die Zugmaschinen sowie Beschleunigen. Nach MTM-SVL können diese durch die Bausteine *EFVM* (Verzögerung Start und Stopp mit Anhänger) bzw. *EFVM* (Verzögerung Start und Stopp ohne Anhänger) und *KA* (Gehen pro Meter) berechnet werden. Da die Zugmaschinen für Routenzüge üblicherweise als Stehschlepper ausgeführt sind, wird im Folgenden für das reine Auf- und Absteigen jeweils nur ein Baustein *KA* berücksichtigt. In Anwendungsfällen, in denen zusätzliche Tätigkeiten wie bspw. Tür öffnen, Setzen oder Aufstehen anfallen, ist Formel (6-8) entsprechend anzupassen. Der Laufweg zwischen Zugfahrzeug und Anhänger setzt sich entsprechend Abbildung 6-2 zusammen aus der Distanz zwischen Zugfahrzeug und erstem Anhänger l_{ZF} , der Deichsellänge der Anhänger l_D , der Länge der Anhängernutzfläche l_{AN} sowie der Anzahl befüllter Anhänger $n_{AH,befüllt}$. Die Anzahl befüllter Anhänger wiederum ist abhängig von der kapazitiven Auslastung der Route bei der gewählten Taktzeit.

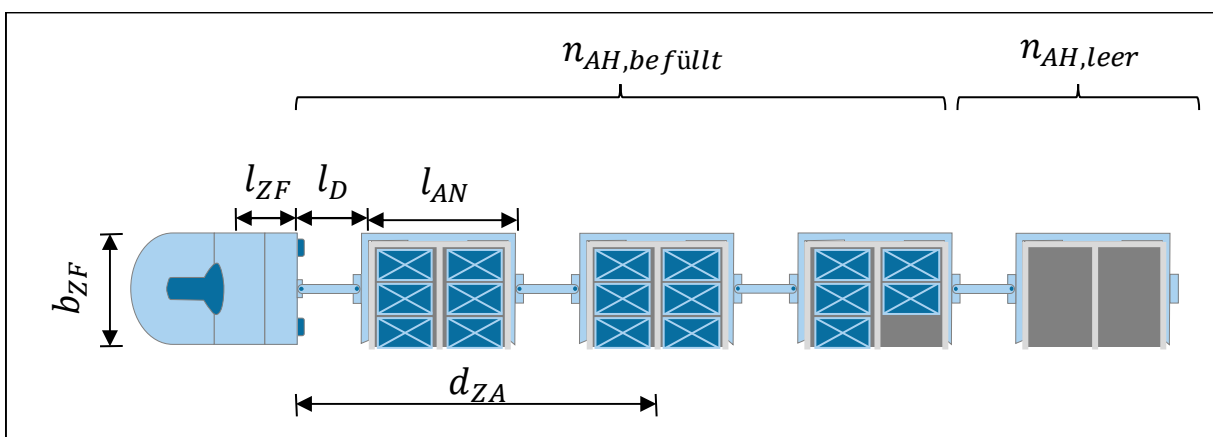


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Laufwege an einer Haltestelle am Beispiel eines Schleppers mit mehreren Anhängern (eigene Darstellung)

$$\begin{aligned}
t_{\text{Halten}} = & \left(\begin{array}{l} \underbrace{EFVM}_{\text{Verzögerung Start und Stopp}} \\ + \underbrace{2}_{\text{Hin- und Rückweg}} \cdot \left(\underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Absteigen}} + \underbrace{[l_{ZF}] \cdot KA}_{\text{Weg zum 1. Anhänger}} \right) \\ + \underbrace{\left[\frac{(n_{AH, \text{befüllt}} + 1) \cdot l_D + n_{AH, \text{befüllt}} \cdot l_{AH}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Mittlerer Laufweg zwischen 1. und letzten befüllten Anhänger}} \end{array} \right) \\
& \cdot \frac{1}{0,036 \frac{TMU}{s}}
\end{aligned} \tag{6-8}$$

mit $n_{AH, \text{befüllt}} = [\eta_{K, \text{Route}} \cdot n_{AH}]^{29}$

Aus der Dauer eines Haltevorgangs t_{Halten} und der Haltewahrscheinlichkeit p_{Halten} ergibt sich die Haltestellenzeit auf einer Tour t_{HZ} :

$$t_{\text{HZ}} = t_{\text{Halten}} \cdot \sum_{h \in H} p_{\text{Halten}, h} \tag{6-9}$$

mit h Laufvariable über alle der Route zugeordneten Haltestellen
 H Gesamtanzahl der der Route zugeordneten Haltestellen

Ladungsträgerbereitstellung und Nachschubauslösung

Die Dauer eines Haltevorgangs hängt wiederum stark vom Anwendungsfall und den lokalen Gegebenheiten ab. So unterscheidet sich die Bereitstellung von GLT und KLT grundsätzlich hinsichtlich der durchzuführenden Tätigkeiten. Zudem machen bspw. die Anhängertechnik sowie das Bereitstellprinzip weitere Differenzierungen notwendig. *Günthner und Keuntje* haben daher eine Reihe spezifischer MTM-Bausteine für die Bereitstellung unterschiedlicher Ladegüter und für unterschiedliche Routenzugtechni-

²⁹ Da das konkrete Beladeschema einer Tour im Rahmen der Fahrplanplanung nicht bekannt ist, wird davon ausgegangen, dass sich die Ladungsträger gleichmäßig auf die befüllten Anhänger verteilen. D. h. dass bei großen Taktzeiten zwar leere Anhänger gefahren werden, die verbleibenden Anhänger jedoch gleichmäßig gefüllt sind auch in gleicher Häufigkeit auf jeden Anhänger zugegriffen wird. Im Mittel muss der Fahrer also den halben Weg zwischen dem ersten Anhänger und dem letzten nicht leeren Anhänger zurücklegen.

ken entwickelt [Gün-2016, S. 80ff.]. Diese können für die die Ermittlung der Zeit je Ladungsträgertausch t_{Tausch} bzw. Nachschubauslösung $t_{Nachschub}$ verwendet werden. Alternativ kann der Planer auf Basis einer detaillierten Tätigkeitsbeschreibung diese anwendungsfallspezifisch bspw. mittels MTM-UAS ermitteln.

Die Häufigkeit dieser beiden Vorgänge ergibt sich aus dem Ladungsträgerdurchsatz $\overline{\lambda_{LT,R}}$ auf dieser Route sowie dem Routentakt, wobei zusätzliche Tätigkeiten für das Auslösen von Nachschubaufträgen abhängig vom Ladungsträgerdurchsatz der verbrauchsgesteuerten Materialien $\overline{\lambda_{LT,VG,R}}$ auf dieser Route anfallen. Die Gesamtzeit zur Ladungsträgerbereitstellung t_{LB} auf einer Route berechnet sich demnach zu:

$$\begin{aligned} t_{LB} &= \overline{\lambda_{LT,R}} \cdot t_{Takt} \cdot t_{Tausch} + \overline{\lambda_{LT,VG,R}} \cdot t_{Takt} \cdot t_{Nachschub} \\ &= t_{Tausch} \cdot t_{Takt} \sum_{h \in H} \overline{\lambda_{LT,H_h}} + t_{Nachschub} \cdot t_{Takt} \sum_{h \in H} \overline{\lambda_{LT,VG,H_h}} \end{aligned} \quad (6-10)$$

Entladezeit

Sofern die Leergutrückführung in den Routenzugprozess integriert ist, muss das eingesammelte Leergut entladen werden, bevor eine neue Tour gestartet werden kann. Ansonsten entfällt dieser Zeitanteil. Die Entladung kann analog zur Routenzugbeladung durch den Routenzugfahrer selbst oder einen separaten Mitarbeiter erfolgen. Wird der Routenzug durch einen separaten Mitarbeiter entladen, besteht die Entladezeit nur aus demjenigen Anteil zur Auflösung des Zugverbundes durch den Routenzugfahrer, also bspw. aus dem Kuppeln der Anhänger, und kann als Fixzeit angenommen werden. In diesem Fall ähnelt der Ablauf dem zur Routenzugbeladung, nur dass hierfür die MTM-SVL Bausteine *EABM* bzw. *EABO* (Ankuppeln mit/ohne Anhänger ausrichten) Verwendung finden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Routenzug in umgekehrter Reihenfolge abgekuppelt wird begonnen beim letzten Anhänger. Zusammengefasst ergibt sich folgende Formel:

$$\begin{aligned}
t_{EZ} = & \left(\underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Absteigen}} + \underbrace{[l_{ZF} + (n_{AH} - 1) \cdot (l_D + l_{AH})] \cdot KA}_{\text{Weg zum letzten Anhänger}} \right. \\
& + \underbrace{n_{AH} \cdot (EABM + [d_{AF}] \cdot WF + WV)}_{\text{Abkuppeln und Schieben des Anhängers zur Abstellfläche}} \\
& + \underbrace{n_{AH} \cdot [d_{AF}] \cdot KA}_{\text{Rückweg zum Routenzug}} + \underbrace{(n_{AH} - 1) \cdot EAZZ}_{\text{Wegzuschlag für jeden weiteren Anhänger}} \\
& \left. + \underbrace{[l_{ZF}] \cdot KA}_{\text{Rückweg zum Zugfahrzeug}} + \underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Aufsteigen}} \right) \cdot \frac{1}{0,036 \frac{TMU}{s}}
\end{aligned} \tag{6-11}$$

mit d_{AF} mittlere Distanz zwischen Routenzug und Abstellfläche der Anhänger im Routenzugbahnhof [m]

Wird der Routenzug durch den Fahrer selbst entladen, berechnet sich die Entladezeit gemäß (6-11) aus Zeitanteilen für Ab- und Aufsteigen, Laufweg entlang der Anhänger sowie Zeiten zur Ladungsträgerentnahme und Ablegen auf der Sammelstelle. Typischerweise handelt es sich hierbei um die Entnahme von leeren KLT aus dem Routenzug. Aufgrund des geringen Gewichtes können u. U. mehrere Ladungsträger in einem Vorgang entladen werden. Die Vorgänge für Aufnahmen der Ladungsträger aus dem Routenzug und Platzieren auf der Leergutsammelstelle werden durch die MTM-AUS Bausteine AH3 (ungefähres Aufnehmen und Platzieren bei Gewichten zw. 1-8 kg und Bewegungslängen 50-80 cm) abgebildet, was den Gegebenheiten bei der Handhabung leerer KLT entspricht. Werden anwendungsfallspezifisch andere Gewichte und Bewegungslängen gefordert bzw. sind zusätzliche Tätigkeiten auszuführen wie bspw. das Entfernen von Etiketten oder das Entsorgen von Müll, ist ggf. ein anderer Baustein zu wählen.

$$\begin{aligned}
t_{EZ} = & \left(\underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Absteigen}} + \underbrace{[l_{ZF}] \cdot KA}_{\text{Weg zum 1. Anhänger}} \right. \\
& + \underbrace{[n_{AH,befüllt} \cdot (l_D + l_{AH})] \cdot KA}_{\text{Laufweg zwischen 1. und letzten befüllten Anhänger}} \\
& + \underbrace{\left[\frac{\lambda_{LT,R} \cdot t_{Takt}}{n_{LT/VG}} \right] \cdot (AH3 + 2 \cdot [d_{AF}] \cdot KA)}_{\text{Aufnehmen und Platziern der LT, Hin- und Rückweg zur Abstellfläche}} \\
& + \underbrace{[(n_{AH,befüllt}) \cdot (l_D + l_{AH}) + l_{ZF}] \cdot KA}_{\text{Rückweg zum Zugfahrzeug}} + \underbrace{\left[\frac{b_{ZF}}{2} \right] \cdot KA}_{\text{Aufsteigen}} \left. \right) \\
& \cdot \frac{1}{0,036 \frac{TMU}{s}}
\end{aligned} \tag{6-12}$$

mit $n_{LT/VG}$ mittlerer Anzahl an Ladungsträgern, welche pro Vorgang entladen werden [-]

Damit sind alle Tätigkeiten, welche während einer Tour auf dieser Route anfallen, analytisch beschrieben und es kann die Umlaufzeit einer Route bestimmt werden.

6.2 Modellierung der Fahrplanstruktur

Nachdem mit den im vorherigen Abschnitt beschriebenen mathematischen Zusammenhängen die Dauer einer Tour berechnet werden kann, gilt es im Folgenden, die konkreten Abfahrtszeiten der Touren aller Routen festzulegen. Analog zur Problemstellung in dieser Arbeit findet die Erzeugung von Fahrplänen auch Anwendung bei der Planung öffentlicher Verkehrssysteme. Basierend auf dieser Analogie wird der Begriff Fahrplan sowie die Logik zu dessen Erstellung aus diesem Bereich hergeleitet.

Allgemein handelt es sich bei einem Fahrplan um die vorausschauende Festlegung der Abfahrten sowie des Fahrtverlaufs. Er legt für jedes Ereignis (i. A. Ankunft- und Abfahrtszeiten an den Haltestellen) Ereigniszeitpunkte fest [Opi-2009, S. 50ff.]. Ein Fahrplan, bei dem sich alle Fahrten in festgelegten Zeitintervallen wiederholen (bspw. eine Stunde) wird als Taktfahrplan (engl. periodic timetable) bezeichnet [Opi-2009, S. 53; Des-2007]. Ein Taktfahrplan besitzt daher die Besonderheit, dass der Planungshorizont quasi unendlich ist. Ein Ereignis, also bspw. die Abfahrt einer Route, findet absolut gesehen nicht vor- oder nach einem anderen Ereignis statt, sondern wiederholt

sich nach einem festen Systemtakt³⁰ t_{ST} . Eine Vor- bzw. Nachzeitigkeit existiert somit nur innerhalb eines Systemtaktes. In Abbildung 6-3 ist dies nochmals beispielhaft dargestellt: Links sind die Abfahrtszeitpunkte zweier aufeinanderfolgender Fahrten t_1, t_2 auf drei unterschiedlichen Routen $R1, R2, R3$ auf einem fortlaufenden Zeitstrahl dargestellt, rechts die äquivalente Darstellung innerhalb eines Systemtakts. Im weiteren Verlauf stehen obere Indizes für die Bezeichnung der Route und tiefgestellte Indizes für die laufende Fahrnummer. Zeitpunkte innerhalb eines Systemtakts werden weiterhin mit griechischen Buchstaben gekennzeichnet, absolute Zeitpunkte mit lateinischen Buchstaben.

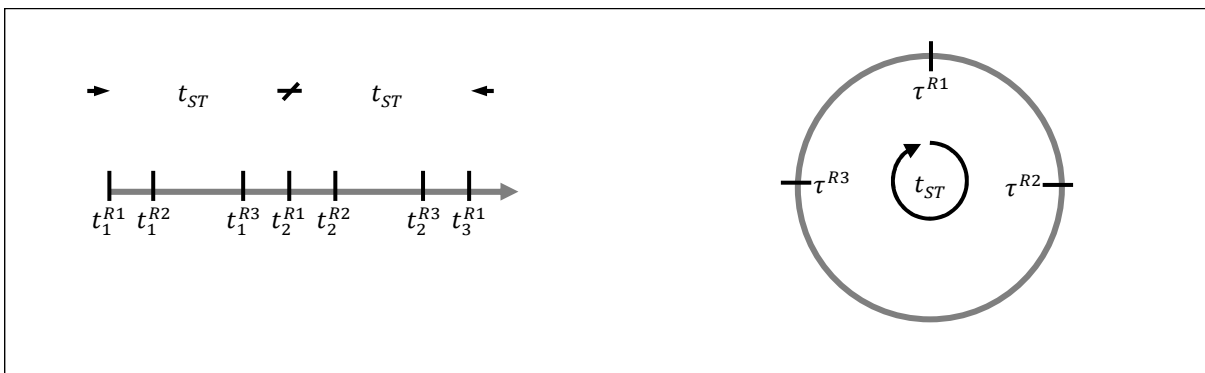


Abbildung 6-3: Exemplarische Darstellung eines Fahrplans dreier Routen mit gleicher Taktzeit auf einem absoluten Zeitstrahl (links), sowie der Routenreihenfolge innerhalb eines Systemtakts (rechts) (eigene Darstellung)

Wie in Abschnitt 3.2 erörtert, kann auf unterschiedliche Transportvolumina nur über eine Anpassung der Taktzeit der Route reagiert werden, was der Forderung einer einheitlichen Taktzeit auf allen Routen widerspricht. Um dennoch einen Taktfahrplan mit wiederholender Fahrtfolge realisieren zu können, müssen der Systemtakt und die Taktzeiten der einzelnen Routen miteinander abgeglichen werden. *Serafini und Uko-vich* zeigen hierzu, dass verschiedene Taktzeiten auch durch einen gemeinsamen Systemtakt abgebildet werden können, wenn die unterschiedlichen Taktzeiten ganzzahlige Vielfache zueinander bilden [Ser-1989]. Der Systemtakt entspricht dann dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen (kgV) der einzelnen Taktzeiten. Alle Ereignisse mit einer Taktzeit kleiner des Systemtakts werden mehrmals wiederholt, bis das System nach Ablauf eines Systemtakts wieder den gleichen Zustand einnimmt.

Dieser Zusammenhang wird anhand eines Beispiels erläutert, welches in Abbildung 6-4 dargestellt ist.

30 In Verkehrssystemen wird der Begriff Systemtakt teilweise synonymisch zum Begriff Taktzeit verwendet, da dort oftmals alle Linien mit derselben Taktzeit (bspw. eine Stunde) verkehren, folglich diese auch dem Systemtakt entspricht. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon nicht ausgegangen, weshalb auch die Begrifflichkeiten unterschiedlich verwendet werden. Eine genaue Definition des Begriffs Systemtakt folgt im weiteren Verlauf dieses Abschnitts.

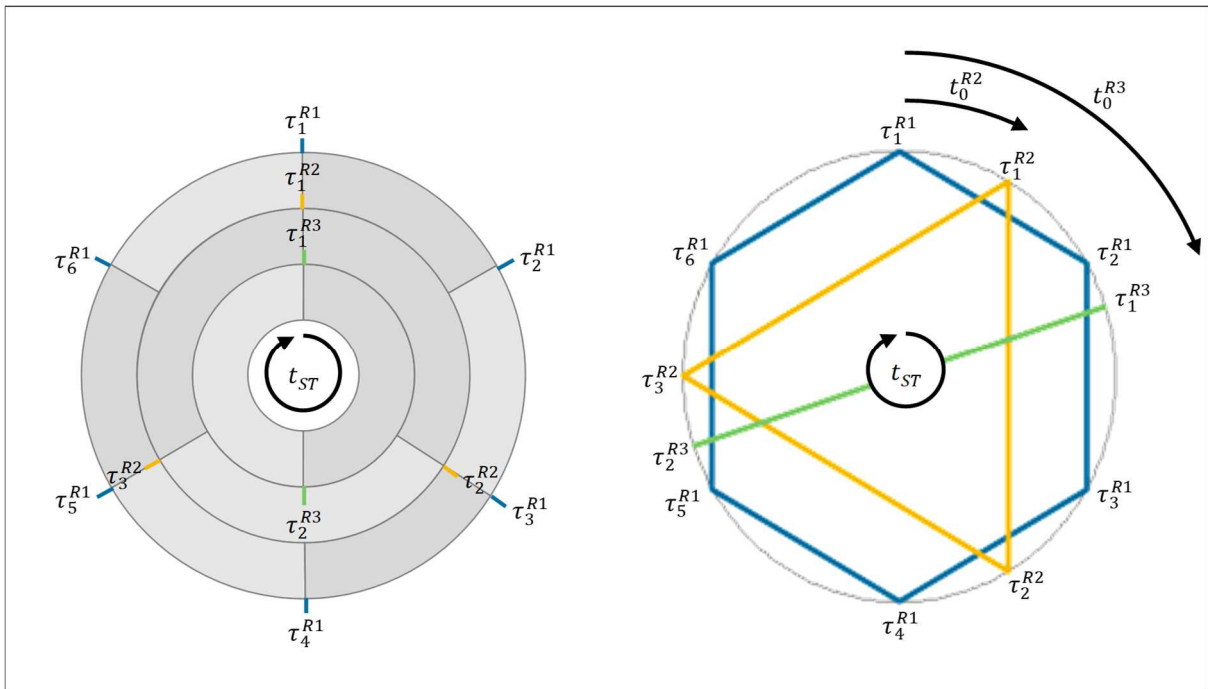


Abbildung 6-4: Exemplarische Darstellung eines Fahrplans dreier Routen mit unterschiedlichen Taktzeiten auf einer Taktuhr ohne Startzeitversatz (links), sowie auf einer s.g. Polygon-Uhr mit Startzeitversatz (rechts) (eigene Darstellung)

Betrachtet werden wieder drei Routen mit den Taktzeiten $t_{Takt}^{R1} = 10 \text{ min}$, $t_{Takt}^{R2} = 20 \text{ min}$ und $t_{Takt}^{R3} = 30 \text{ min}$. Es ist einfach erkennbar, dass diese Taktzeiten ganzzahlige Vielfache des größten gemeinsamen Teilers (ggT) 10 Minuten bilden. Der Systemtakt t_{ST} beträgt in diesem Beispiel 60 min, was dem kgV aus 10 Minuten, 20 Minuten und 30 Minuten entspricht. Verbal ausgedrückt bedeutet dies, dass sich jedes Ereignis (=Abfahrt auf einer Route) innerhalb eines Systemtakts bei R1 sechs Mal, bei R2 drei Mal und bei R3 zwei Mal wiederholt, bis das System nach 60 Minuten wieder den gleichen Zustand einnimmt. Aus Abbildung 6-4 links ist ebenfalls ersichtlich, dass die Abfahrten der drei Routen zu Beginn eines Systemtakts zeitlich überschneiden. Um dies zu vermeiden, können die Abfahrten um einen Startzeitversatz t_0 zeitlich zueinander versetzt werden.

Mathematisch lassen sich diese Zusammenhänge wie folgt zusammenfassen: Die Differenz der Abfahrtszeiten zweier aufeinanderfolgender Touren auf einer Route entspricht der Taktzeit der Route:

$$t_{n+1}^r - t_n^r = t_{Takt}^r \quad (6-13)$$

Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Taktzeiten der Routen ganzzahlige Vielfache zueinander bilden, entspricht der Systemtakt dem kgV aller Taktzeiten:

$$T_{ST} = kgV(t_{Takt}^1, \dots, t_{Takt}^R) \quad (6-14)$$

mit $\frac{t_{Takt}^r}{\min(t_{Takt}^1, \dots, t_{Takt}^R)} \in \mathbb{N}^+$

Innerhalb eines Systemtakts wiederholen sich die Abfahrtszeiten einer Route entsprechend des Verhältnisses zwischen Systemtakt und Taktzeit der Route v^r ggf. versetzt um den Startzeitversatz τ_0 . Die Abfahrtszeit τ_i^r der i -ten Tour auf einer Route r innerhalb eines Systemtakts berechnet sich durch:

$$\tau_i^r = \tau_0^r + (i - 1) \cdot t_{Takt}^r \quad \forall i \in \{1, \dots, v^r\} \quad (6-15)$$

mit $v^r = \frac{T_{ST}}{t_{Takt}^r} \in \mathbb{N}^+$

Im m -ten Systemtakt berechnen sich die absoluten Abfahrtszeiten demnach zu:

$$t_{(m \cdot T_{ST} + i)}^r = (m - 1) \cdot T_{ST} + \tau_0^r + (i - 1) \cdot t_{Takt}^r \quad \forall i \in \{1, \dots, v^r\}, m \in \mathbb{N}^+ \quad (6-16)$$

Gemäß diesen Definitionen kann ein (Takt-) Fahrplan mathematisch abgebildet werden. Es ergeben sich zwei Freiheitsgrade, welche bei der Fahrplanerstellung festgelegt werden können:

- die Taktzeiten der Routen t_{Takt}^r
- der Startzeitversatz jeder Route τ_0^r

Wie, ausgehend von diesen Freiheitsgraden, Fahrplanüberschneidungen sowie die notwendige Ressourcenanzahl zur Ausführung des Fahrplans bei dessen Planung berücksichtigt werden können, wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

6.3 Modellierung von Fahrplanüberschneidungen

Bereits aus Abbildung 6-4 ist ersichtlich, dass bei einer ungünstigen Fahrplanstruktur Überschneidungen hinsichtlich der Abfahrtszeiten unterschiedlicher Touren auftreten können. Diese Überschneidungen führen zu Nachfragespitzen im Routenzugbahnhof und vorgelagerter Prozesse, wie bspw. bei der Kommissionierung der Transporteinheiten in einem Lager. Eine Möglichkeit wäre, diese Spitzen durch das Vorhalten zusätzlicher Ressourcen abdecken zu können. Dies ist jedoch ineffizient, da diese dann ungleichmäßig und bezogen auf das mittlere Transportvolumen insgesamt weniger gut ausgelastet wären. Eine andere Möglichkeit wäre, die Touren gemäß der verfügbaren Kapazität an der Quelle nacheinander abzufertigen verbunden mit einer Verzögerung

einzelner Touren. Dies kann jedoch zu Versorgungsengpässen an den Senken führen, insbesondere für Materialien mit geringen Ladungsträgerreichweiten (vgl. Abschnitt 5.1). Weiterhin könnten sich dadurch nicht planbare Effekte für den operativen Betrieb ergeben, da eine verzögerte Abfahrt auch zu einem verspäteten Abschluss der Tour führt, wodurch der Fahrer u.U. die nächste ihm zugeteilte Tour nicht bzw. nur verspätet ausführen kann. Ziel muss es also sein, diese Überschneidungen bereits bei Erstellung des Fahrplans auszuschließen, indem die Touren zeitversetzt zueinander geplant werden.

Die Notwendigkeit, unterschiedliche periodisch Ereignisse unter Berücksichtigung begrenzter Kapazitäten von gemeinsam genutzten Ressourcen in einem Fahrplan einzuplanen, existiert ebenfalls bei der Planung öffentlicher Personenverkehrssysteme. Hier stellen Routen unterschiedliche Linien dar, bspw. Eisenbahn- oder Busverbindungen. Knoten repräsentieren gemeinsam genutzte Infrastruktur, wie bspw. Gleise, Bahnhöfe oder Haltestellen. In der Literatur existieren im Wesentlichen drei unterschiedliche Ansätze, um diese Problemstellung zu lösen, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Der erste Ansatz basiert darauf, die Umsteigezeit der Passagiere an den Knoten zu minimieren. Umsteigezeiten resultieren daraus, dass Passagiere mit einer im Fahrplan bestimmten Linie und Ankunftszeit an einem Knoten ankommen und mit einer anderen Linie zu der im Fahrplan bestimmten, späteren Abfahrtszeit weiterfahren müssen. In diesem Ansatz wird die Anzahl an Reisenden, welche an einem Knoten von einer Linie zur anderen umsteigen, über eine Quelle-Ziel Matrix angegeben. *Domschke* formuliert dieses Problem wie folgt [Dom-1989]:

$$\text{Min } Z(x) = \sum_{\substack{hijk \\ h < j}} w_{hijk} x_{hi} x_{jk} \quad (6-17)$$

mit $\sum_{i \in T_h} x_{hi} = 1$ für alle Linien $h = 1, \dots, m$

$x_{hi}, x_{jk} \in \{0,1\}$ für alle h und i

Darin ist T_h eine gegebene Anzahl unterschiedlicher Abfahrtszeiten während eines Linientakts, also beispielsweise jede Minute zwischen 00:00-00:09 Uhr, wenn die Linie in einem Takt von 10 Minuten verkehren soll. w_{hijk} ist die Summe der Wartezeiten aller Passagiere, die von Linie h zu Linie j oder umgekehrt umsteigen möchten, falls Linie h zum Zeitpunkt i und Linie j zum Zeitpunkt k startet. Die binären Variablen x_{hi} und x_{jk} beschreiben, ob eine Linie h (j) zum Zeitpunkt i (k) abfährt (x_{hi} (x_{jk}) = 1) oder nicht (x_{hi} (x_{jk}) = 0).

$(x_{jk}) = 0$). Dieses Problem wird mittels heuristischer Verfahren gelöst (siehe hierzu [Kri-1996], [Dad-1995], [Dom-1992], [Voß-1992] und [Dom-1989]).

Für die kombinierte Betrachtung von Umsteigezeiten und Ressourcenbelegung wurde ein zweiter Ansatz entwickelt, das sogenannte „Periodic Event Scheduling Problem“ (Abk. PESP, dt. Periodische Ereignis Zeitplanungsproblem). Erstmals von *Serafini und Ukovich* beschrieben werden darin periodische Ereignisse graphenbasiert mittels Knoten und Kanten abgebildet [Ser-1989]. In Abbildung 6-5 ist ein beispielhafter PESP-Graph dargestellt.

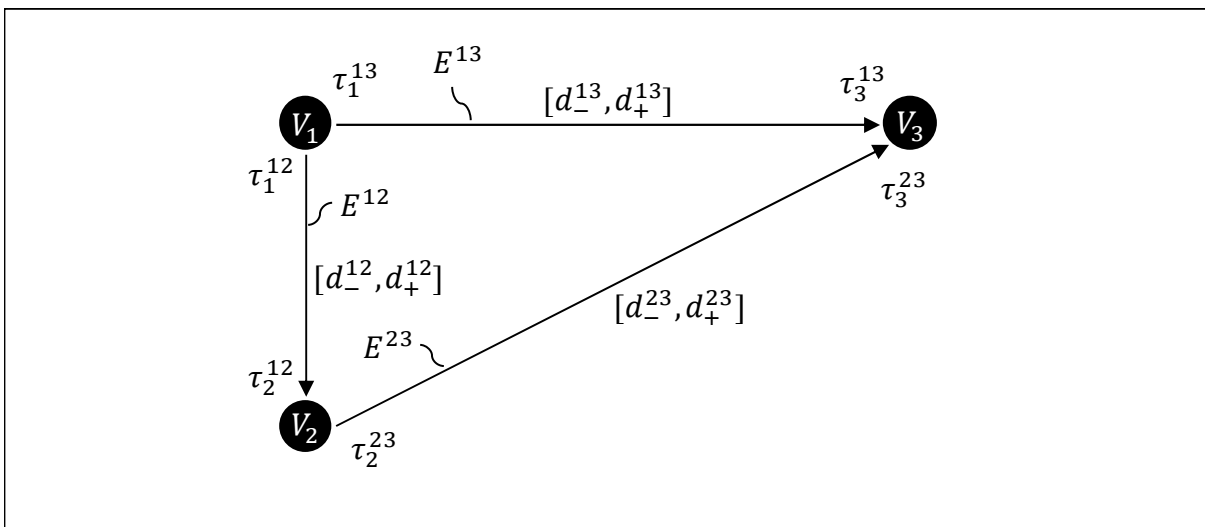


Abbildung 6-5: Exemplarischer PESP-Graph bestehend aus 3 Haltestellen und 3 Fahrten zwischen diesen Haltestellen (eigene Darstellung)

In einem PESP-Graph repräsentieren Knoten V die unterschiedlichen Stationen, wie bspw. Haltestellen oder Weichen. Diese Knoten sind durch Kanten E verbunden, welche Fahrten von einer Station zur nächsten repräsentieren. Die minimale Dauer d_- und maximale Dauer d_+ einer Fahrt werden als gegeben vorausgesetzt, wobei durch das Intervall $[d_-, d_+]$ auch berücksichtigt werden kann, dass Fahrten u. U. bewusst in Stationen verzögert werden bzw. langsamer fahren, um spätere Überschneidungen zu vermeiden. Die Aufgabe des PESP besteht nun darin, für jede Fahrt E^{ij} die Abfahrtszeiten τ_i^{ij} von einer Station V_i und Ankunftszeiten τ_j^{ij} an einer Station V_j derart festzulegen, dass folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$d_-^{ij} \leq \tau_j^{ij} - \tau_i^{ij} + p^{ij} \cdot T^{ij} \leq d_+^{ij} \quad \forall p^{ij} \in \mathbb{Z} \quad (6-18)$$

Dabei ist T^{ij} die Taktzeit der Fahrt E^{ij} und p^{ij} der sogenannte Periodenoffset, also die p -te Wiederholung des periodischen Ereignisses E^{ij} . In seiner ursprünglichen Form ist das PESP ein reines Entscheidungsproblem. Es ermittelt entweder einen zulässigen

Fahrplan, welcher alle Nebenbedingungen erfüllt, oder beweist die Nichtlösbarkeit der PESP-Instanz. Verschiedene Ansätze erweitern jedoch das PESP um Kantengewichtungen, welche die Umsteigewartezeit der Passagiere an den Stationen repräsentieren und vergleichen dadurch unterschiedliche Lösungen einer PESP-Instanz miteinander [Nac-2008; Nac-1996].

Der dritte Ansatz betrachtet ausschließlich die Ressourcenbelegung und keine Umsteigezeiten. Betrachtet wird eine Menge an periodisch verkehrenden Linien mit einem gemeinsamen Systemtakt, welche eine Station oder Strecke gemeinsam befahren. Die Ereignisse werden durch eine, bereits in Abbildung 6-4 eingeführte, Polygon-Uhr beschrieben. Das s. g. Polygon-Scheduling-Problem versucht nun die Abfahrtszeiten der Linien derart festzulegen, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Abfahrten maximiert wird. Bildlich gesprochen wird versucht, die Polygone so zueinander zu drehen, dass die jeweiligen Eckpunkte der Polygone auf dem gemeinsamen Umkreis maximal weit voneinander entfernt liegen. *Guldan* präsentierte erstmals einen Algorithmus zur Lösung des Polygon-Scheduling-Problems [Gul-1980]. *Vince* entwickelte einen weiteren Lösungsansatz, welcher die Eigenschaften periodischer Ereignisse (vgl. Abschnitt 6.2) nutzt und dadurch die zulässigen Polygon-Koordinaten ohne Verlust der Allgemeingültigkeit beschränkt auf bestimmte Werte für Zähler und Nenner. Das damit formulierte Problem bezeichnete er als „Scheduling Periodic Events“ (Abk. SPE, dt. Zeitplanung periodischer Ereignisse). Dieser Lösungsraum wird anschließend vollständig durchsucht. *Vince* ermittelt weiterhin die optimale Lösung für zwei und drei Linien / Polygone und zeigt die NP-Vollständigkeit des SPE-Problems [Vin-1989]. *Burkard*, *Hurink* sowie *Genç* widmen sich ebenfalls dessen Lösung mittels unterschiedlicher Heuristiken [Bur-1986; Hur-1996; Gen-2003].

Gemäß der Anforderung nach einem überschneidungsfreien Routenzugfahrplan müssen Kapazitätsrestriktionen zwingend betrachtet werden. Weiterhin ist die Optimierung von Umsteigezeiten im Kontext von Routenzugfahrplänen nicht relevant. Deshalb werden die auf *Domschke* basierenden Ansätze sowie die PESP-Formulierungen nicht weiterverfolgt [Dom-1989]. Das SPE-Problem hingegen fokussiert die Ressourcenbelegung und das zugrundeliegende Fahrplanmodell gleicht denen eines getakteten Routenzugfahrplans mit unterschiedlichen Taktzeiten (Abschnitt 6.2). Daher wird dieser Ansatz im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Aufgrund der sich darauf ergebenden hohen Relevanz für diese Arbeit wird zunächst das verallgemeinerte Polygon-Scheduling-Problem detailliert beschrieben und anschließend auf die konkrete Problemstellung bei der Fahrplanplanung von innerbetrieblichen Routenverkehren adaptiert.

Nach *Vince* lautet das allgemeine SPE-Problem wie folgt [Vin-1989]:

Eine Anzahl von Zuglinien n fahren alle von einer gemeinsamen Station ab. Jede dieser Linien i mit $1 \leq i \leq n$ wird im zeitlichen Abstand von m_i Minuten bedient. **Zu welchen Zeitpunkten sollen die Abfahrten der Linien eingeplant werden, so dass der minimale zeitliche Abstand (Sicherheitsabstand) zwischen den Abfahrten zweier aufeinanderfolgender Züge maximiert wird³¹?** Gegeben seien also E_1, \dots, E_n periodische Ereignisse mit den jeweiligen Perioden m_1, \dots, m_n . Weiterhin sei x_i ein beliebiger Eintrittszeitpunkt des Ereignisses E_i . Da E_i periodisch wiederkehren soll, kann weiterhin angenommen werden, dass ein (erster) Eintrittszeitpunkt x_i mit $0 \leq x_i < m_i$ existiert. Damit sind alle weiteren Eintrittszeitpunkte definiert über $x_i + km_i$ mit $k \in \mathbb{N}^+$. Sei $d_{ij}(x, y)$ definiert als der minimale zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Ereignisse E_i und E_j für das Ereignispaar $x = (x, y)$. Über alle Ereignisse E_1, \dots, E_n betrachtet ist der minimale zeitliche Abstand (Sicherheitsabstand) definiert über $\min_{1 \leq i < j \leq n} d_{ij}(x_i, y_j)$.

Damit lautet das Maximierungsproblem für den Sicherheitsabstand gemäß obigem Problem:

$$\max_x \min_{1 \leq i < j \leq n} d_{ij}(x_i, y_j) \quad \forall x = (x_1, \dots, x_n) \quad (6-19)$$

Angepasst an die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nomenklatur lautet das Maximierungsproblem für die Suche desjenigen Fahrplans mit dem maximalen Sicherheitsabstand:

$$\max_x \min_{1 \leq i < j \leq n} d_{ij}(\tau^i, \tau^j) \quad \forall x = (\tau^1, \dots, \tau^n) \quad (6-20)$$

mit τ^i eine Abfahrtszeit der Route i innerhalb eines Systemtakts

$d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$ der minimale zeitliche Abstand zwischen zwei Abfahrtszeiten der Routen i und j

$\min_{1 \leq i < j \leq n} d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$ der Sicherheitsabstand aller Routen eines gegebenen Fahrplans

Gemäß der in Abschnitt 6.2 eingeführten Fahrplanstruktur muss der minimale zeitliche Abstand $d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$ für jedes Routenpaar (i, j) jeweils innerhalb des kompletten Sys-

³¹ Beispielsweise um technisch bedingte, minimale Zugfolgezeiten einzuhalten, welche sich aus der Einfahr-, Aufenthalts- und Ausfahrzeit eines Zuges an dieser Station ergeben.

temtakts gesucht werden, d. h. jeder Eintrittszeitpunkt τ_m^i muss mit jedem Eintrittszeitpunkt τ_n^j subtrahiert und daraus das Minimum bestimmt werden. Für das Beispiel aus Abbildung 6-4 rechts müsste für die Routen $R1$ und $R3$ demnach folgender Suchraum betrachtet werden:

Tabelle 6-1: Beispielhafter Suchraum zur Bestimmung des minimalen Sicherheitsabstands

$d_{R1R3}(\tau_m^{R1}, \tau_n^{R3}) [min]$	$\tau_{n=1}^{R3} = 12$	$\tau_{n=2}^{R3} = 42$
$\tau_{m=1}^{R1} = 0$	$ 0 - 12 = 12$	$ 0 - 42 = 42$
$\tau_{m=2}^{R1} = 10$	$ 10 - 12 = 2$	$ 10 - 42 = 32$
$\tau_{m=3}^{R1} = 20$	$ 20 - 12 = 8$	$ 20 - 42 = 22$
$\tau_{m=4}^{R1} = 30$	$ 30 - 12 = 18$	$ 30 - 42 = 12$
$\tau_{m=5}^{R1} = 40$	$ 40 - 12 = 28$	$ 40 - 42 = 2$
$\tau_{m=6}^{R1} = 50$	$ 50 - 12 = 38$	$ 50 - 42 = 8$

Im Beispiel tritt dies erst zwischen den Abfahrten τ_2^{R1} und τ_1^{R3} auf (und nochmals τ_5^{R1} und τ_2^{R3}). *Vince* beweist jedoch, dass für ein gegebenes Routenpaar (i, j) der minimale zeitliche Abstand über folgende Formel bestimmt werden kann [Vin-1989]:

$$d_{ij}(\tau^i, \tau^j) = \min(d, ggt(t_{Takt}^i, t_{Takt}^j) - d) \quad (6-21)$$

mit $d = |\tau^i - \tau^j| \bmod ggt(t_{Takt}^i, t_{Takt}^j)$

Damit werden lediglich je eine Abfahrtszeit sowie die Taktzeiten beider Routen benötigt. Dass diese Vereinfachung die Laufzeit des Problems verbessert ist offensichtlich. Angewandt auf obiges Beispiel ergibt dies mit $ggt(t_{Takt}^{R1}, t_{Takt}^{R3}) = ggt(10, 30) = 10$ und $d = |0 - 12| \bmod 10 = 2$ einen minimalen zeitlichen Abstand $d_{R1R3}(\tau^{R1}, \tau^{R3}) = \min(2, 10 - 2) = 2$.

Das Maximierungsproblem gemäß Formel (6-20) bestimmt denjenigen Fahrplan mit maximalem Sicherheitsabstand. Es berücksichtigt dabei jedoch nicht den, i. d. R. technisch bedingten, minimal möglichen Sicherheitsabstand. Daher muss noch ein Kriterium definiert werden, welches die Zulässigkeit des ermittelten Optimums definiert. So kann es für eine gegebene Routenkonfiguration, d. h. Routenanzahl und deren Taktzeiten, durchaus vorkommen, dass selbst derjenige Fahrplan mit dem maximalen Sicherheitsabstand die verfügbare Kapazität des Routenzugbahnhofs übersteigt. Wiederum für obiges Beispiel ist grafisch relativ einfach erkennbar, dass der maximale Sicherheitsabstand $3 \frac{1}{3}$ Minuten beträgt. Egal wie die Polygone zueinander verdreht werden, werden in genau einem 10 Minuten Intervall innerhalb des Systemtakts immer

alle drei Routen abfahren. Zwei mögliche Fahrpläne mit jeweils identischem, maximalem Sicherheitsabstand sind in Abbildung 6-6 dargestellt:

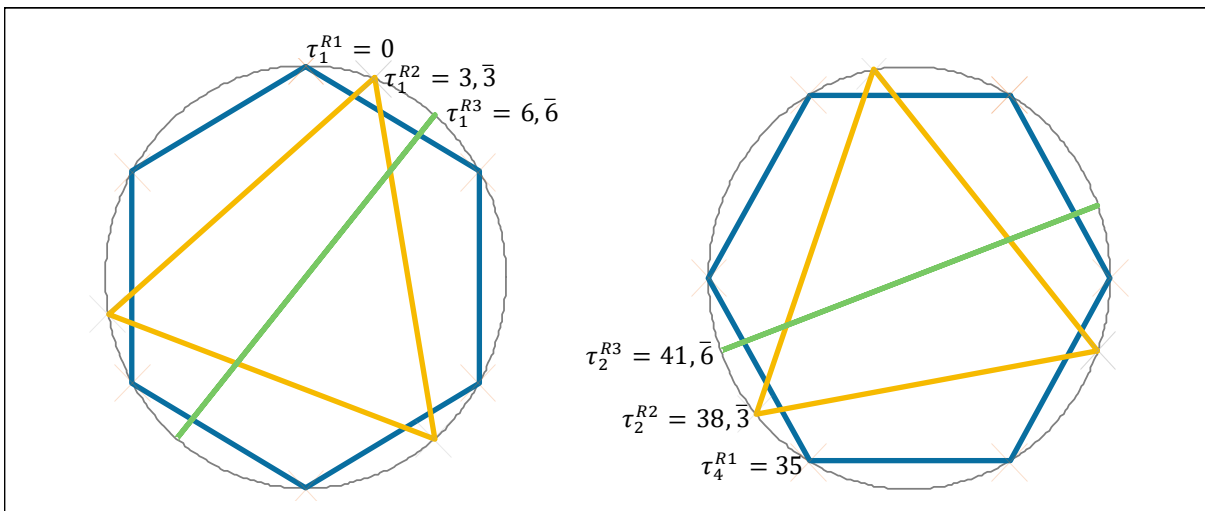


Abbildung 6-6: Zwei mögliche Fahrpläne mit maximalem Sicherheitsabstand (eigene Darstellung)

Würde die Beladung des Routenzuges im Bahnhof bspw. fünf Minuten betragen, so wäre der Fahrplan nicht zulässig, da selbst der Fahrplan mit maximalem Sicherheitsabstand die verfügbare Kapazität übersteigen würde. Der minimal geforderte Sicherheitsabstand wird im Folgenden als Routenzugfolgezeit t_{RZF} bezeichnet. Um Überschneidungen im Fahrplan gänzlich zu vermeiden, muss der Zeitversatz zwischen zwei Touren mindestens der durchschnittlichen Beladezeit im Routenzugbahnhof t_{BZ} (vgl. Abschnitt 6.1) entsprechen, sofern im Routenzugbahnhof jeweils nur ein Routenzug gleichzeitig beladen werden kann. Sind im Routenzugbahnhof mehrere Ressourcen vorhanden, welche unabhängig voneinander für die Beladung genutzt werden können, ergibt sich die Routenzugfolgezeit aus der Beladezeit im Routenzugbahnhof t_{BZ} geteilt durch die Anzahl unabhängig nutzbarer Beladeressourcen n_B . Hierfür ist die kapazitätsbegrenzende Ressource im Bahnhof zu betrachten. Sind bspw. im Routenzugbahnhof zwar mehrere Parkpositionen vorhanden, auf denen Routenzüge beladen werden können, die Beladung selbst wird jedoch durch einen einzelnen Gabelstapler ausgeführt, ist $n_B = 1$. Arbeiten mehrere Gabelstapler parallel ist $n_B > 1$. Dieser Zusammenhang wird durch Formel (6-22) zusammengefasst.

$$t_{RZF} = \frac{t_{BZ}}{n_B} \quad (6-22)$$

Ist die Routenzugfolgezeit kleiner als der maximal erzielbare Sicherheitsabstand eines Fahrplans, ließen sich die Touren enger zusammenlegen. Dies eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade für die Einsatzplanung. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 6.4 näher betrachtet.

6.4 Modellierung des Einsatzplans

Mittels des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Optimierungsproblems lässt sich ein Fahrplan ermitteln, welcher den maximalen Sicherheitsabstand am Routenzugbahnhof gewährleistet. Der Einsatzplan, d. h. die Zuweisung von Ressourcen (Routenzüge und Mitarbeiter) auf die einzelnen Touren im Fahrplan, war bisher noch nicht Bestandteil der Fahrplanplanung. Dass u. U. mehrere Fahrpläne mit identischen, maximalen Sicherheitsabständen existieren können, zeigt bereits das Beispiel aus Abbildung 6-6. Nur anhand des Optimierungsziels maximaler Sicherheitsabstand sind diese beiden Fahrpläne nicht unterscheidbar. Worin diese sich hingegen unterscheiden können ist die Anzahl Ressourcen, welche zur Durchführung der Touren des jeweiligen Fahrplans benötigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass ein Fahrplan mit maximalem Sicherheitsabstand u. U. eine nichtoptimale Anzahl an Ressourcen beansprucht. Dieser Abschnitt beschreibt das zugrundeliegende Modell zur Beschreibung der Einsatzplanung, welches im weiteren Verlauf mit dem Modell zur Beschreibung von Fahrplanüberschneidungen zu einem Fahrplanplanungsmodell kombiniert wird.

Um die zugrundeliegende Problemstellung zu verdeutlichen sei das bisherige Beispiel etwas angepasst. Aufgrund eines reduzierten Transportvolumens (bspw. durch eine Kammlinienänderung in der Produktion) reduziert sich das Transportvolumen auf Route $R1$ und $R2$. Diese verkehren nun mit den jeweiligen Taktzeiten $t_{Takt}^{R1} = 15 \text{ min}$ und $t_{Takt}^{R2} = 30 \text{ min}$. Die Taktzeit der $R3$ bleibt unverändert bei $t_{Takt}^{R3} = 30 \text{ min}$. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Route $R1$ eine Umlaufzeit $t_{U\ddot{U}Z}^{R1} = 17,5 \text{ min}$ und die Routen $R2$ und $R3$ jeweils eine identische Umlaufzeit $t_{U\ddot{U}Z}^{R2} = t_{U\ddot{U}Z}^{R3} = 12,5 \text{ min}$ besitzen. Grafisch ist einfach nachvollziehbar, dass der Fahrplan aus Abbildung 6-7 eine optimale Lösung des Sicherheitsabstandsproblems darstellt. Im rechten Teil der Abbildung sind die sich daraus ergebenden Touren auf einem Zeitstrahl aufgetragen.

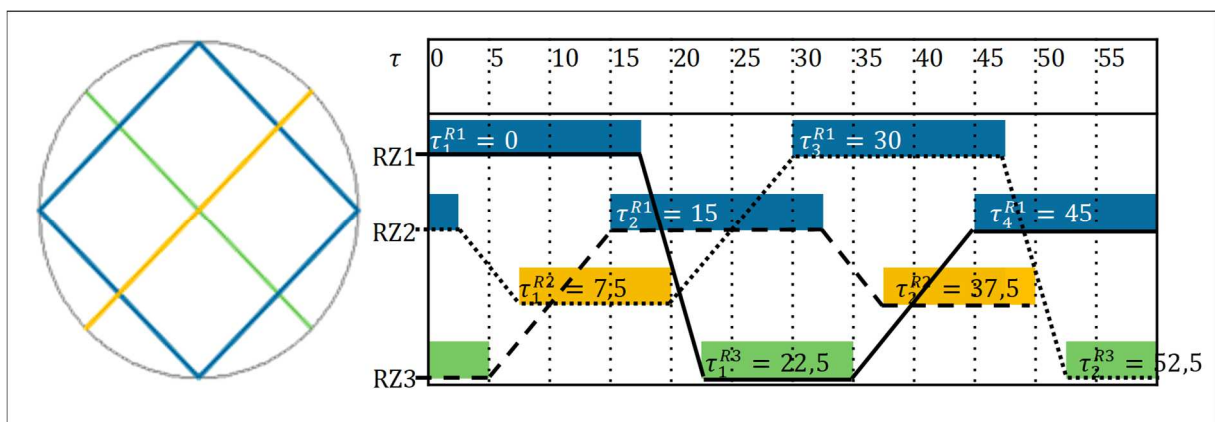


Abbildung 6-7: Eine optimale Lösung des Sicherheitsabstandsproblems mit zugehörigem, nicht optimalem Einsatzplan (eigene Darstellung)

Aus dem Einsatzplan ist ersichtlich, dass zu $\tau = [0,2,5[$, $\tau = [15,17,5[$, $\tau = [30,32,5[$ und $\tau = [45,47,5[$ jeweils 3 Touren gleichzeitig aktiv sind, in Summe also drei Routenzüge und Mitarbeiter zur Durchführung des Fahrplans benötigt werden. Grafisch ebenfalls leicht ersichtlich ist, dass bei einer Vorverlegung der Routen $R2$ und $R3$ um jeweils fünf Minuten nur noch maximal zwei Touren gleichzeitig sind. Damit würde sich der in Abbildung 6-8 dargestellte Sicherheitsabstand und Einsatzplan ergeben. Dieser Fahrplan wäre zulässig, sofern im Beispiel die Routenzugfolgezeit kleiner oder gleich 2,5 Minuten ist.

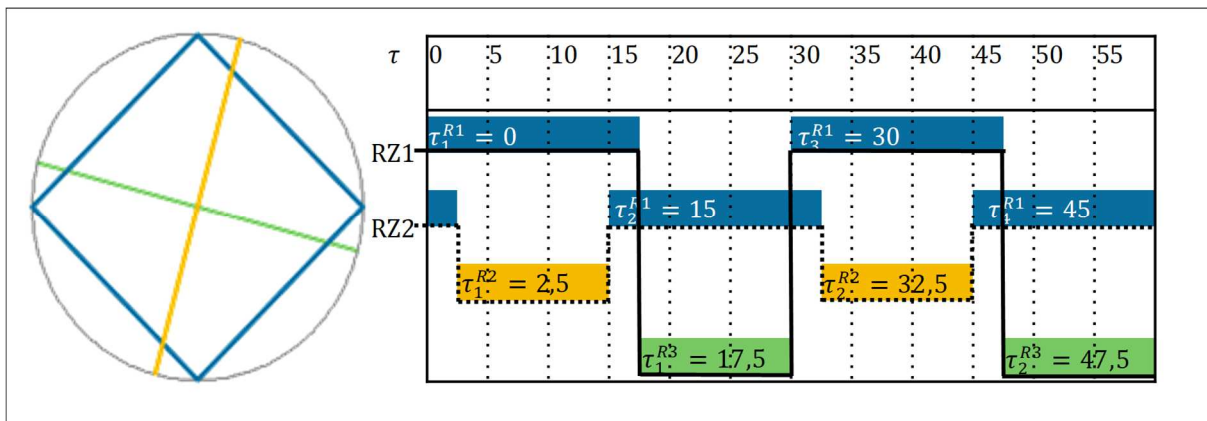


Abbildung 6-8: Eine nicht-optimale Lösung des Sicherheitsabstandsproblems mit zugehörigem, optimalem Einsatzplan (eigene Darstellung)

Aufgabe der Einsatzplanung ist es also, innerhalb des Lösungsraums des SPE-Problems denjenigen Fahrplan (oder Fahrpläne) zu finden, welcher sich mit der geringstmöglichen Anzahl an Ressourcen realisieren lässt. Dabei wird das folgende Modell des Einsatzplans verwendet:

Sei $\lambda = \{\lambda_1^1, \dots, \lambda_i^1, \dots, \lambda_1^r, \dots, \lambda_j^r\}$ ein gegebener Fahrplan bestehend aus allen Touren $\lambda_1^r, \dots, \lambda_i^r$ aller Routen $r \in R$, welche innerhalb eines Systemtakts gestartet werden³². Weiterhin sind die Umlaufzeiten t_{UZ}^r für alle Routen $r \in R$ bekannt. Sei $\tau \in \mathbb{R}$ ein beliebiger Zeitpunkt innerhalb des Systemtakts und $c_\tau(\lambda_i^r) \in \{0,1\}$ eine binäre Variable, welche beschreibt, ob eine Tour λ_i^r zum Zeitpunkt τ aktiv oder inaktiv ist. $c_\tau(\lambda_i^r)$ soll also den Wert eins annehmen, wenn die Abfahrtszeit τ_i^r der Tour erreicht bzw. überschritten ist, d. h. $\tau \geq \tau_i^r$ gilt, und die Tour noch nicht abgeschlossen wurde, d. h. $\tau < \tau_i^r + t_{UZ}^r$ gilt. Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, soll $c_\tau(\lambda_i^r)$ den Wert 0 annehmen.

Zusätzlich zu den Touren, die in einem Systemtakt $\tau \in [0, t_{ST}[$ gestartet werden, müssen noch diejenigen Touren betrachtet werden, welche in vorhergehenden Systemtaktten gestartet, allerdings noch nicht abgeschlossen wurden (bspw. λ_4^{R1} in Abbildung 6-8). Diese beanspruchen ebenfalls noch Ressourcen. Aufgrund der Periodizität des

³² λ kann bspw. eine Instanz innerhalb des Lösungsraum des SPE-Problems nach Formel (6-20) sein

Fahrplans (vgl. Abschnitt 6.2) ist dies gleichbedeutend mit denjenigen Touren, die im aktuellen Systemtakt gestartet aber nicht mehr abgeschlossen werden. Bildlich gesprochen wird der über den Systemtakt hinausragende Teil einer Tour aus dem Zeitstrahl an den Anfang des Systemtaktes kopiert. Hierzu sei eine zweite, binäre Variable $d_\tau(\lambda_i^r) \in \{0,1\}$ eingeführt. Diese beschreibt, ob eine Tour λ_i^r zum Zeitpunkt τ existiert, welche über die Grenzen eines Systemtaktes aktiv ist. $d_\tau(\lambda_i^r)$ soll also den Wert eins annehmen, wenn:

- eine Tour λ_i^r im aktuellen Systemtakt gestartet, allerdings nicht mehr abgeschlossen werden kann, d. h. $\tau_i^r + t_{UZ} > t_{ST}$ gilt, und
- die verbleibende Ausführungszeit dieser Tour noch nicht überschritten ist, d. h. $\tau < t_{UZ}^r - (t_{ST} - \tau_i^r)$ gilt.

Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, soll $d_\tau(\lambda_i^r)$ den Wert 0 annehmen.

Damit lässt sich die Gesamtzahl aktiver Touren C_τ zum Zeitpunkt τ berechnen durch:

$$C_\tau = \sum_{r \in R} \sum_{1 \leq i \leq v^r} c_\tau(\lambda_i^r) + d_\tau(\lambda_i^r) \quad (6-23)$$

mit $c_\tau(\lambda_i^r) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \tau \in [\tau_i^r, \tau_i^r + t_{UZ}^r[\\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

$$d_\tau(\lambda_i^r) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \tau_i^r + t_{UZ} > t_{ST} \wedge \tau \in [0, t_{UZ}^r - (t_{ST} - \tau_i^r)[\\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$v^r = \frac{t_{ST}}{t_{Takt}^r} \quad \text{die Anzahl Touren pro Systemtakt (vgl. Formel (6-15))}$$

Zur Bewertung des Ressourceneinsatzes für einen gegebenen Fahrplan ist hierbei das Maximum der gleichzeitig aktiven Touren $Max(C_\tau) \forall \tau \in [0, t_{ST}[$ von Relevanz. Um dieses zu bestimmen, könnten gemäß Formel (6-23) alle Zeitschritte τ zeitdiskret durchlaufen, die jeweilige Gesamtzahl aktiver Touren C_τ berechnet und daraus das Maximum bestimmt werden. Dies wäre jedoch einerseits, abhängig von der gewählten Zeiteinheit, rechenintensiv und bietet andererseits die Gefahr, dass man bei einer falsch gewählten Zeiteinheit Werteveränderungen von C_τ überspringt. Hier bietet jedoch folgende Überlegung Abhilfe: Das Maximum der Gesamtzahl aktiver Touren kann nur zu denjenigen Zeitpunkten auftreten, zu denen sich der Wert von C_τ selbst erhöht. Dies wiederum findet nur zu den jeweiligen Abfahrtszeitpunkten τ_i^r statt. Demnach ist es

ausreichend, C_τ gemäß Formel (6-23) für alle Zeitpunkte $\tau = \tau_i^r$ zu bestimmen und daraus das Maximum zu bestimmen³³. Der Suchraum entspricht also genau der Anzahl Fahrten im Fahrplan $|\lambda|$. Das dieser Berechnungsansatz gegenüber der zeitdiskreten Berechnung vorteilhaft ist, ist offensichtlich.

Für das Beispiel aus Abbildung 6-8 ergäbe sich damit folgender Suchraum und Lösung:

Tabelle 6-2: Beispielhafter Suchraum zur Bestimmung des Maximums gleichzeitig aktiver Touren

	$\tau = 0$	$\tau = 2,5$	$\tau = 15$	$\tau = 17,5$	$\tau = 30$	$\tau = 32,5$	$\tau = 45$	$\tau = 47,5$
$c_\tau(\lambda_1^{R1}) + d_\tau(\lambda_1^{R1})$	1+0	1+0	1+0	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0
$c_\tau(\lambda_2^{R1}) + d_\tau(\lambda_2^{R1})$	0+0	0+0	1+0	1+0	1+0	0+0	0+0	0+0
$c_\tau(\lambda_3^{R1}) + d_\tau(\lambda_3^{R1})$	0+0	0+0	0+0	0+0	1+0	1+0	1+0	0+0
$c_\tau(\lambda_4^{R1}) + d_\tau(\lambda_4^{R1})$	0+1	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	1+0	1+0
$c_\tau(\lambda_1^{R2}) + d_\tau(\lambda_1^{R2})$	0+0	1+0	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0
$c_\tau(\lambda_2^{R2}) + d_\tau(\lambda_2^{R2})$	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	1+0	0+0	0+0
$c_\tau(\lambda_1^{R3}) + d_\tau(\lambda_1^{R3})$	0+0	0+0	0+0	1+0	0+0	0+0	0+0	0+0
$c_\tau(\lambda_2^{R3}) + d_\tau(\lambda_2^{R3})$	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	0+0	1+0
C_τ	2	2	2	2	2	2	2	2
$Max(C_\tau)$	2							

Aus der maximalen Anzahl gleichzeitig aktiver Touren $Max(C_\tau)$ kann noch nicht direkt auf die Güte eines Fahrplans, d. h. der zeitlichen Ressourcenauslastung des Einsatzplans, geschlossen werden. So haben die Umlaufzeiten entscheidenden Einfluss auf die Anzahl notwendiger Ressourcen. Selbst bei minimalsten Wartezeiten der Routenzugfahrer auf die nächste Tour (wie im Beispiel aus Abbildung 6-8), also einem optimalen Einsatzplan, werden bei längeren Umlaufzeiten mehr Ressourcen benötigt als bei kürzeren Umlaufzeiten. Da im folgenden Verlauf dieser Arbeit noch ein Gütekriterium zur Bewertung der Fahrplangüte notwendig werden wird, sei dies bereits hier zum Abschluss dieses Abschnitts eingeführt. Hierzu wird für einen gegebenen Fahrplan λ der Fahrplanwirkungsgrad α_λ als Verhältnis zwischen Fahrplanmasse und Umlaufmasse definiert³⁴. Die Fahrplanmasse repräsentiert darin die Dauer aller im Fahrplan enthaltenen Touren, also die „produktive“ Einsatzzeit der Routenzüge und Mitarbeiter

33 Gleichsam ließe sich die minimale Anzahl gleichzeitig aktiver Touren bestimmen, indem C_τ zu den Abschlusszeitpunkten $\tau = \tau_i^r + t_{ij}^r$ berechnet und daraus das Minimum bestimmt wird, was hier jedoch nicht von Relevanz ist.

34 Im ÖPNV erfolgen i. d. R. Umlaufplanung (Zuweisung von Fahrzeugen) und Dienstplanplanung (Zuweisung von Mitarbeitern), sequentiell. Dies liegt vorrangig darin begründet, dass sowohl Fahrzeugumläufe als auch Dienste an unterschiedlichen Stationen starten und enden können. Dementsprechend wird zwischen Fahrplan- und Dienstplanwirkungsgrad unterschieden [Bor-2002]. In der vorliegenden Problemstellung entspricht ein Umlauf eines Routenzuges auch einem Umlauf eines Mitarbeiters, weshalb eine Unterscheidung nicht notwendig ist.

zur Durchführung der Touren. Die Umlaufmasse repräsentiert die verfügbare Einsatzzeit bei einer gegebenen Anzahl an Routenzügen und Mitarbeitern. Es gilt:

$$\alpha_\lambda = \frac{\text{Fahrplanmasse}}{\text{Umlaufmasse}} = \frac{\sum_{r \in R} v^r \cdot t_{UZ}^r}{\text{Max}(C_\tau) \cdot T_{ST}} \leq 1 \quad (6-24)$$

Nachdem mittels des in diesem Abschnitt erarbeiteten Einsatzplan-Modells alle Fahrplanelemente mathematisch beschrieben sind, können diese nun zu einem Modell zur automatischen Fahrplanerzeugung zusammengeführt werden.

6.5 Zusammenführung der Einzelmodelle in einem Modell zur automatischen Fahrplanerzeugung

Auf Basis der in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Einzelmodelle lässt sich das Routenzugfahrplan-Problem wie folgt zusammenfassen:

Eine Anzahl von unterschiedlichen Routen R fahren alle von einem gemeinsamen Routenzugbahnhof ab. Auf jeder dieser Routen r mit $1 \leq r \leq R$ wird im zeitlichen Abstand t_{Takt}^r eine Tour gestartet. Die Dauer einer Tour auf Route r ist über die Umlaufzeit der Route t_{UZ}^r gegeben. **Zu welchen Zeitpunkten sollen die Abfahrten der Routen eingeplant werden, so dass:**

- **der Fahrplan mit einer minimalen Anzahl an Mitarbeitern und Routenzügen ausgeführt werden kann, und**
- **der minimale zeitliche Abstand (Sicherheitsabstand) zwischen den Abfahrten zweier aufeinanderfolgender Touren mindestens der Routenzugfolgezeit t_{RZF} entspricht.**

Um dieses algorithmisch lösen zu können, wird das Routenzugfahrplan-Problem in ein mathematisches Optimierungsproblem überführt. Hierzu werden in Abschnitt 6.5.1 zunächst notwendige Grundlagen zu linearer Optimierung vermittelt. Die Herleitung der Beschreibungsmethode sowie die Formulierung des Routenzugfahrplan-Problems erfolgt in Abschnitt 6.5.2. Die softwarebasierte Lösung des Problems wird abschließend in Abschnitt 6.5.3 anhand einer Testinstanz beispielhaft erläutert. Zudem werden darin Erkenntnisse abgeleitet, welche zu einer Verbesserung der Rechenzeit zur Lösung des Problems führen.

6.5.1 Lineare Optimierung

Optimierungsmodelle im Allgemeinen bestehen aus einer Zielfunktion, Variablen mit deren zulässigen Wertebereich, sowie ggf. Nebenbedingungen. Lassen sich die Zielfunktion sowie alle Nebenbedingungen als reine Linearkombination der Variablen darstellen, enthalten also keine Polynome etc., handelt es sich um ein s.g. lineares Programm (Abk. LP, engl. linear programs³⁵) [Suh-2013, S. 31ff.]. Die allgemeine Form eines LP lautet in Matrixschreibweise:

$$\text{Zielfunktion:} \quad \max c^t x$$

$$\text{Nebenbedingungen:} \quad Ax \leq b$$

$$\text{Variablen:} \quad x \in \mathbb{R}^n$$

Darin ist x ein n -dimensionaler Vektor aller Variablen bzw. Unbekannten, A eine $m \times n$ Matrix und $b \in \mathbb{R}^m$ ein m -dimensionaler Vektor. Der Lösungsraum des Problems unter Einhaltung der Nebenbedingungen ist gegeben durch die Menge $\{x \in \mathbb{R}^n | Ax \leq b\}$. Die zu maximierende³⁶ Funktion $k: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mit $k(x) = c^t x$ wird im Allgemeinen als Kostenfunktion bezeichnet [Kal-2013, S. 75; Gen-2003, S. 73f.]. Die in der Praxis geläufigsten Lösungsverfahren für LP-Probleme sind das Simplex-Verfahren und die Innere-Punkt-Methode, welche in Abbildung 6-9 dargestellt sind. Beide beruhen auf der Tatsache, dass der Lösungsraum eines LP-Problems durch einen möglicherweise mehrdimensionalen Polyeder begrenzt ist und sich ein Optimum stets an einer Ecke dieses Polyeders befindet [Suh-2013, S. 44]. Beim Simplex-Verfahren wird zunächst eine Startlösung bestimmt, für welche alle Variablen genau an einer Ecke dieses Polyeders liegen. In jeder Iteration wird zu einer benachbarten Ecke des Polyeders gewechselt, sofern dadurch eine Verbesserung der Zielfunktion erreicht werden kann. Bei der Inneren-Punkt-Methode wird, ausgehend von einer Startlösung im inneren des Polyeders, entlang eines Pfades ebenfalls im inneren des Polyeders iteriert. Dabei wird jede Annäherung an den Rand des Polyeders dynamisch bestraft, wodurch der Pfad in Richtung des Optimums „gezwungen“ wird [Kal-2013, S. 72f.].

35 Im englischsprachigen Raum werden Optimierungsmodelle nach der Art der Beschreibungsmethode (engl. „program“) unterschieden.

36 Jedes lineare Minimierungsproblem kann durch Multiplikation der Zielfunktion und aller Nebenbedingungen mit (-1) in ein Maximierungsproblem überführt werden. Bei den Nebenbedingungen müssen durch die Multiplikation mit (-1) auf beiden Seiten dabei auch die Relationen \leq / \geq umgekehrt werden [Suh-2013, S. 38]. Daher seien hier nur Maximierungsprobleme behandelt.

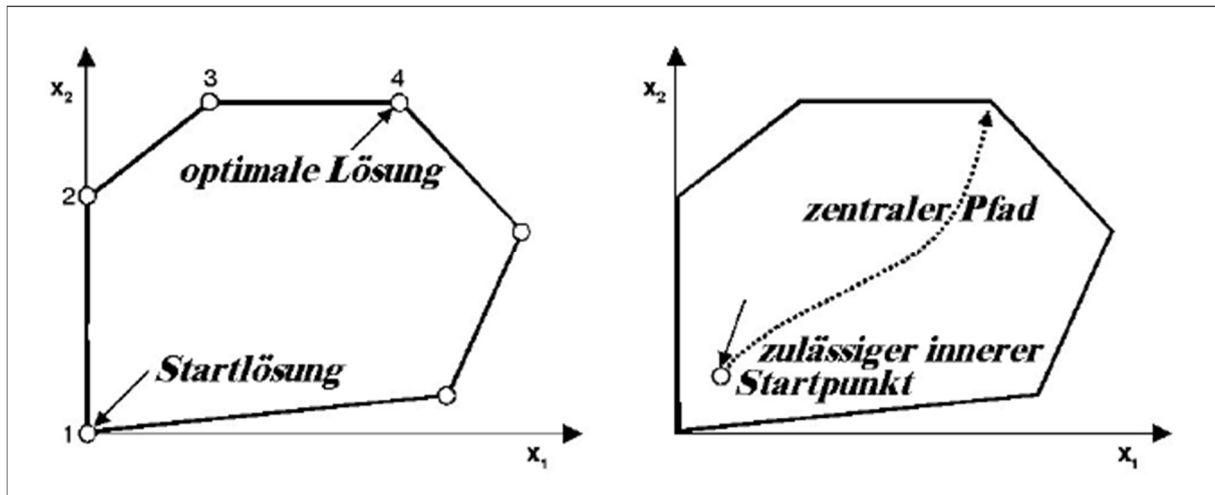


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Lösungssuche nach dem Simplex-Verfahren (links) und der Inneren-Punkt-Methode (rechts) [Kal-2013, S. 72]

In der Praxis treten häufig Probleme auf, in denen einige oder gar alle Variablen nur ganzzahlige oder diskrete Werte annehmen können. Als Beispiele können hier die Fahrzeuganzahl bei Verkehrsplanungsproblemen (z.B. 3,7 Fahrzeuge gibt es nicht) oder die Maschinenbelegung bei Produktionsplanungsproblemen (ein Auftrag ist entweder einer Maschine zugewiesen (=1) oder nicht (=0)) genannt werden. Aus diesen Anforderungen gingen die s.g. „Mixed integer linear programs“ (Abk. MILP, dt. gemischt-ganzzahlige lineare Programme) hervor. Diese gleichen der Form linearer Optimierungsprobleme, mit dem einzigen Unterschied, dass einige Variablen y auf einen ganzzahligen Wertebereich \mathbb{Z} begrenzt sind. Die allgemeine Form eines MILP lautet in Matrixschreibweise:

$$\text{Zielfunktion:} \quad \max c^t x + h^t y$$

$$\text{Nebenbedingungen:} \quad Ax + By \leq b$$

$$\text{Variablen (reell):} \quad x \in \mathbb{R}^n$$

$$\text{Variablen (integer):} \quad y \in \mathbb{Z}^n$$

Sind alle Variablen ganzzahlig handelt es sich um ein „Integer linear program“ (Abk. ILP, dt. ganzzahliges lineares Programm). Die Lösungsverfahren für LP-Probleme sind auf MILP- und ILP-Probleme nicht direkt übertragbar. Dies liegt vor allem darin begründet, dass der zulässige Bereich der Variablen keinen kontinuierlichen Verlauf hat. Dadurch spannt der Lösungsraum keinen Polyeder mehr auf, wie dies bspw. im Simplex- oder Inneren-Punkt-Verfahren ausgenutzt wird. Für ganzzahlige Probleme existieren daher spezielle Lösungsverfahren, welche sich in heuristische und exakte Verfahren unterteilen lassen. Erstere kennzeichnen sich dadurch, dass sie zulässige Lösungen i. d. R. nach kurzer Zeit bzw. wenigen Iterationen ermitteln, jedoch nicht die Optimalität bzw. Qualität der gefundenen Lösung sicherstellen. Exakte Verfahren hingegen

sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine optimale Lösung ermitteln [Suh-2013, S. 136].

Das intuitivste, exakte Verfahren ist die vollständige Enumeration. Darin wird die Zielfunktion für alle Punkte des Lösungsraum berechnet und daraus das Optimum bestimmt. Der Lösungsraum ergibt sich aus einer Kombination aller zulässigen Werte der ganzzahligen Variablen, ggf. verringert bei Vorhandensein von Nebenbedingungen. Die Größe des Lösungsraums wächst exponentiell mit der Anzahl an Variablen. Seien y_1, \dots, y_n die ganzzahligen Variablen mit dem jeweiligen Wertebereich Y_1, \dots, Y_n . Ohne Berücksichtigung von Nebenbedingungen ergibt sich ein Lösungsraum L der Größe $|L| = \prod_{1 \leq i \leq n} |Y_i|$ ³⁷. In jeder Instanz des Problems $l \in L$ werden die ganzzahligen Variablen, deren Werte im jeweiligen Iterationsschritt fixiert sind, als gebundene Variablen bezeichnet. Dies spielt insb. für MILP-Probleme eine Rolle, da hier für jede Instanz noch ein LP-Problem für die verbliebenen, reellen Variablen gelöst werden muss, jeweils mit den gebundenen Variablen als Konstanten. Aufgrund des exponentiellen Wachstums des Lösungsraum führt eine vollständige Enumeration für größere (M)ILP-Probleme zu einer hohen Rechenzeit.

In der Praxis sind daher implizite Enumerationsverfahren weitaus verbreiteter. Diese berücksichtigen zwar ebenfalls alle Kombination, berechnen aber nicht die explizite Lösung für alle Kombinationen. Durch ein systematisches Durchsuchen des Lösungsraumes wird darin versucht, Teilmengen aus dem Lösungsraum zu eliminieren, welche nicht mehr zu einer optimalen Lösung führen können. Hierzu gehört auch das s. g. Branch & Bound Verfahren (dt. Verzweigung & Schranke). Branching bedeutet darin, dass das Hauptproblem P_0 rekursiv in kleinere Probleme P_1, \dots, P_k zerlegt wird. Typisch ist die sich daraus ergebende Baumstruktur. Durch den alleinigen Einsatz von Branching ergibt sich, außer der übersichtlicheren Darstellung, noch kein Vorteil. Der Lösungsbaum besitzt analog zur vollständigen Enumeration die Tiefe $|L|$. Hier setzt allerdings der zweite Bestandteil, das s. g. Bounding, ein. Hier wird für jedes Teilproblem eine obere Schranke³⁸ berechnet. Wenn diese nicht größer³⁹ als die aktuell beste gefundene Lösung ist, wird der komplette Branching-Zweig verworfen, da er zu keiner besseren Lösung führen kann. Ist die berechnete Schranke hingegen größer³⁹ als die aktuell beste Lösung, wird deren Wert in eine Prioritätenliste aufgenommen. Derjenige Branching-Zweig mit der höchsten oberen Schranke wird dann zuerst weiter aufgespalten, da er vermutlich schneller zu der optimalen Lösung führen wird [Kal-2013, S. 84ff.; Suh-2013, S. 138ff.].

37 Betrachtet man bspw. zwei ganzzahlige Variablen $y_1 \in \{0,1\}$ und $y_2 \in \{0,1,2\}$ entspricht der Lösungsraum $L = \{(0,0), \{1,0\}, \{2,0\}, \{0,1\}, \{1,1\}, \{2,1\}\}$ mit $|L| = 6$.

38 Respektive eine untere Schranke bei Minimierungsproblemen

39 Respektive kleiner bei Minimierungsproblemen

Um das Branch & Bound Verfahren zu verdeutlichen, sei ein beliebiges Maximierungsproblem mit zwei ganzzahligen Variablen y_1, y_2 betrachtet, welche jeweils die Werte $y_1, y_2 \in \{0,1,2\}$ annehmen können. Der vollständige Lösungsbaum ist in Abbildung 6-10 dargestellt und im Folgenden erläutert.

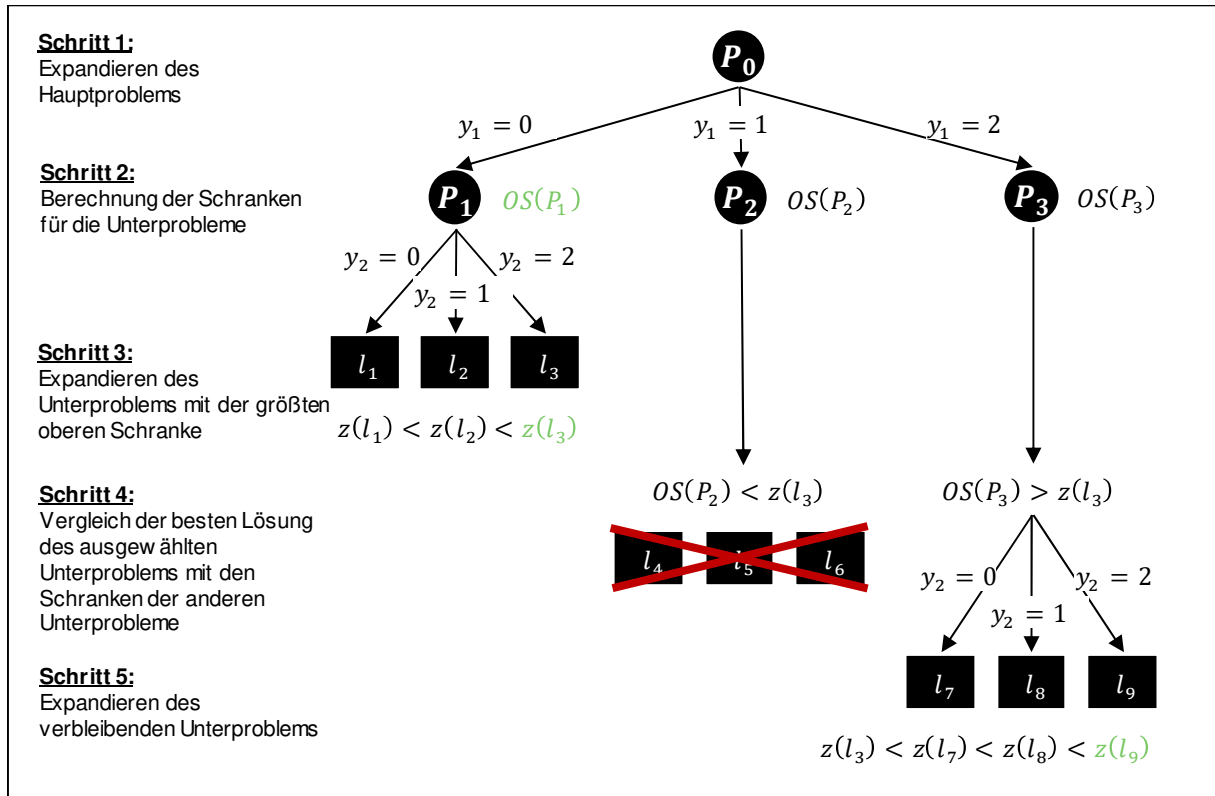


Abbildung 6-10: Schematischer Ablauf des Branch & Bound Verfahrens für ein ILP mit 2 Variablen (eigene Darstellung)

In einem ersten Schritt wird die aktuell beste gefundene Lösung z' auf $-\infty$ gesetzt, da bisher noch keine Lösung mit maximalen Zielfunktionswert gefunden wurde. Anschließend wird das Hauptproblem P_0 expandiert, d. h. für jeden möglichen, gebundenen Wert y_1 wird ein Unterproblem P_1, P_2, P_3 formuliert, welche als verbliebene, freie Variable nur noch y_2 enthalten. Für jedes dieser Unterprobleme wird eine obere Schranke $OS(P_i)$ berechnet. Dies kann bspw. durch eine LP-Relaxation erfolgen, d. h. man ignoriert („relaxiert“) die Ganzzahligkeitsbedingung von y_2 und löst das sich daraus ergebende LP-Problem mit dem Simplex-Verfahren. Die sich ergebenden oberen Schranken werden absteigend sortiert. Sei im Beispiel $OS(P_1) > OS(P_3) > OS(P_2)$. Da P_1 die größte obere Schranke aufweist wird angenommen, dass dieses Unterproblem am schnellsten zur optimalen Lösung führt und wird daher als erstes expandiert. Im Beispiel existieren keine weiteren Unterprobleme, also wird die Zielfunktion z für die Teilmengen des Lösungsraums $l_1, l_2, l_3 \in L$ berechnet. Sei im Beispiel $z(l_3) > z(l_2) > z(l_1)$. Damit ist die aktuell beste Lösung $z' = z(l_3) > -\infty$. Diese Lösung wird mit den oberen Schranken der anderen, bereits formulierten Teilprobleme P_2, P_3 verglichen.

Sei im Beispiel $z(l_3) > OS(P_2)$. Da P_2 selbst mit Verzicht auf die Ganzzahligkeitsbedingung offenbar kein besseres Ergebnis liefern kann, wird dieses Unterproblem nicht weiter behandelt. Sei allerdings $z(l_3) < OS(P_3)$ ⁴⁰. Dann wird anschließend P_3 expandiert und ebenfalls die Zielfunktion z für die Teilmengen des Lösungsraums $l_7, l_8, l_9 \in L$ berechnet. Durch einen Vergleich der sich daraus ergebenden Lösungen mit der aktuell besten Lösung $z' = z(l_3)$ wird das Optimum im Beispiel bei $l_9 = \{2,2\}$ identifiziert.

6.5.2 ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems

Mittels der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Grundlagen gilt es zunächst zu entscheiden, ob das Routenzugfahrplan-Problem als LP formuliert werden kann. Dies böte den Vorteil, dass mit dem Simplex- oder Innere-Punkt-Verfahren effiziente Lösungsverfahren existieren, deren Rechenaufwand nur polynomiell mit der Problemgröße wächst [Suh-2013, S. 132]⁴¹. Sie können also von einer deterministischen Touringmaschine in polynomiell beschränkter Zeit gelöst werden [Weg-1993, S. 36]. ILP oder MILP sind im Allgemeinen deutlich schwieriger zu lösen, da deren Rechenaufwand meist exponentiell mit der Problemgröße steigt [Kal-2013, S. 303]⁴². Sie werden daher im Allgemeinen der Klasse nicht-deterministisch polynomiell zugeordnet (Abk. NP).

Bereits zu Beginn dieses Abschnitts (vgl. Abschnitt 6.5) wurde das Routenzugfahrplan-Problem formuliert. Dieses beinhaltet als Optimierungskriterium die Anzahl an Ressourcen, d. h. Routenzüge und Mitarbeiter, welche nur ganzzahlige Werte annehmen kann. Das Modell wird also zumindest eine Variable aus dem Wertebereich \mathbb{N}^+ beinhalten, weshalb das Problem als ILP oder MILP formuliert werden muss. Im Laufe dieses Abschnitts wird gezeigt, dass durch eine geeignete Modellformulierung alle Variablen auf einen binären oder ganzzahligen Wertebereich begrenzt werden können, wodurch nicht noch zusätzlich lokale LP-Probleme mit gebundenen, ganzzahligen Werten gelöst werden müssen.

Mittels der Einzelmodelle für Fahrplanstruktur, Fahrplanüberschneidungen und Einsatzplanung ergibt sich folgende Formulierung des Routenzugfahrplan-Problems:

⁴⁰ Dies kann durchaus vorkommen, da P_1 nur aufgrund seiner größeren oberen Schranke zuerst expandiert wurde. Die Lösung von P_1 muss aber nicht zwangsweise der oberen Schranke $OS(P_1)$ entsprechen, da für deren Berechnung ja die Ganzzahligkeitsbedingung ignoriert wurde. Die obere Schranke kann sich bspw. für den Wert $y_2 = 1,5$ ergeben haben, welcher per Definition nicht im Lösungsraum enthalten ist.

⁴¹ Ein Beispiel für ein polynomiell lösbares Problem ist der Algorithmus von Dijkstra zur Bestimmung des kürzesten Pfades innerhalb eines Graphen. Dessen maximale Laufzeit wächst im Wesentlichen quadratisch mit der Anzahl an Knoten n .

⁴² In Abbildung 6-10 wurde bereits ein Beispiel für ein NP-Problem aufgezeigt. Dies besitzt den Lösungsraum der Größe $|L| = |Y_1| \cdot |Y_2| = 3^2$. Würde eine Dritte Variable $y_3 \in \{0,1,2\}$ dem Problem hinzugefügt werden, so ergäbe sich $|L| = |Y_1| \cdot |Y_2| \cdot |Y_3| = 3^3$, also ein exponentielles Wachstum.

$$\begin{aligned}
\text{Zielfunktion:} \quad & \min C && (Z) \\
\text{Nebenbedingungen:} \quad & \tau_0^r < t_{Takt}^r && (I) \\
& \tau_i^r = \tau_0^r + (i - 1) * t_{Takt}^r && (II) \\
& C \geq \max(C_\tau) && (III) \\
& d_{ij}(\tau^i, \tau^j) \geq t_{RZF} && (IV) \quad (6-25) \\
\text{Variablen (integer):} \quad & C \in \mathbb{N}^+ \\
\text{Variablen (reell):} \quad & \tau_0^r, \tau_i^r \in \mathbb{R}
\end{aligned}$$

Zielfunktion Z ist die Minimierung der notwendigen Ressourcenanzahl. Nebenbedingung I garantiert, dass die erste Abfahrt einer Route um weniger als deren Taktzeit verschoben wird. Nebenbedingung II stellt darüber hinaus sicher, dass die Touren auf einer Route periodisch gestartet werden sollen. Nebenbedingung III beinhaltet, dass die Ressourcenanzahl dem Maximum der eingesetzten Ressourcen zu jedem Zeitschritt innerhalb des Fahrplans entspricht. Nebenbedingung IV erlaubt nur Fahrpläne, deren minimaler Sicherheitsabstand mindestens der Routenzugfolgezeit entspricht (siehe Formel (6-21)). Das Modell nach (6-25) besitzt mit τ_0^r und τ_i^r zwei reellwertigen Variablen und mit $\max(C_\tau)$ und $d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$ zwei nichtlineare Funktionen⁴³. Es ist deshalb der Klasse der „Mixed integer non-linear programs“ (Abk. MINLP, dt. gemischt-ganzzahlige nichtlineare Programme) zuzuordnen, welche nach *Kallrath* zu den „schwierigsten Optimierungsproblemen überhaupt“ gehören [Kal-2013, S. 116]. Konkret ergeben sich daraus folgende Problemstellungen:

1. Die reelwertigen Variable τ_0^r und τ_i^r können nicht durch Enumeration bspw. mittels des Branch & Bound Verfahrens bestimmt werden, sondern machen eine lokale LP-Relaxation notwendig.
2. Selbst mit einer lokalen LP-Relaxation können die nichtlinearen Funktionen nicht aufgelöst werden, insbesondere nicht durch die Nutzung von Standard-Solvern verbreiteter Softwarewerkzeuge zur mathematischen Optimierung.

Problemstellung eins kann gelöst werden, indem die Zeitvariablen τ_0^r und τ_i^r in einen (zeit-) diskreten Wertebereich überführt werden. Damit lassen sich Nebenbedingung I und II umformulieren zu:

⁴³ Die Maximum-Funktion über einen diskreten Wertebereich ($\max(C_\tau)$), sowie die in der Berechnung von $d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$ verwendete Modulo-Funktion sind per Definition nichtlinear

$$\begin{aligned} \tau_0^r &< t_{Takt}^r & \forall r \in R, \tau_0^r, t_{Takt}^r \in \mathbb{N}^+ & (I) \\ \tau_i^r &= \tau_0^r + (i-1) * t_{Takt}^r & \forall r \in R, \tau_i^r \in \mathbb{N}^+, i \in \mathbb{N}_{v,r}^+ & (II) \end{aligned} \quad (6-26)$$

Die Zeitschrittweite ist prinzipiell frei wählbar, beeinflusst aber den zulässigen Wertebereich und damit den Lösungsraum des Optimierungsproblems. Analysen zum Einfluss der Zeitschrittweite werden in Abschnitt 6.5.3 durchgeführt.

Die nichtlineare Funktion $max(C_\tau)$ kann mittels des in Abschnitt 6.4 erläuterten Ein-satzplanmodells linearisiert werden. Hierzu werden zwei zusätzliche ganzzahlige Variablen $c(\tau_i^r)$ und $d(\tau_i^r)$ notwendig. Diese drücken aus, wie viele Touren zu Abfahrtszeitpunkt λ_i^r einer Tour i auf Route r noch gleichzeitig aktiv sind. Die Variable $c(\lambda_i^r)$ berücksichtigt dabei alle Touren im aktuellen Systemtakt T_{ST} , $d(\lambda_i^r)$ diejenigen Touren aus einem vorhergehenden Systemtakt, welche im aktuellen Systemtakt aber noch nicht beendet sind. Gemäß Formel (6-23) muss für diese beiden Variablen gelten⁴⁴:

$$c(\lambda_i^r) \geq \sum_{s \in R} \sum_{j=1}^{v^s} ((\tau_j^s \leq \tau_i^r) \wedge (\tau_j^s + t_{UZ}^s > \tau_i^r)) \quad (6-27)$$

$$d(\lambda_i^r) \geq \sum_{s \in R} \sum_{j=1}^{v^s} ((\tau_j^s + t_{UZ}^s > T_{ST}) \wedge (\tau_j^s + t_{UZ}^s - T_{ST} \geq \tau_i^r))$$

mit $c(\lambda_i^r), d(\lambda_i^r) \in \mathbb{N}^+$

Einzig verbleibend ist damit die nichtlineare Berechnung von $d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$, insbesondere die darin enthaltene, nichtlineare Modulo-Operation. Auf diese kann allerdings durch die Diskretisierung des Wertebereichs gemäß Formel (6-26) verzichtet werden. Mit τ_i^r und τ_j^s liegen die Abfahrtszeiten zweier Touren i und j auf den Routen r und s ohnehin als ganzzahlige Werte vor. Deren Differenz entspricht dem Sicherheitsabstand zwischen den beiden Touren, welcher für alle Fahrten eine definierte Routenzugfolgezeit nicht überschreiten darf⁴⁵.

Damit ergibt sich die ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems wie folgt:

44 Die Operationen innerhalb der Summenfunktionen stellen sicher, dass für jede Tour mit Abfahrtszeit τ_i^r ein Routenzug für die entsprechend Dauer der Tour reserviert ist. Deren Herleitung wurde bereits detailliert in Abschnitt 6.4 und Formel (6-23) beschrieben.

45 Alternativ kann die Modulo-Funktion gemäß Genç auch linearisiert werden. Allerdings muss hierfür eine zusätzliche Entscheidungsvariable eingeführt werden. Da dadurch aber ebenfalls der Lösungsraum vergrößert wird ohne für den vorliegenden Fall anderweitige Vorteile zu bieten, wird dies nicht weiterverfolgt. Für eine linearisierte Form der Berechnung von $d_{ij}(\tau^i, \tau^j)$ sei auf [Gen-2003, S. 75] verwiesen.

Zielfunktion: $\min C$ (Z)

Nebenbedingungen:

$$\tau_0^r < t_{Takt}^r \quad \forall r \in R \quad (I)$$

$$\tau_i^r = \tau_0^r + (i - 1) * t_{Takt}^r \quad \forall r \in R, \forall i \in \mathbb{N}_{v^r}^+ \quad (II)$$

$$c(\lambda_i^r) \geq \sum_{s \in R} \sum_{j=1}^{v^s} ((\tau_j^s \leq \tau_i^r) \wedge (\tau_j^s + t_{UZ}^s > \tau_i^r)) \quad \forall \lambda_i^r = \tau_i^r \quad (III) \quad (6-28)$$

$$d(\lambda_i^r) \geq \sum_{s \in R} \sum_{j=1}^{v^s} ((\tau_j^s + t_{UZ}^s \geq T_{ST}) \wedge (\tau_j^s + t_{UZ}^s - T_{ST} > \tau_i^r)) \quad \forall \lambda_i^r = \tau_i^r \quad (IV)$$

$$C \geq c(\lambda_i^r) + d(\lambda_i^r) \quad \forall \lambda_i^r = \tau_i^r \quad (V)$$

$$|\tau_i^r - \tau_j^s| \geq t_{RZF} \quad \forall \lambda_i^r \neq \lambda_j^s \quad (VI)$$

Variablen (integer): $\tau_0^r, \tau_i^r, c(\lambda_i^r), d(\lambda_i^r), C \in \mathbb{N}^+$

In der ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems werden folgende Konstanten verwendet:

- $|R|$ Gesamtzahl Routen
- t_{Takt}^r Taktzeit der Route r
- T_{ST} Systemtakt (entspr. $kgV(t_{Takt}^1, \dots, t_{Takt}^R)$)
- v^r Anzahl Touren pro Systemtakt der Route r
- $|\lambda|$ Die Gesamtanzahl an Touren im Fahrplan (entspr. der Anzahl an Zeitschritten, zu denen Nebenbedingungen III-VIII ausgewertet werden muss)
- t_{UZ}^r Umlaufzeit der Route r
- t_{RZF} Routenzugfolgezeit (entspr. minimal zulässigem Sicherheitsabstand)

Der Lösungsraum wird durch folgende Variablen aufgespannt:

- τ_0^r der Zeitschritt, in dem die erste Tour auf Route r gestartet wird
- τ_i^r die Abfahrtszeit einer Tour i auf Route r
- $c(\lambda_i^r)$ die Anzahl gleichzeitig aktiver Touren zum Zeitpunkt der Abfahrt einer Tour i auf Route r , welche im aktuellen Systemtakt gestartet wurden

- $d(\lambda_i^r)$ die Anzahl gleichzeitig aktiver Touren zum Zeitpunkt der Abfahrt einer Tour i auf Route r , welche in einem vorherigen Systemtakt gestartet wurden
- C die Gesamtzahl benötigter Ressourcen

Die Zielfunktion Z ist unverändert die Minimierung der notwendigen Anzahl an Ressourcen. Deren zulässige Werte sind durch die Nebenbedingungen I-VI begrenzt, welche im Einzelnen bedeuten:

- (I) die erste Abfahrt τ_0^r einer Route r kann nur um weniger als deren Taktzeit t_{Takt}^r verschoben werden
- (II) bei gebunden Wert für τ_0^r müssen auf einer Route r eine Anzahl v^r Touren gestartet werden, und zwar bezogen auf τ_0^r jeweils im Abstand $(i - 1) * t_{Takt}^r \forall i \in \mathbb{N}_{v^r}^+$
- (III) zu jedem Zeitpunkt $\lambda_i^r = \tau_i^r$ müssen mindestens so viele Ressourcen verfügbar sein, wie Touren zu diesem Zeitpunkt gestartet ($\tau_j^s \leq \tau_i^r$) und noch nicht abgeschlossen ($\tau_j^s + t_{UZ}^s > \tau_i^r$) sind. Durch die Summenfunktion werden alle Routen $s \in R$ und Fahrten $j \in [1, v^s]$ zu diesem Zeitpunkt betrachtet.
- (IV) zu jedem Zeitpunkt $\lambda_i^r = \tau_i^r$ müssen weitere Ressourcen verfügbar sein, um die Touren aus einem vorherigen Systemtakt ($\tau_j^s + t_{UZ}^s > T_{ST}$) zu bedienen, welche noch nicht abgeschlossen sind ($\tau_j^s + t_{UZ}^s - T_{ST} \geq \tau_i^r$). Hier wird ebenfalls eine Summenfunktion analog Nebenbedingung III verwendet.
- (V) der Wert des Optimierungskriteriums C ist nach unten begrenzt, sodass stets alle Touren aus dem aktuellen Systemtakt und den vorherigen Systemtakt auszuführen werden können. Sie ersetzt die bereits oben erwähnte, nichtlineare Funktion $\max(C_\tau)$ aus Modell (6-25)
- (VI) der zeitliche Abstand zweier (nicht-identischer) Fahrten λ_i^r und λ_j^s muss mindestens der Routenzugfolgezeit entsprechen.

Damit wurde gezeigt, dass sich das Routenzugfahrplan-Problem auf ein ganzzahliges, lineares Optimierungsproblem reduzieren lässt. Dieses sollte demnach mit dem Branch & Bound Verfahren, insbesondere unter Nutzung von Standard-Solvern mathematischer Optimierungsprogramme, optimal lösbar sein. Dies zu zeigen ist Inhalt des nächsten Abschnitts.

6.5.3 Testinstanz und Verbesserung der Schrankengüte

Durch die ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems ist es möglich, dieses algorithmisch zu lösen. In diesem Abschnitt sollen dessen Lösungen anhand einiger Testinstanzen beispielhaft erläutert werden. Im Speziellen sollen die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Kann das Routenzugfahrplan-Problem optimal gelöst werden?
- Welchen Einfluss hat die Wahl der Zeitschrittlänge auf Ergebnisqualität und Rechenzeit des Problems?
- Welchen Einfluss hat die Problemgröße, d. h. die Anzahl an zu terminierenden Routen und Fahrten, auf die Rechenzeit zur Lösung des Problems?

Als Testinstanzen werden das Beispiel aus Abbildung 6-8 und Abwandlungen davon verwendet, da hierfür die optimale Lösung bereits bekannt ist und Auswirkungen geänderter Eingangsdaten relativ einfach grafisch ersichtlich sind. In jeder Instanz werden unverändert drei Routen betrachtet, welche mit den jeweiligen Taktzeiten $t_{Takt}^{R1} = 15 \text{ min}$ und $t_{Takt}^{R2} = t_{Takt}^{R3} = 30 \text{ min}$ verkehren. In jeder Instanz werden allerdings die Umlauf- und Routenzugfolgezeiten verändert. Zur einfacheren Darstellbarkeit der Eingangs- und Ergebnisdaten wird im Folgenden statt der indexbasierten Notation eine vektorbasierte Notation verwendet. Es gilt:

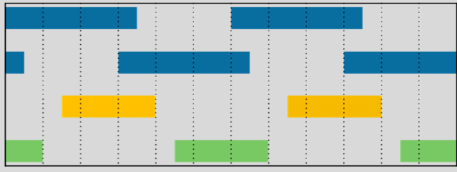
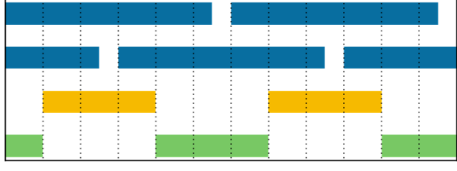
$$x^1 = a^1, \dots, x^n = a^n \Rightarrow \vec{x} = \begin{pmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^1 \\ \vdots \\ a^n \end{pmatrix}$$

Alle Testinstanzen sind in Tabelle 6-3 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6-3: Testinstanzen und deren grafisch ermittelte, optimale Lösungen inkl. Darstellung der Touren in einem Zeitstrahl (blau = Route R1, orange = Route R2, grün = Route R3)

	Konstanten	Optimale Lösung ⁴⁶	Zeitstrahl
Instanz I	$\vec{t}_{UZ} = \begin{pmatrix} 17,5 \\ 12,5 \\ 12,5 \end{pmatrix} \text{ min}$ $t_{RZF} = 2,5 \text{ min}$	$\vec{\tau}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2,5 \\ 17,5 \end{pmatrix} \text{ min}$ $\min C = 2$	

⁴⁶ Angeführt wird jeweils nur eine optimale Lösung. Es sind auch weitere optimale Lösungen möglich, bspw. durch Verschiebung aller Touren innerhalb des Systemtakts um den gleichen Betrag oder durch Vertauschung der Startreihenfolge der Routen R2 und R3.

Instanz II	$\vec{t}_{UZ} = \begin{pmatrix} 17,5 \\ 12,5 \\ 12,5 \end{pmatrix} \text{min}$ $t_{RZF} = 7,5 \text{ min}$	$\vec{\tau}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 7,5 \\ 22,5 \end{pmatrix} \text{min}$ $\min C = 3$	
Instanz III	$\vec{t}_{UZ} = \begin{pmatrix} 27,5 \\ 15 \\ 15 \end{pmatrix} \text{min}$ $t_{RZF} = 5 \text{ min}$	$\vec{\tau}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 20 \end{pmatrix} \text{min}$ $\min C = 3$	

Instanz I entspricht dem Beispiel aus Abbildung 6-8. Darin wird die minimale Ressourcenanzahl erzielt, wenn Touren auf den Routen $R2$ und $R3$ unmittelbar nach Abschluss einer Tour auf Route $R1$ starten. Die Routenzugfolgezeit i. H. v. 2,5 Minuten wird dann (gerade eben) eingehalten. In Instanz II sind aufgrund der höheren Routenzugfolgezeit ausschließlich Lösungen zulässig, in denen Touren auf den Routen $R2$ und $R3$ jeweils 7,5 Minuten nach den Touren auf Route $R1$ starten. In diesen Lösungen ergibt sich eine minimale Ressourcenanzahl i. H. v. drei. Für Instanz III wurden die Umlaufzeiten erhöht und eine Routenzugfolgezeit i. H. v. fünf Minuten angenommen. Dadurch ergibt sich die optimale Lösung durch eine Synchronisation zwischen den Touren auf Routen $R2$ und $R3$. Eine Tour auf Route $R2$ muss jeweils unmittelbar nach Abschluss einer Tour auf Route $R3$ starten und umgekehrt. Die zeitliche Lage zu den Touren auf Route $R1$ ist nur insofern relevant, dass die Routenzugfolgezeit eingehalten wird. Hier ergibt sich eine Minimale Ressourcenanzahl i. H. v. drei.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Lösung des Routenzugfahrplan-Problems die Software „IBM ILOG CPLEX Optimization Studio“ (kurz: CPLEX) verwendet⁴⁷. Dabei handelt es sich um ein kommerzielles Programmpaket zur Lösung linearer und nichtlinearer Optimierungsprobleme mit kontinuierlichen und gemischt ganzzahligen Variablen. Im Vergleich zu einer Implementierung in einer Allzweck-Programmiersprache, bspw. C# oder JAVA, bietet dies den Vorteil, dass der Branch & Bound Algorithmus bereits integrativer Bestandteil des CPLEX-Solvers ist und nicht spezifisch implementiert werden muss.

Die oben beschriebenen Testinstanzen wurden mittels des in CPLEX implementierten Routenzugfahrplan-Problems getestet. Jede Instanz wurde mit 4 verschiedenen Zeit-

⁴⁷ Natürlich ist dies auch mit anderen ILP-Solvern möglich. Nach einem quantitativen Vergleich unterschiedlicher Softwareprodukte nach Meindl und Templ sind kommerzielle Produkte jedoch deutlich effizienter in Bezug auf Rechenzeit und Anzahl gelöster Instanzen als open-source Solver [Mei-2013].

schrittlängen $\Delta t_1 = 1 s$, $\Delta t_2 = 10 s$, $\Delta t_3 = 30 s$ und $\Delta t_4 = 1 min$ gelöst. Für jede Instanz und Zeitschrittlänge wurden 30 Läufe mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen⁴⁸ ausgeführt. Die gefundenen Optima sind in Abbildung 6-11 dargestellt.

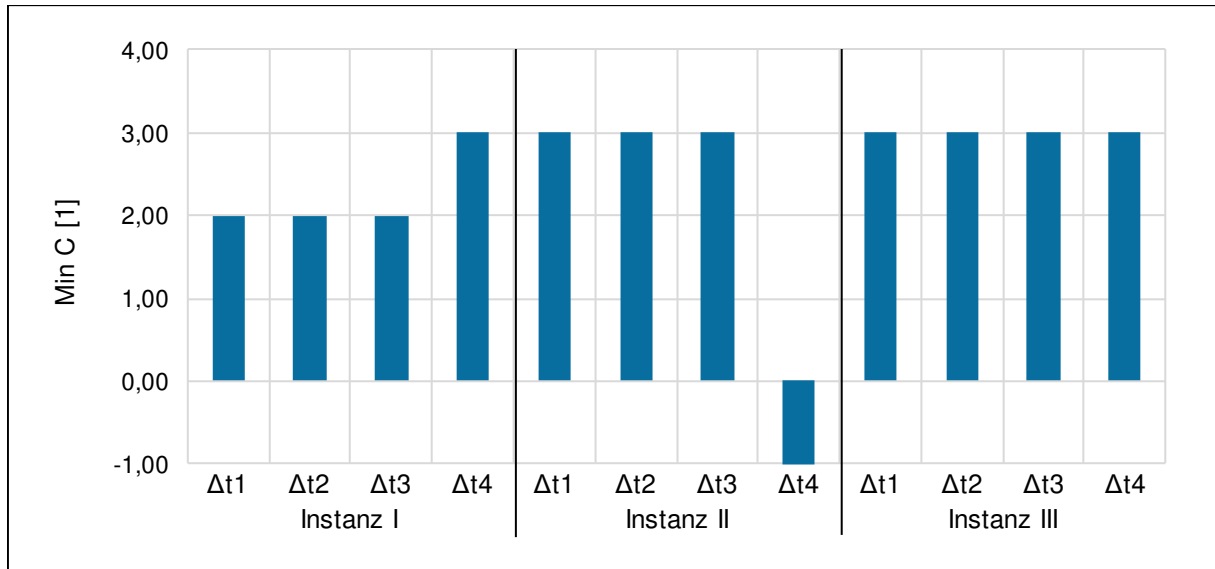


Abbildung 6-11: Lösungen der Testinstanzen: Von CPLEX gefundene Optima. Negative Werte für Min C zeigen an, dass keine gültige Lösung gefunden wurde (eigene Darstellung)

Für Instanz I wurde das grafisch ermittelte Optimum für die Zeitschrittlängen Δt_1 , Δt_2 und Δt_3 gefunden. Für Δt_4 wurde nur eine Lösung mit einer minimalen Ressourcenanzahl i. H. v. drei ermittelt. Dies liegt darin begründet, dass aufgrund der Ganzzahligkeitsbedingung für eine Zeitschrittlänge $\Delta t_4 = 1 min$ nur Abfahrten zu vollen Minuten eingeplant werden. Für die optimale Lösung müssen einzelne Touren jedoch im Abstand von 2,5 Minuten gestartet werden, was nicht im Wertebereich der zulässigen Abfahrtszeitpunkte liegt. Ähnliches gilt auch für Instanz II. Hier wurde das Problem für die Zeitschrittlängen Δt_1 , Δt_2 und Δt_3 optimal gelöst. Für Δt_4 wurde keine Lösung gefunden ($min C = -1$), da nur für einen zeitlichen Abstand der Touren i. H. v. 7,5 Minuten zulässige Lösungen existieren (siehe Tabelle 6-3). In allen anderen Fällen würde die Routenzugfolgezeit unterschritten. In Instanz III existieren keine derartigen Einschränkungen, weshalb das Problem für alle Zeitschrittlängen optimal gelöst wurde. Es zeigt sich, dass die Zeitschrittlänge einen Einfluss auf die Ergebnisqualität der Routenzugfahrplan-Lösung hat: Zwar konnte dieses für alle Testinstanzen gelöst werden bzw. es wurde die Nichtexistenz einer gültigen Lösung gezeigt. Allerdings schränkt die Zeitschrittlänge den zulässigen Wertebereich der Variablen ein, weshalb diese u.U. per Definition nicht die grafisch ermittelten, optimalen Werte annehmen können.

⁴⁸ Der CPLEX-Solver verwendet interne Zufallszahlen bspw. zur Bestimmung der Startknoten für den Branch and Bound Algorithmus oder der Auswahl des nächsten Knoten bei identischen Schranken. Eine wiederholte Ausführung mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen erlaubt Rückschlüsse auf die durchschnittliche Rechenzeit zur Findung des Optimierungsergebnisses.

Die Rechenzeiten⁴⁹, welche der CPLEX-Solver zur Lösung der einzelnen Instanzen benötigt hat, sind in Abbildung 6-12 dargestellt. Zur Darstellung von Streuungen der Rechenzeiten zwischen den unterschiedlichen Läufen wurde eine Boxplot-Darstellung gewählt⁵⁰. Darin sind Mediane, untere und obere Quartile sowie Minima und Maxima dargestellt, wobei die Werteachse logarithmisch skaliert ist.

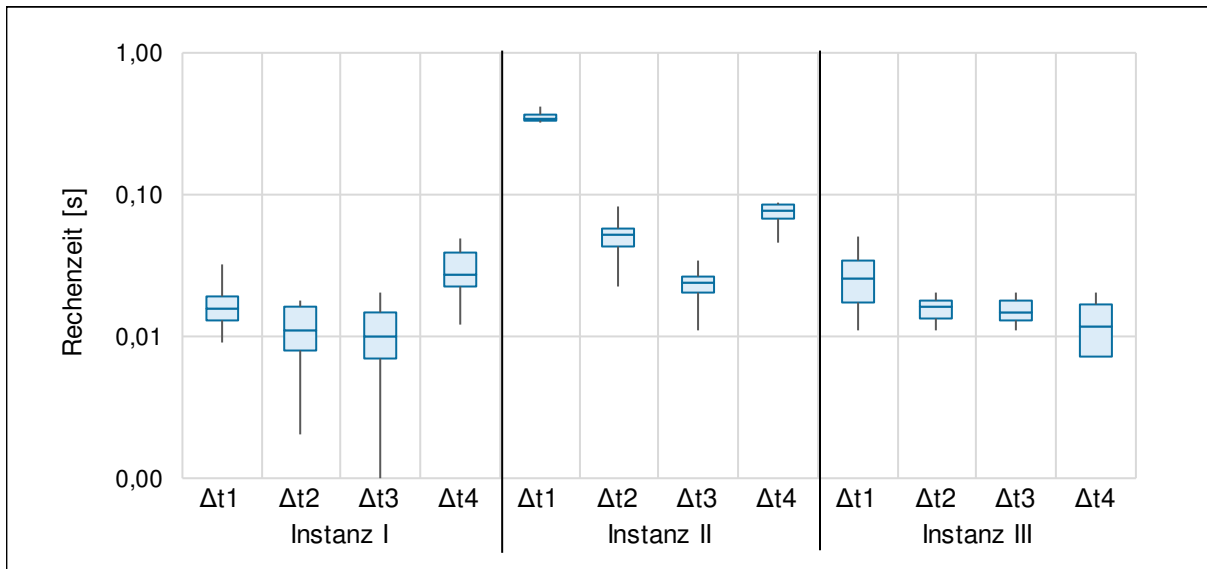


Abbildung 6-12: Lösungen der Testinstanzen: Rechenzeiten zur Ermittlung der gefundenen Optima (eigene Darstellung)

Ersichtlich ist darin zum einen, dass innerhalb einer Instanz diejenigen Lösungen größere Rechenzeiten benötigen, welche nicht zum grafisch ermittelten Optimum führen (Δt_4 in Instanz I & II). Hier müssen vergleichsweise viele Unterprobleme expandiert und gelöst werden um nachzuweisen, dass keines davon eine bessere Lösung liefert als die aktuelle untere Schranke⁵¹. Bei gleichem Optimum steigt die Rechenzeit für alle Instanzen dann exponentiell, je kleiner die Zeitschritte werden. Dies war jedoch zu erwarten, da in der ILP-Darstellung zwei Variablen existieren (τ_0^r , τ_i^r), deren zulässiger Wertebereich sich bei einer Halbierung der Zeitschrittlänge verdoppelt. Durch die Kombinatorik zwischen den Variablen ergibt sich dann ein exponentielles Wachstum des Lösungsraums. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Lösung von Instanz II mehr Zeit in Anspruch nimmt als von Instanz III. Instanz I wiederum wird bei gleicher Zeitschrittlänge tendenziell am schnellsten gelöst. Dies liegt darin begründet, dass bei Instanz II der zulässige Lösungsraum durch die hohe Routenzugfolgezeit sehr eingegrenzt ist. D. h. der Branch & Bound Algorithmus benötigt vergleichsweise lang, überhaupt eine

49 Diese ist natürlich abhängig von der verwendeten Hard- und Software. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Konfiguration ist in Anhang A spezifiziert.

50 Streuungen beim gefundenen Optimum können nicht auftreten, da mit dem Branch & Bound Verfahren ein exaktes Lösungsverfahren verwendet wird.

51 Am Beispiel von Instanz I: Um die Optimalität einer Lösung mit dem Wert zwei nachzuweisen (Δt_1 bis Δt_3) müssen alle Unterprobleme mit einer unteren Schranke kleiner oder gleich eins betrachtet werden. Bei Δt_4 müssen hingegen zusätzlich alle Unterprobleme mit einer unteren Schranke kleiner oder gleich zwei betrachtet werden.

zulässige Lösung zu finden. Bei Instanz I hingegen sind mehr Lösungen zulässig. Der Branch & Bound Algorithmus findet schneller eine zulässige Lösung, mit Hilfe derer die Schranken abgeglichen werden können, wodurch der Suchbaum effektiver durchlaufen wird. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass das Routenzugfahrplan-Problem für alle drei Testinstanzen in sehr kurzer Zeit (maximal 525 Millisekunden) optimal gelöst werden konnte bzw. es wurde die Nichtexistenz einer gültigen Lösung gezeigt.

Allerdings sind die Testinstanzen vergleichsweise klein, da jeweils nur drei Routen mit insgesamt acht Fahrten innerhalb eines Systemtakts terminiert werden müssen. In der Praxis eingesetzte Routenzugsysteme sind häufig deutlich größer bezogen auf die Anzahl Routen und Fahrten⁵². Dadurch wächst der Lösungsraum ebenfalls exponentiell und es ist ein signifikanter Einfluss der Problemgröße auf die Rechenzeit zur Lösung des Routenzugfahrplan-Problem zu erwarten. Hierfür sei exemplarisch Instanz I aus Tabelle 6-3 schrittweise vergrößert, wobei in jedem Schritt drei Routen hinzugefügt werden. Die Takt- und Umlaufzeiten dieser neuen Routen entsprechen denjenigen der ursprünglichen Testinstanz I. Die Restriktion durch eine minimal einzuhaltende Routenzugfolgezeit wird für diese Betrachtung ignoriert ($t_{RZF} = 0 \text{ min}$). Sind diese drei Routen optimal zeitlich synchronisiert, lasten diese zwei Ressourcen vollständig aus (vgl. Abbildung 6-8). Daher ist zu erwarten, dass sich in der optimalen Lösung des Routenzugfahrplan-Problems der Zielfunktionswert mit jedem Schritt um zwei erhöht. In Abbildung 6-13 sind die durchschnittlichen Rechenzeiten zur Lösung des Routenzugfahrplanproblems für verschiedene Systemgrößen und Zeitschrittlängen $\Delta t_1 = 1 \text{ s}$, $\Delta t_2 = 10 \text{ s}$ und $\Delta t_3 = 30 \text{ s}$ aufgetragen. Da bei der Zeitschrittlänge $\Delta t_4 = 1 \text{ min}$ das theoretisch erzielbare Optimum nicht gefunden wird⁵³, wird diese hier nicht weiter betrachtet. Pro Problem wurden wiederum 30 Läufe mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen ausgeführt und der arithmetische Mittelwert über die Rechenzeiten pro Lauf gebildet.

52 In der Studie von Lieb et al. geben 22 % der insgesamt 162 Befragten an, Routenzugsysteme mit zehn oder mehr Routenzügen zu betreiben, was mindestens der fünffachen Größe von Testinstanz I mit zwei Routenzügen entspricht [Lie-2017, S. 49].

53 Dies ist nicht zu verwechseln damit, dass das Routenzugfahrplan-Problem nicht optimal gelöst wird: Dieses wird auch für Δt_4 im definierten Wertebereich des Problems optimal gelöst (siehe Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12). Die theoretisch optimale Lösung mit Abfahrten zu nicht vollen Minutenschritten liegt in diesem Fall jedoch nicht im Wertebereich des Problems.

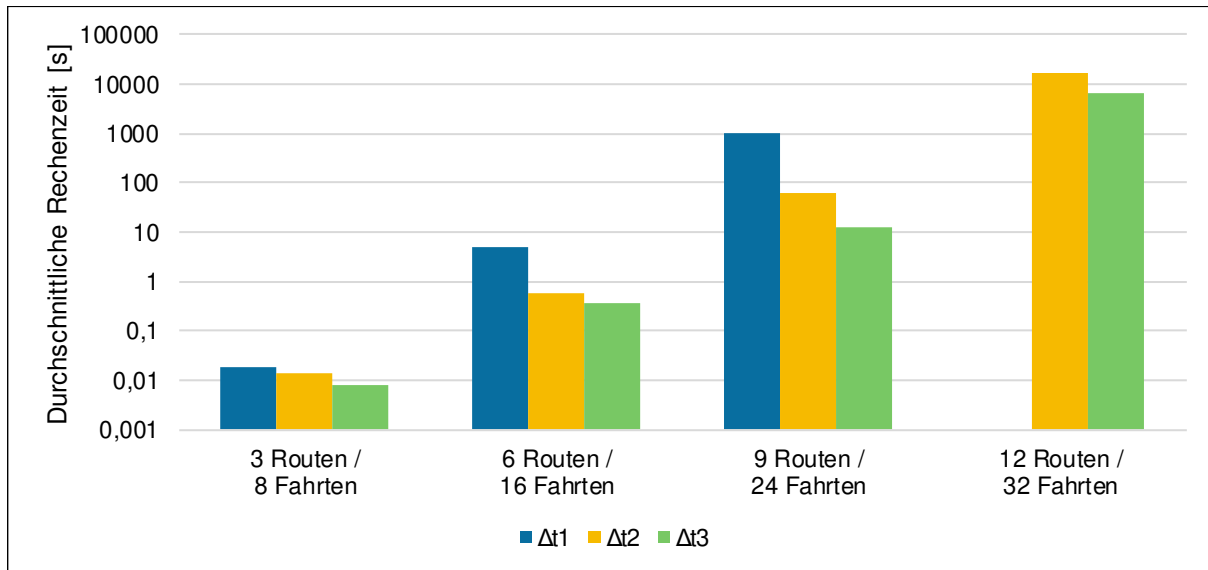


Abbildung 6-13: Durchschnittliche Rechenzeiten bei Veränderung der Anzahl an Routen und Fahrten (eigene Darstellung)

Für alle Zeitschrittlängen gut ersichtlich ist der erwartete exponentielle Anstieg der Rechenzeit mit Erhöhung der Anzahl an Routen und Fahrten: Während die ursprüngliche Testinstanz I für alle Zeitschrittlängen noch in unter 20 Millisekunden gelöst werden kann, benötigt die Lösung eines doppelt so großen Problems durchschnittlich bereits zwischen 350 Millisekunden (Δt_3) und 4,7 Sekunden (Δt_1). Die Lösung eines viermal so großen Problems benötigt für Δt_2 und Δt_3 bereits mehrere Stunden. Eine sekundengenaue Lösung (Δt_1) eines solchen Problems wurde im Rahmen der Tests nach einer Laufzeit von 24 Stunden abgebrochen, ohne dass in dieser Zeit das Problem ein einziges Mal gelöst werden konnte. In Anbetracht der Systemgröße realer Routenzugsysteme sowie der übergeordneten Anforderung, den zu entwickelnden Ansatz im Rahmen der operativen Routenzugplanung einsetzen zu können, ist diese Rechenzeit zur Lösung des Routenzugfahrplanproblems nicht akzeptabel. Daher wird im Folgenden untersucht, ob der Branch & Bound Algorithmus des CPLEX-Solvers durch eine Änderung der Nebenbedingungen des Routenzugfahrplanproblems bessere untere Schranken liefern kann, mit denen der Suchbaum effizienter durchlaufen werden kann. Hierzu zeigt Abbildung 6-14 exemplarisch den Verlauf der Werte für die aktuell beste Lösung des Problems sowie den Wert der unteren Schranke über die Laufzeit des Branch & Bound Algorithmus am Beispiel eines Routenzugsystems mit 9 Routen und 24 Fahrten und einer Zeitschrittlänge von 10 Sekunden (Szenario 3 aus Abbildung 6-13 mit Δt_2).

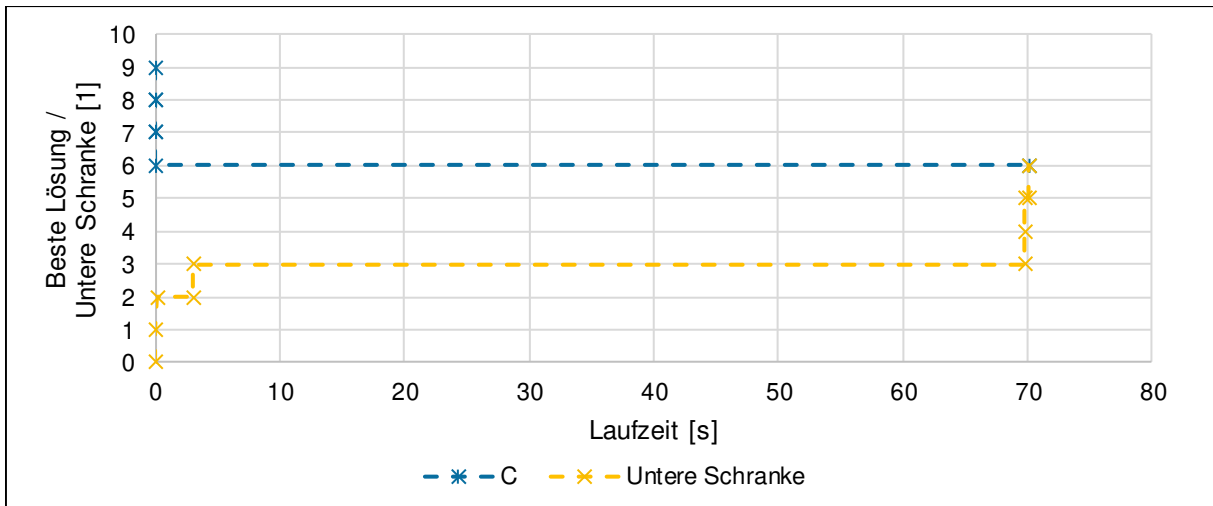


Abbildung 6-14: Werte der aktuell besten Lösung und unteren Schranke über die Laufzeit des Branch & Bound Algorithmus am Beispiel eines Routenzugsystems mit 9 Routen und 24 Fahrten und einer Zeitschrittlänge von 10 s (eigene Darstellung)

Das zu erwartende Optimum für dieses Szenario ist $\min C = 6$. Dieses ist bei allen Fahrplänen erzielbar, bei denen jeweils drei aufeinanderfolgende Routen im zeitlichen Abstand von 7,5 Minuten gestartet werden (vgl. Abbildung 6-8). Eine solche Lösung wird im Beispiel bereits nach 50 Millisekunden gefunden, was weniger als 0,1 Prozent der Gesamt-Laufzeit des Branch & Bound Algorithmus entspricht. Allerdings nimmt zu diesem Zeitpunkt die untere Schranke des nächstbesten Unterproblems noch Werte kleiner sechs an, weshalb diese in der verbleibenden Laufzeit weiter expandiert werden. Schließlich könnten diese noch zu einem besseren Wert C führen. Ein Optimum wird im Beispiel also bereits nach sehr kurzer Zeit gefunden, während nahezu die komplette Laufzeit des Branch & Bound Algorithmus dafür aufgewendet wird, die Optimalität dieser Lösung nachzuweisen.

Daraus stellt sich die Frage, ob das Routenzugfahrplan-Problem um zusätzliche Nebenbedingungen erweitert werden kann, welche eine bessere, d. h. näher am Optimum liegende, untere Schranke $US(q)$ eines formulierten Unterproblems q liefern. Diese Nebenbedingungen sollten nur die ohnehin bereits benutzen Konstanten und Variablen verwenden, sodass der Lösungsraum des Routenzugfahrplan-Problems nicht weiter vergrößert wird. Ein Zusammenhang zwischen der minimal notwendigen Ressourcenanzahl $\min C$ und den Takt- und Umlaufzeiten der Routen wurde bereits durch den Fahrplanwirkungsgrad α_λ gemäß Formel (6-24) hergeleitet. Dieser besagt, dass der Quotient aus Fahrplanmasse (Dauer aller Touren pro Zeitschritt) und Umlaufmasse (die verfügbare Einsatzzeit aller eingesetzten Ressourcen in diesem Zeitschritt) stets kleiner oder gleich eins sein muss. Das heißt, dass mindestens so viele Ressourcen vorhanden sein müssen, um die Summe der Umlaufzeiten aller Fahrten in einem

gegebenen Zeitintervall T_{ST} abzudecken⁵⁴. Wird Formel (6-24) nach der Ressourcenanzahl $C = \text{Max}(C_r)$ umgestellt, ergibt sich der Zusammenhang zwischen dem Systemtakt T_{ST} , den Taktzeitmultiplikatoren v^r und Umlaufzeiten t_{UZ}^r , sowie der auf den ganzzahligen Wertebereich begrenzten Ressourcenanzahl C gemäß folgender Formel:

$$C \geq \left\lceil \frac{\sum_{r \in R} v^r \cdot t_{UZ}^r}{T_{ST}} \right\rceil \quad (6-29)$$

Formel (6-29) ist unabhängig von (freien) Variablen des Routenzugfahrplan-Problems und verwendet lediglich dessen Konstanten. Sie kann daher unmittelbar in eine neue Nebenbedingung VII für das Routenzugfahrplan-Problem überführt werden. Aus dieser ergibt sich eine globale untere Schranke, welche die Werte von C unabhängig von den konkreten Abfahrtszeiten der einzelnen Unterprobleme nach unten begrenzt. Mit dieser neuen Nebenbedingung ist für das Beispiel gemäß Abbildung 6-14 zu erwarten, dass der Branch & Bound Algorithmus die Suche beendet, sobald die erste Lösung mit einer Ressourcenanzahl i. H. v. von sechs gefunden wurde. Dieses Problem sollte also im Millisekunden-Bereich gelöst werden können. Um diesen erwarteten Effekt zu bestätigen, werden die verschiedene Systemgrößen und Zeitschrittlängen gemäß Abbildung 6-14 nochmals mittels CPLEX gelöst, wobei nun das um Nebenbedingung VII erweiterte Routenzugfahrplan-Problem verwendet wurde. Pro Problem wurden erneut 30 Läufe mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen ausgeführt und der arithmetische Mittelwert über die Rechenzeiten pro Lauf gebildet. Die Ergebnisse zeigt folgende Abbildung:

⁵⁴ Dieses Minimum wird dann erzielt, wenn ein Routenzugfahrer unmittelbar nach Abschluss einer Fahrt ohne Wartezeit eine neue Fahrt beginnen kann. Dies entspricht einem Fahrplanwirkungsgrad von 100 %.

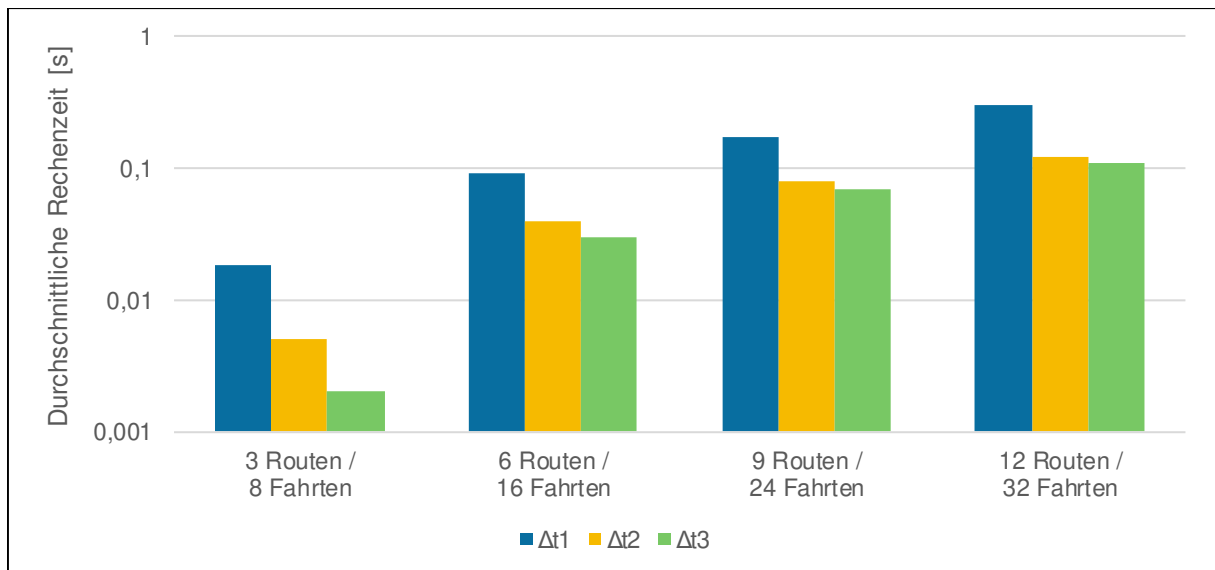


Abbildung 6-15: Durchschnittliche Rechenzeit zur Lösung der Testinstanz I bei Veränderung der Anzahl an Routen und Fahrten bei unterschiedlichen Zeitschrittlängen unter Verwendung des angepassten Routenzugfahrplan-Problems (eigene Darstellung)

Bei gleicher Systemgröße ist nach wie vor eine exponentielle Steigerung der Rechenzeit bei kleineren Zeitschrittlängen zu verzeichnen. Allerdings bewirkt die Verbesserung der Schrankengüte insgesamt eine signifikante Reduzierung der Rechenzeit für alle Zeitschrittlängen und Systemgrößen. Alle Testfälle können nun in deutlich unter einer Sekunde optimal gelöst werden. Bei gleichen Zeitschrittlängen steigt die Rechenzeit mit zunehmender Systemgröße zwar nach wie vor, allerdings ist hier kein exponentielles Wachstum mehr zu verzeichnen, da der Branch & Bound Algorithmus eine einmal gefundene optimale Lösung als solche erkennt und die Suche beendet.

Anhand dieser Beispiele und dem optimierten Routenzugfahrplan-Problem lassen sich die am Anfang dieses Abschnitts aufgestellten Fragestellungen wie folgt beantworten:

– **Kann das Routenzugfahrplan-Problem optimal gelöst werden?**

Ja. Das in CPLEX implementierte Routenzugfahrplan-Problem kann für alle Instanzen innerhalb des jeweils zulässigen Lösungsraums optimal gelöst werden. Existiert keine zulässige Lösung, wird deren Nichtexistenz gezeigt. Der zulässige Lösungsraum wird dabei durch die gewählte Zeitschrittlänge begrenzt.

– **Welchen Einfluss hat die Wahl der Zeitschrittlänge auf Ergebnisqualität und Rechenzeit?**

Die Zeitschrittlänge hat signifikanten Einfluss auf Ergebnisqualität und Rechenzeit. Bei kleineren Zeitschrittlängen wächst die Rechenzeit exponentiell. Andererseits sind bei zu groß gewählten Zeitschritten u.U. mögliche Lösungen nicht im zulässigen Bereich

der ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems. In einem reelwertigen Zeitbereich ließen sich u.U. bessere Lösungen, d. h. Fahrpläne mit einem geringeren Ressourceneinsatz, finden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aber stets eine Zeitschrittlänge von 30 Sekunden gewählt. Zum einen gewährleistet dies eine geringe Rechenzeit. Weiterhin würde eine darüber hinaus gehende, sekundengenaue Taktung eine Scheingenauigkeit implizieren, welche in einem manuellen Routenzugprozess ohnehin nicht einzuhalten ist. Der resultierende Fahrplan müsste dann schließlich auch sekundengenau eingehalten werden.

– **Welchen Einfluss hat die Problemgröße, d. h. die Anzahl an zu terminierenden Routen und Fahrten, auf die Rechenzeit zur Lösung des Problems?**

Eine Steigerung der Anzahl Routen Fahrten im Fahrplan steigert die Rechenzeit des Branch & Bound Algorithmus erwartbar überproportional. Allerdings konnte durch eine zusätzliche Nebenbedingung die Güte der unteren Schranke verbessert werden, so dass die zunächst exponentielle Steigerung der Rechenzeit bei Erhöhung der Systemgröße vermieden werden kann. In den betrachteten Testfällen steigert sich die Rechenzeit beispielhaft gemäß einer Potenzreihe mit ungeraden Exponenten (Wurzelfunktion).

7 Integrierte Taktzeit- und Fahrplanplanung

In den vorherigen Kapiteln wurden bisher nur Einzelmodelle für die Taktzeitplanung und Fahrplanplanung erstellt. In Kapitel 5 wurde hierfür hergeleitet, welche Einflussgrößen bei der Wahl der Taktzeiten der einzelnen Routen berücksichtigt werden müssen. Ergebnis waren die in Abschnitt 5.3 zusammengefassten, oberen Schranken für die Taktzeit einer Route. Diese ergeben sich aus der Transportnachfrage, der Routenzugkapazität sowie den maximal zulässigen Versorgungsintervallen. Die Lösung des in Abschnitt 6.5 erstellten Routenzugfahrplan-Problems ermöglicht es, für gegebene Taktzeiten einen einsatzoptimalen und überschneidungsfreien Routenzugfahrplan zu erstellen. Die sequentielle Lösung jeder dieser Planungsaufgaben führt jedoch nicht automatisch zu einem Gesamtoptimum. So kann zwar mittels Taktzeitplanungsmodells die Taktzeit für jede Route so bestimmt werden, dass die Transportnachfrage exakt gedeckt wird. Allerdings sind dann Überschneidungen im Routenzugfahrplan sowie dessen gute Ressourcenauslastung nicht garantiert. Andererseits kann während der Fahrplanplanung ein optimaler Fahrplan erzeugt werden, welcher dann jedoch u. U. zu wenige Touren zur Deckung der Transportnachfrage enthält. In diesem Kapitel werden daher die jeweiligen Einzelmodelle in einem integrierten Modell zur Taktzeit- und Fahrplanplanung zusammengeführt. Die Planungsaufgabe, welche mit diesem integrierten Modell gelöst werden soll, lautet somit:

Eine Anzahl von unterschiedlichen Routen R beginnen alle an einem gemeinsamen Routenzugbahnhof. Die Transportnachfrage sowie die Kapazität eines Routenzuges seien bekannt. Alle Routenzüge besitzen identische Kapazität. **In welchen Intervallen und zu welchen Zeitpunkten sollen die Routen abfahren, so dass:**

- **die Transportnachfrage gedeckt wird,**
- **die zulässigen Versorgungsintervalle eingehalten werden,**
- **der minimale zeitliche Abstand (Sicherheitsabstand) zwischen den Abfahrten zweier aufeinanderfolgender Touren mindestens der Routenzugfolgezeit t_{RZF} entspricht, und**
- **der Fahrplan mit einer minimalen Anzahl an Mitarbeitern und Routenzügen ausgeführt werden kann.**

In Abschnitt 7.1 wird zur Lösung dieser Planungsaufgabe ein Optimierungsmodell erstellt. Dessen Lösungsverfahren wird in Abschnitt 7.2 beschrieben und in Abschnitt 7.3 exemplarisch anhand einer Testinstanz angewandt.

7.1 Integriertes Routenzugtakt-Problem

Da das integrierte Routenzugtakt-Problem eine Erweiterung des Routenzugfahrplan-Problems darstellt, sei zunächst noch einmal dessen Konstanten und Variablen eingegangen. Für das Routenzugfahrplan-Problems wurden folgende Werte als konstant angenommen:

- Anzahl an Routen R
- Taktzeiten t_{Takt}^r
- Systemtakt T_{ST}
- Anzahl an Touren pro Systemtakt v^r
- Umlaufzeiten t_{UZ}^r
- Routenzugfolgezeit t_{RZF}

Weiterhin sind die Variablen x_τ^r , c_τ , d_τ^r und C über die Nebenbedingungen (linear) abhängig von den Startzeiten der Routen τ_0^r ⁵⁵. Somit ist die Ressourcenanzahl innerhalb des Routenzugfahrplan-Problems C_{RZF} bei gegebenen Konstanten lediglich eine Funktion der Startzeiten der Routen τ_0^r . Es gilt: $C_{RZF}(R, t_{Takt}^r, T_{ST}, v^r, t_{UZ}^r, t_{RZF}) = f(\tau_0^r)$. Dieser funktionelle Zusammenhang soll nun, gemäß der eingangs formulierten Planungsaufgabe, erweitert werden, um die Taktzeiten der Routen bestimmen zu können. Weiterhin wurde bereits in den Abschnitten 6.1 und 6.2 aufgezeigt, dass sowohl der Systemtakt, die Anzahl an Touren pro Systemtakt sowie die Umlaufzeit wiederum Funktionen der Taktzeiten sind. Somit können diese im integrierten Routenzugtakt-Problem nicht mehr als konstant angenommen werden.

Gemäß Formel (6-14) gilt für den Systemtakt:

$$T_{ST}(t_{Takt}^1, \dots, t_{Takt}^r) = kgV(t_{Takt}^1, \dots, t_{Takt}^r) \quad (7-1)$$

Aus Formel (6-15) ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Anzahl Touren pro Systemtakt und der Taktzeit einer Route zu:

$$v^r(t_{Takt}^r) = \frac{T_{ST}}{t_{Takt}^r} \quad (7-2)$$

⁵⁵ siehe hierzu Konstanten und Variablen des Routenzugfahrplan-Problems in Abschnitt 6.5.2

Die Umlaufzeit einer Route in Abhängigkeit der Taktzeit kann wiederum mittels Formeln (6-1), (6-2)⁵⁶ (6-9) (6-10) und (6-11)⁵⁷ bestimmt werden. Damit gilt:

$$t_{UZ}^r(t_{Takt}^r) = t_{BZ} + t_{FZ} + t_{HZ}(t_{Takt}^r) + t_{LB}(t_{Takt}^r) + t_{EZ} + t_{SO} \quad (7-3)$$

Die Anzahl an Routen R sowie die Routenzugfolgezeit t_{RZF} können per Definition weiterhin als Konstanten betrachtet werden. In Abschnitt 5.3 wurde das Transportnachfrage- und Transportangebotsmodell zusammengefasst. Ergebnis waren die Ungleichungen, welche die zu wählende Taktzeit nach oben begrenzen. Nach Formel (5-14) muss die Taktzeit einer Route kleiner oder gleich dem Quotienten aus Transportangebot A^r und Transportnachfrage N^r auf dieser Route sein. Es gilt:

$$t_{Takt}^r \leq \frac{A^r}{N^r} \quad (7-4)$$

mit $A^r = \eta_K^r \cdot K_{LP,RZ} = const.$

$$N^r = \sum_{m \in M^r} \frac{n_{TP,m} \cdot n_{VQ,m}}{n_{Füll,m} \cdot t_{PT}} \cdot n_{LP,m} = const.$$

Zudem wird die Taktzeit durch dasjenige Material mit dem geringsten Versorgungsintervall begrenzt. Gemäß Formel (5-15) muss gelten:

$$t_{Takt}^r \leq t_{VI,min}^r \quad (7-5)$$

mit $t_{VI,min}^r = \min_{m \in M^r} (t_{VI,1}, \dots, t_{VI,m}) = const.$

Ein analoger Zusammenhang gilt ebenfalls für das Bedarfserkennungsintervall bei verbrauchsgesteuerten Materialien. Auch hier muss eine Route mindestens so häufig bedient werden, wie durch das Material mit dem geringsten Bedarfserkennungsintervall auf dieser Route. Gemäß Formel (5-16) muss gelten:

$$t_{Takt}^r \leq t_{BI,min}^r \quad (7-6)$$

mit $t_{BI,min}^r = \min_{m \in M^r} (t_{BI,1}, \dots, t_{BI,m}) = const.$

⁵⁶ Respektive Formel (6-3) bei Verwendung einer Durchschnittsgeschwindigkeit.

⁵⁷ Respektive Formel (6-12) falls die Leergutentladung durch den Routenzugfahrer selbst erfolgt. In diesem Fall gilt $t_{EZ} = f(t_{Takt}^r)$

Somit ist die Ressourcenanzahl innerhalb des integrierten Routenzugtakt-Problems C_{RZT} eine Funktion der Taktzeiten der Routen t_{Takt}^r sowie den Startzeiten der Routen $\tau 0^r$. Es gilt: $C_{RZT} = f(t_{Takt}^r, \tau 0^r)$. Alle anderen Werte können als konstant bzw. als Funktion der Taktzeit dargestellt werden.

Mit diesen Vorüberlegungen kann das integrierte Routenzugtakt-Problem wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned}
 \text{Zielfunktion:} \quad & \min C_{RZF}(R, t_{Takt}^r, T_{ST}(t_{Takt}^1, \dots, t_{Takt}^r), \\
 & v^r(t_{Takt}^r), t_{UZ}(t_{Takt}^r), t_{RZF}) \quad (Z) \\
 \\
 \text{Nebenbedingungen:} \quad & t_{Takt}^r \leq \frac{A^r}{N^r} \quad (I) \\
 & t_{Takt}^r \leq t_{VI,min}^r \quad (II) \\
 & t_{Takt}^r \leq t_{BI,min}^r \quad (III) \\
 \\
 \text{Variablen (reel)} \quad & t_{Takt}^r
 \end{aligned} \tag{7-7}$$

Das integrierte Routenzugtakt-Problem nach Formel (7-7) enthält mit der Zielfunktion (Z) eine nichtlineare Funktion und mit t_{Takt}^r eine Variable aus einem nicht-diskreten Wertebereich. Konkret ergeben sich daraus folgende Problemstellungen:

1. Die nichtlineare Zielfunktion kann nicht mittels Standard-Solvern aufgelöst werden.
2. Die reelwertige Variable t_{Takt}^r kann nicht durch Enumeration bspw. mittels des Branch & Bound Verfahrens bestimmt werden.

Problemstellung 1 kann jedoch relativ einfach gelöst werden, da mittels der ILP-Darstellung des Routenzugfahrplan-Problems C_{RZF} optimal bestimmt und die Zielfunktion damit gelöst werden kann.

Um Problemstellung 2 zu lösen, muss die Taktzeit durch eine geeignete Vereinfachung auf einen diskreten Wertebereich beschränkt werden⁵⁸. Hierfür wird eine minimale Taktzeit $t_{Takt,min}$ definiert, deren Vielfache wiederum als mögliche Taktzeiten für die einzelnen Routen zur Verfügung stehen. Die minimale Taktzeit kann prinzipiell willkürlich definiert werden. Für eine einfache Nachvollziehbarkeit in der industriellen Anwendung bietet sich jedoch an, die minimale Taktzeit auf ganze fünf oder zehn Minuten

⁵⁸ Es scheint ohnehin unrealistisch, in einer Anwendung im industriellen Umfeld beliebige Taktzeiten zu erlauben, da diese dann auch sekundengenau gesteuert und eingehalten werden müssten.

festzulegen. Mit dieser Annahme lässt sich das integrierte Routenzugtakt-Problem auf folgende INLP-Darstellung vereinfachen:

$$\begin{aligned}
 \text{Zielfunktion:} \quad & \min C_{RZF}(R, i^r \cdot t_{Takt,min}, T_{ST}(i^r, \dots, i^r), \\
 & t_{Takt,min}, v^r(i^r \cdot t_{Takt,min}), \\
 & t_{UZ}^r(i^r \cdot t_{Takt,min}), t_{RZF}) \quad (Z) \\
 \\
 \text{Nebenbedingungen:} \quad & i^r \cdot t_{Takt,min} \leq \frac{A^r}{N^r} \quad \forall r \in R \quad (I) \\
 & i^r \cdot t_{Takt,min} \leq t_{VI,min}^r \quad \forall r \in R \quad (II) \\
 & i^r \cdot t_{Takt,min} \leq t_{BI,min}^r \quad \forall r \in R \quad (III) \\
 \\
 \text{Variable (integer)} \quad & i^r
 \end{aligned} \tag{7-8}$$

In der INLP-Darstellung des integrierten Routenzugfahrplan-Problems werden folgende Konstanten verwendet:

- R Gesamtzahl Routen
- A^r Transportangebot der Route r
- N^r Transportnachfrage auf Route r
- $t_{VI,min}^r$ Zulässiges Versorgungsintervall auf Route r
- $t_{BI,min}^r$ Zulässiges Bedarfserkennungsintervall auf Route r
- t_{RZF} Routenzugfolgezeit (entspr. minimal zulässiger Sicherheitsabstand)
- $t_{Takt,min}$ Minimal zulässige Taktzeit

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle auf die Auflistung sämtlicher Konstanten für die Umlaufzeitberechnung (bspw. Bausteine gemäß MTM-SVL) verzichtet. Diese können den Formeln (6-1), (6-2)⁵⁹ (6-9) (6-10) und (6-11)⁶⁰ entnommen werden.

Der Lösungsraum wird durch folgende Variable definiert:

- i^r Taktzeitmultiplikator für Route r

⁵⁹ Respektive Formel (6-3) bei Verwendung einer Durchschnittsgeschwindigkeit.

⁶⁰ Respektive Formel (6-12) falls die Leergutentladung durch den Routenzugfahrer selbst erfolgt.

Die Zielfunktion Z ist unverändert die Minimierung der notwendigen Ressourcenanzahl, welche sich aus der Lösung des Routenzugfahrplanproblems bei gegebenen Taktzeitmultiplikatoren ergibt. Deren zulässige Werte sind durch die Nebenbedingungen I - III begrenzt, welche im Einzelnen bedeuten:

- (I) Die Taktzeit einer Route r , also das Produkt aus Taktzeitmultiplikator i^r und minimal zulässiger Taktzeit $t_{Takt,min}$, ist nach oben begrenzt durch den Quotienten aus Transportangebot A^r und Transportnachfrage N^r auf dieser Route (siehe Formel (5-14))
- (II) Die Taktzeit einer Route r , also das Produkt aus Taktzeitmultiplikator i^r und minimal zulässiger Taktzeit $t_{Takt,min}$, ist nach oben begrenzt durch das zulässige Versorgungsintervall $t_{VI,min}^r$ (siehe Formel (5-15))
- (III) Die Taktzeit einer Route r , also das Produkt aus Taktzeitmultiplikator i^r und minimal zulässiger Taktzeit $t_{Takt,min}$, ist nach oben begrenzt durch das zulässige Bedarfserkennungsintervall $t_{BI,min}^r$ (siehe Formel (5-16))

7.2 Branch & Bound Lösungsverfahren

Im vorhergehenden Abschnitt wurde das integrierte Routenzugtakt-Problem als INLP formuliert. In diesem Abschnitt wird ein Branch & Bound Lösungsverfahren (vgl. Abschnitt 6.5.1) beschrieben, mittels dessen das Routenzugtaktproblem optimal gelöst werden kann.

Der Suchbaum Q wird darin durch Enumeration der Taktzeitmultiplikatoren $i^r \in \mathbb{N}^+$ definiert (Branching). Jedes Teilproblem $q \in Q$ im Suchbaum ist dadurch definiert, dass eine Anzahl s an Variablen $I^{gebunden} = \{i^1, \dots, i^s\}$ mit $s \in R$ gebunden, d. h. konstant, ist. Der Fahrplan für die Routen mit gebundenen Taktzeitmultiplikatoren sei λ' . Die verbleibende Anzahl freier Variablen $I^{frei} = \{i^1, \dots, i^t\}$ mit $t \in (R \setminus s)$ definiert die Freiheitsgrade für die sich aus q ergebenden Unterprobleme. Eine Instanz λ des Routenzugtakt-Problems ist vollständig bestimmt, wenn alle Taktzeitmultiplikatoren i^r gebunden sind. In diesem Fall ist das Ende des Suchbaums erreicht und $t = 0$. Die Reihenfolge, in der der Suchbaum durchlaufen wird, wird durch die Schranke $S(q)$ des Unterproblems q definiert (Bounding). Da es sich beim integrierten Routenzugtakt-Problem um ein Minimierungsproblem handelt, wird eine untere Schranke für die Ressourcenanzahl $US(q)$ benötigt. Hierfür wurde bereits in Abschnitt 6.5.3 eine untere Schranke für das Routenzugfahrplan-Problem hergeleitet, welche für die minimal notwendige

Ressourcenanzahl des integrierten Routenzugtakt-Problems natürlich ebenfalls Gültigkeit besitzt. Für diese Ressourcenanzahl C'_{RZT} bei einer Anzahl Routen $s \leq R$ mit gebundenen Taktzeitmultiplikatoren i^1, \dots, i^s gilt:

$$\alpha_{\lambda'} = \frac{\sum_{i \in I_{\text{gebunden}}} v^i \cdot t_{UZ}^i}{C'_{RZT} \cdot T_{ST}(i^1, \dots, i^s)} \leq 1 \quad (7-9)$$

Da C_{RZT} auf einen ganzzahligen Wertebereich begrenzt ist gilt für die untere Schranke $US(q)$:

$$US(q) = \min C'_{RZT} = \left\lceil \frac{\sum_{i \in I_{\text{gebunden}}} v^i \cdot t_{UZ}^i}{T_{ST}(i^1, \dots, i^s)} \right\rceil \quad (7-10)$$

Damit sind die Struktur der Unterprobleme sowie deren Schranken definiert. Zur Lösung des Routenzugtakt-Problems lässt sich der in Abbildung 7-1 dargestellte Branch & Bound Algorithmus ableiten. Zur Darstellung wird ein Programmablaufplan nach [DIN EN-66001] verwendet.

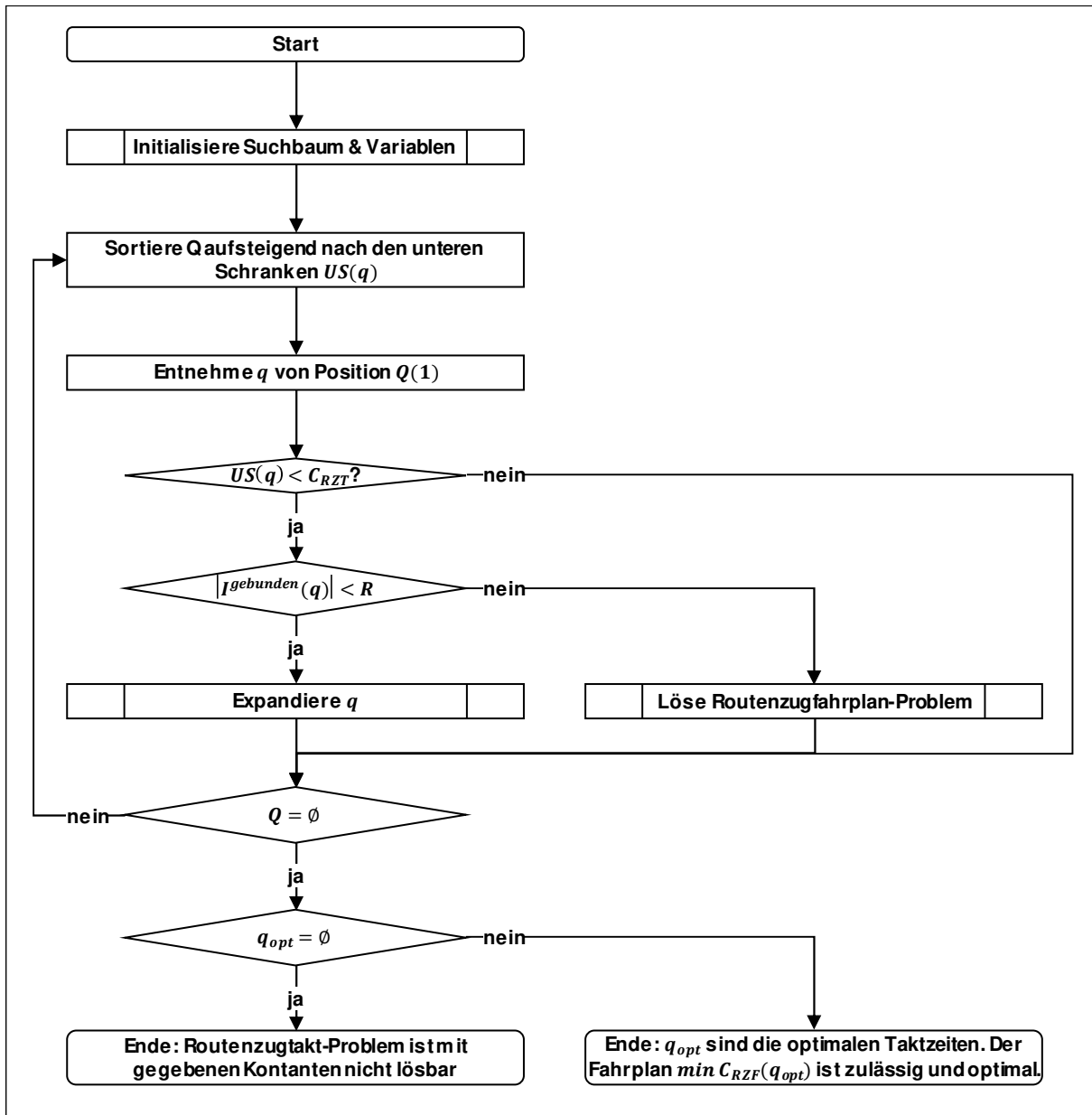


Abbildung 7-1: Programmablaufplan des Branch & Bound Algorithmus zur Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems (eigene Darstellung)

Zu Beginn werden der Suchbaum sowie die Variablen initialisiert. Der Suchbaum Q wird über eine s. g. Priority-Queue (dt. Prioritätswarteschlange) abgebildet. Dieser speichert alle formulierten Unterprobleme q inkl. deren unteren Schranken, welche weiter expandiert bzw. gelöst werden [Suh-2013, S. 146ff.]. Jedes Unterproblem q ist über die darin gebundenen Variablen $I^{gebunden}(q) = \{i^1, \dots, i^s\}^T$ mit $s \in R$ und der unteren Schranke $US(q)$ definiert. Die Reihenfolge, in welcher die Taktzeiten für die Routen gebunden werden, wird über die Transportnachfrage der Routen definiert. Die Route mit der höchsten Transportnachfrage wird als erstes expandiert, danach wird in absteigender Reihenfolge vorgegangen. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass die Routen mit hohen Transportnachfragen auch häufiger fahren und mehr Ressourcen

binden, also einen stärkeren Einfluss auf den Zielfunktionswert C_{RZT} haben. Daher werden diese zuerst expandiert. Zu Beginn der Suche ist noch keine Lösung bestimmt, weshalb C_{RZT} der Wert $+\infty$ zugewiesen wird. In der Variable q_{opt} wird das Unterproblem mit dem aktuell besten Optimum gespeichert. Zu Beginn der Suche ist q_{opt} leer. Der Pseudocode für das Unterprogramm „Initialisiere Suchbaum & Variablen“ lautet wie folgt:

program *Initialisiere Suchbaum & Variablen*

Initialisiere den Suchbaum Q bestehend aus den Tupeln q

Sortiere die Routen absteigend nach deren Transportnachfrage A^r (7-11)

Setze $C_{RZT} = +\infty$

Setze $q_{opt} = \emptyset$

Nach der Initialisierung erfolgt die eigentliche Branch & Bound Iteration: So lange noch nicht betrachtete Unterprobleme im Suchbaum vorhanden sind, wird dieser erneut durchlaufen. Zu Beginn einer neuen Branch & Bound Iteration wird zunächst der Suchbaum aufsteigend nach den unteren Schranken der bereits formulierten Unterprobleme sortiert. Dasjenige Unterproblem mit der geringsten unteren Schranke wird als nächstes betrachtet und dem Suchbaum entnommen. Wenn die Schranke des aktuellen Unterproblems größer oder gleich dem aktuell gefundenen Optimum ist, kann es keine bessere Lösung liefern. Daher wird es nicht weiter betrachtet und es wird mit der nächsten Branch & Bound Iteration fortgefahren, sofern der Suchbaum noch nicht betrachtete Unterprobleme enthält.

Ist die untere Schranke hingegen geringer wird das Unterproblem weiter betrachtet, da es potenziell eine bessere Lösung liefern kann. Hierzu ist zunächst zu unterscheiden, ob das Unterproblem bereits vollständig bestimmt ist, d. h. die Taktzeitmultiplikatoren aller Routen gebunden sind. Ist dies nicht der Fall, muss das Unterproblem weiter expandiert werden. Hierzu wird zunächst die nächste, noch nicht gebundene Route s mit der nächstkleineren Transportnachfrage ausgewählt. Für diese Route wird der Taktzeitmultiplikator i^s beginnend bei eins solange erhöht, bis eine der Nebenbedingungen aus der INLP-Darstellung des Routenzugtakt-Problems aus Formel (7-8) verletzt wird. Für jeden Taktzeitmultiplikator wird ein neues Unterproblem q' formuliert, welches die gebundenen Variablen von q und den neuen Taktzeitmultiplikator i^s enthält. Anschließend wird die untere Schranke $US(q')$ unter Nutzung von Formel (7-10) berechnet. Hierfür werden die Umlaufzeiten für die gebundenen Routen sowie der Systemtakt benötigt. Da die Taktzeiten der Routen gebunden sind, können die Umlaufzeiten gemäß Formel (7-3) und der Systemtakt gemäß Formel (7-1) bestimmt werden. Wenn das neue Unterproblem eine bessere Lösung liefern kann ($US(q') < C_{RZT}$), wird

es dem Suchbaum hinzugefügt. Anschließend erfolgt die nächste Branch & Bound Iteration, sofern der Suchbaum noch nicht betrachtete Unterprobleme enthält. Der Pseudocode für das Unterprogramm „Expandiere q “ lautet wie folgt:

program *Expandiere q*

Setze s als die nächste in q nicht gebundene Route

Setze $i^s = 1$

while (*alle Nebenbedingungen für $r = s$ und $i^r = i^s$ erfüllt*)

Setze $I_{gebunden}(q') = I_{gebunden}(q) \cup i^s$ (7-12)

Setze $US(q') = \left\lceil \frac{\sum_{i \in I_{gebunden}} v^i \cdot t_{UZ}^i}{T_{ST}(i^1, \dots, i^i)} \right\rceil$

if ($US(q') < C_{RZT}$) **then**

füge q' und $US(q')$ dem Suchbaum hinzu

Setze $i^s = i^s + 1$

Ist das aktuelle Unterproblem hingegen vollständig bestimmt ist die Wurzel des Suchbaums erreicht. In diesem Fall wird es nicht weiter expandiert, sondern direkt gelöst. Hierzu werden zunächst die Konstanten für das Routenzugfahrplan-Problem gemäß Formeln (7-1), (7-2) und (7-3) bestimmt. Anschließend wird das Routenzugfahrplan-Problem mit den aktuellen Konstanten gelöst. Sofern eine gültige Lösung gefunden wurde, d. h. die Routenzugfolgezeiten eingehalten werden können, und die Ressourcenanzahl kleiner als das aktuell gefundene Optimum ist, wird die Lösung als aktuell bestes Optimum übernommen. Es folgt die nächste Branch & Bound Iteration, sofern der Suchbaum noch nicht betrachtete Unterprobleme enthält. Der Pseudocode für das Unterprogramm „Löse Routenzugfahrplan-Problem“ lautet wie folgt:

program *Löse Routenzugfahrplan-Problem*

Berechne die Konstanten für das Routenzugfahrplan-Problem

Löse das Routenzugfahrplan-Problem und setze $C'_{RZT} = C_{RZF}$ (7-13)

if ($C'_{RZT} > 0$ **and** $C'_{RZT} < C_{RZT}$) **then**

Setze $C_{RZT} = C'_{RZT}$

Setze $q_{opt} = q$

Ist der Suchbaum nach Entnahme des aktuellen Unterproblems leer, d. h. es konnte entweder nicht weiter expandiert werden oder es war das letzte noch nicht betrachtete Unterproblem, ist die Branch & Bound Iteration beendet. Ist q_{opt} nach wie vor leer, konnte unter den gegebenen Konstanten keine zulässige Lösung bestimmt werden.

Andernfalls ist die Lösung des Routenzugfahrplan-Problems für q_{opt} die optimale Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems. Damit sind die Taktzeiten der Routen sowie Abfahrtszeiten der Touren bestimmt und die eingangs formulierte Planungsaufgabe gelöst.

Das entwickelte Branch & Bound Lösungsverfahren wird im darauffolgenden Abschnitt anhand einer Testinstanz genauer beschrieben.

7.3 Testinstanz

Dieser Abschnitt dient der weiteren Erläuterung des Lösungsverfahrens des integrierten Routenzugtakt-Problems mittels Branch & Bound. Zugleich soll der Nachweis erbracht werden, dass das integrierte Routenzugtakt-Problem mit der gewählten Implementierung in akzeptabler Laufzeit optimal gelöst werden kann.

Bereits im vorhergehenden Abschnitt wurde argumentiert, dass das integrierte Routenzugtaktproblem aufgrund der nichtlinearen Zielfunktion nicht mit Standard-Solvern gelöst werden kann, wie diese beispielsweise in der Software CPLEX implementiert sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das Branch & Bound Lösungsverfahren in der Programmiersprache C# unter Nutzung von Microsoft Visual Studio implementiert. Das Routenzugfahrplan-Problem ist unverändert in CPLEX implementiert und wird durch dessen Solver gelöst. Für die Kommunikation zwischen C# und CPLEX wird die s.g. ILOG Concert Technology verwendet. Diese stellt eine Reihe von Modellierungsobjekten zur Verfügung, die gemeinsam von objektorientierten Programmiersprachen, IBM CPLEX Optimizer und IBM CPLEX CP Optimizer verwendet werden. Die Concert-Technologie ist speziell darauf ausgelegt, angepasste Optimierungsalgorithmen zu entwerfen und die erstellten Modelle und Algorithmen in eine Anwendung einzubetten.

Als Testinstanz wird im Rahmen dieses Abschnitts wiederum das Beispiel aus Abbildung 6-8 verwendet. Allerdings sind die Taktzeiten der Routen gemäß der erweiterten Planungsaufgabe des integrierten Routenzugtakt-Problems nicht bekannt. Vielmehr werden, gemäß der übergeordneten Planungsaufgabe, die Transportvolumina je Route vorgegeben. Es wird davon ausgegangen, dass auf Route $R1$ 16 Ladepositionen pro Stunde gleichverteilt über vier Haltestellen und auf den Routen $R2$ und $R3$ jeweils acht Ladepositionen pro Stunde, ebenfalls gleichverteilt über vier Haltestellen, bereitgestellt werden müssen. Jede Ladeposition entspricht einer Transporteinheit und pro Tour können vier Transporteinheiten transportiert werden⁶¹. Auf Route $R1$ müssen

⁶¹ Dies entspricht einem in der Praxis häufigen Anwendungsfall für den Transport von Großladungsträgern mit Routenzügen bestehend aus einer Zugmaschine und 4 GLT-Anhängern [Gün-2012].

damit mindestens vier Touren pro Stunde und auf Routen $R2$ und $R3$ mindestens zwei Touren pro Stunde durchgeführt werden, um die Transportnachfrage zu decken. Damit ergibt sich direkt die Lösung aus Abbildung 6-8. Im Folgenden wird die systematische Ermittlung der Takt- und Abfahrtszeiten mittels des Branch & Bound Algorithmus zur Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems beschrieben. Alle Eingangsdaten hierfür sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 7-1: Eingangsdaten für die Testinstanz des integrierten Routenzugtakt-Problems

Wert	Einheit	Beschreibung
$R = 3$	[1]	Anzahl an Routen
$A^r = 4 = \text{const.}$	$\left[\frac{\text{Ladepositionen}}{\text{Tour}} \right]$	Transportangebot der Routen
$\vec{N}_h^1 = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix}$	$\left[\frac{\text{Ladepositionen}}{\text{Stunde}} \right]$	Transportnachfrage der Haltestellen auf Route 1
$\vec{N}_h^2 = \vec{N}_h^3 = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$	$\left[\frac{\text{Ladepositionen}}{\text{Stunde}} \right]$	Transportnachfrage der Haltestellen auf Route 2 und 3
$t_{VI,min}^r = t_{BI,min}^r = \infty$	[Minuten]	Zulässiges Versorgungs- und Bedarfserkennungsintervalle werden nicht berücksichtigt
$t_{RZF} = 2,5$	[Minuten]	Routenzugfolgezeit im Routenzugbahnhof
$t_{Takt,min} = 5$	[Minuten]	Minimal zulässige Taktzeit
$t_{BZ}^r = 2,5 = \text{const.}$	[Minuten]	Beladezeit im Routenzugbahnhof
$\vec{t}_{FZ}^r = \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \\ 5 \end{pmatrix}$	[Minuten]	Fahrzeit der Routenzüge auf den Routen
$t_{Halten} = 0,25$	[Minuten]	Dauer eines Haltevorgangs
$t_{Tausch} = 0,5$	[Minuten]	Dauer eines Ladungsträgertauschs
$t_{EZ}^r = 2 = \text{const.}$	[Minuten]	Entladezeit im Routenzugbahnhof
$t_{SO}^r = 0 = \text{const.}$	[Minuten]	Zeiten für sonstige Tätigkeiten werden nicht berücksichtigt

Innerhalb der ersten Branch & Bound Iteration werden die ersten Unterprobleme formuliert. Da Route $R1$ die höchste Transportnachfrage besitzt, werden zunächst deren Taktzeiten Route gebunden. Mit einer minimalen Taktzeit i. H. v. fünf Minuten ergeben sich 3 mögliche Taktzeiten für Route $R1$: 5, 10 und 15 Minuten. Bei einer Taktzeit i. H. v. 20 Minuten könnten nur noch 12 Ladeeinheiten pro Stunde transportiert werden, wodurch die Transportnachfrage nicht mehr gedeckt werden könnte. Somit wird Nebenbedingung (I) des Routenzugfahrplanproblems nicht mehr erfüllt und der Branch & Bound Algorithmus formuliert keine neuen Unterprobleme. Bei einer Taktzeit i. H. v. 5 Minuten werden pro Tour im zeitlichen Mittel 1,3 Ladeeinheiten transportiert. Pro

Haltestelle ergibt sich eine Haltewahrscheinlichkeit i. H. v. 33 % und in Summe über alle Haltestellen resultieren 1,3 Haltevorgänge (vgl. Abschnitt 6.1). Somit ergeben sich die Umlaufzeit für Route $R1$ und untere Schranke für das resultierende Unterproblem wie folgt:

$$t_{UZ}^{R1}(t_{Takt}^{R1} = 5 \text{ min}) = t_{BZ}^{R1} + t_{FZ}^{R1} + 1,3 \cdot t_{Halten} + 1,3 \cdot t_{Tausch} + t_{EZ}^r + t_{SO}^r = 15,5 \text{ min}$$

$$US(q_1) = \left\lceil \frac{15,5 \text{ min}}{5 \text{ min}} \right\rceil = 4$$

Analog werden die Umlaufzeiten und unteren Schranken für die Unterprobleme mit $t_{Takt}^{R1} = 10 \text{ min}$ und $t_{Takt}^{R1} = 15 \text{ min}$ berechnet. Abbildung 7-2 zeigt den Suchbaum sowie die unteren Schranken der formulierten Unterprobleme nach Abschluss der ersten Branch & Bound Iteration. Für eine bessere Übersicht werden im Folgenden die Einheiten vernachlässigt. Alle Taktzeiten sind in Minuten dargestellt, die unteren Schranken sind einheitenlos.

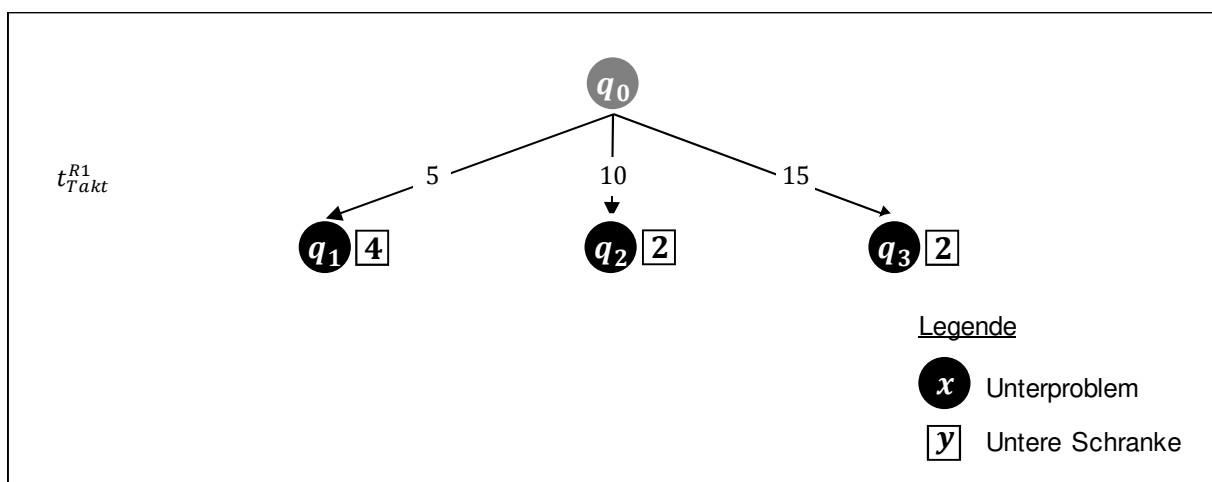


Abbildung 7-2: Lösungsbaum der Testinstanz nach Abschluss der ersten Branch & Bound Iteration (eigene Darstellung)

Zu Beginn der zweiten Branch & Bound Iteration wird zunächst entschieden, welches Unterproblem als nächstes betrachtet wird. Da sowohl q_1 als auch q_2 eine untere Schranke i. H. v. 2 besitzen⁶², q_2 allerdings früher dem Suchbaum hinzugefügt wurde, wählt der Branch & Bound Algorithmus als nächstes q_2 aus. In q_2 ist lediglich die Taktzeit einer von drei Routen gebunden. Dementsprechend ist es noch nicht vollständig bestimmt und muss weiter expandiert werden. $R2$ besitzt die nächstkleinere Transportnachfrage⁶³, weshalb als nächstes neue Unterprobleme mit gebundenen Taktzeiten

62 Bei einer Taktzeit i. H. v. 10 Minuten ergibt sich eine Umlaufzeit 16,5 Minuten, bei einer Taktzeit i. H. v. 15 Minuten beträgt die Umlaufzeit 17,5 Minuten. Für beide Varianten werden zwei Ressourcen benötigt.

63 Zwar besitzt Route $R3$ zwar die gleiche Transportnachfrage, ist in alphabetischer Reihenfolge aber $R2$ nachgelagert.

für Route $R1$ und $R2$ formuliert werden. Für Route $R2$ kommen Taktzeiten zwischen 5 und 30 Minuten, jeweils in 5 Minuten Schritten, in Frage. Dementsprechend werden sechs neue Unterprobleme formuliert und die jeweiligen Umlaufzeiten berechnet. Die unteren Schranken dieser Unterprobleme berücksichtigen jetzt Ressourcen zur Durchführung der Touren auf Routen $R1$ und $R2$. Der Suchbaum hat nach Abschluss der zweiten Branch & Bound Iteration folgenden Inhalt⁶⁴:

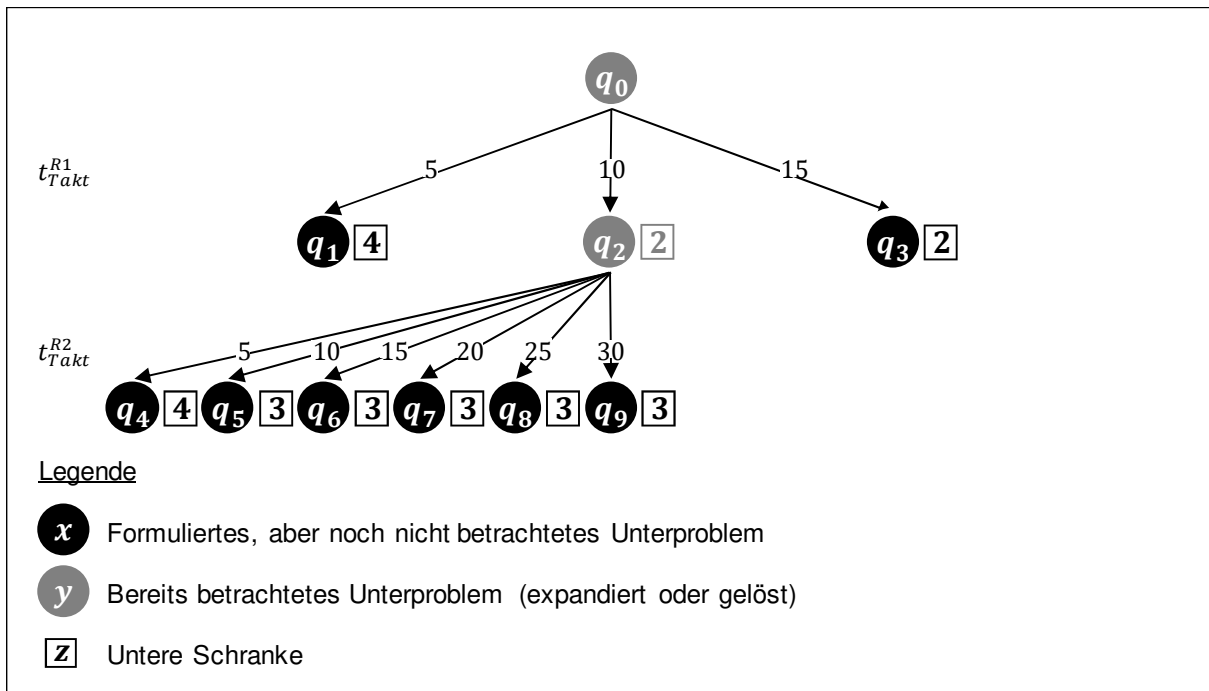


Abbildung 7-3: Lösungsbaum der Testinstanz nach Abschluss der zweiten Branch & Bound Iteration (eigene Darstellung)

Während der zweiten Branch & Bound Iteration wurden nur Unterprobleme mit einer unteren Schranke größer oder gleich drei formuliert. Deshalb wird in der dritten Branch & Bound Iteration q_3 ausgewählt, welches bereits in der ersten Branch & Bound Iteration formuliert wurde. Für dieses Unterproblem werden wiederum die Taktzeiten für Route $R2$ enumeriert und neue Unterprobleme formuliert. Hieraus ergeben sich sechs neue Unterprobleme (vgl. Abbildung 7-4), von denen vier Unterprobleme (q_{12} - q_{15}) eine untere Schranke von 2 besitzen. Diese vier Unterprobleme werden während der vierten bis siebten Branch & Bound Iteration weiter in der Reihenfolge expandiert, in derer das jeweilige Unterproblem formuliert wurde. Nach Abschluss der siebten Branch & Bound Iteration besteht der Lösungsbaum aus 33 Unterproblemen. Insgesamt wurden bis dahin 39 Probleme formuliert, von denen sechs Unterprobleme in den Branch &

⁶⁴ In der in C# implementierten Repräsentation des Suchbaums als Priority-Queue (vgl. Abschnitt 7.2) ist q_2 nach Abschluss der zweiten Branch & Bound Iteration nicht mehr enthalten, da es bereits betrachtet wurde. Die in q_2 gebundenen Variablen werden in die abgeleiteten Unterprobleme übernommen. Für eine bessere Übersicht wird q_2 in der Baumstruktur aber weiterhin dargestellt, da ansonsten alle gebundenen Variablen in jedem Unterproblem und nicht mehr an den Verzweigungen des übergeordneten Problems dargestellt werden müssten.

Bound Iterationen expandiert wurden. Der Suchbaum nach Abschluss der siebten Branch & Bound Iteration ist in folgender Grafik dargestellt:

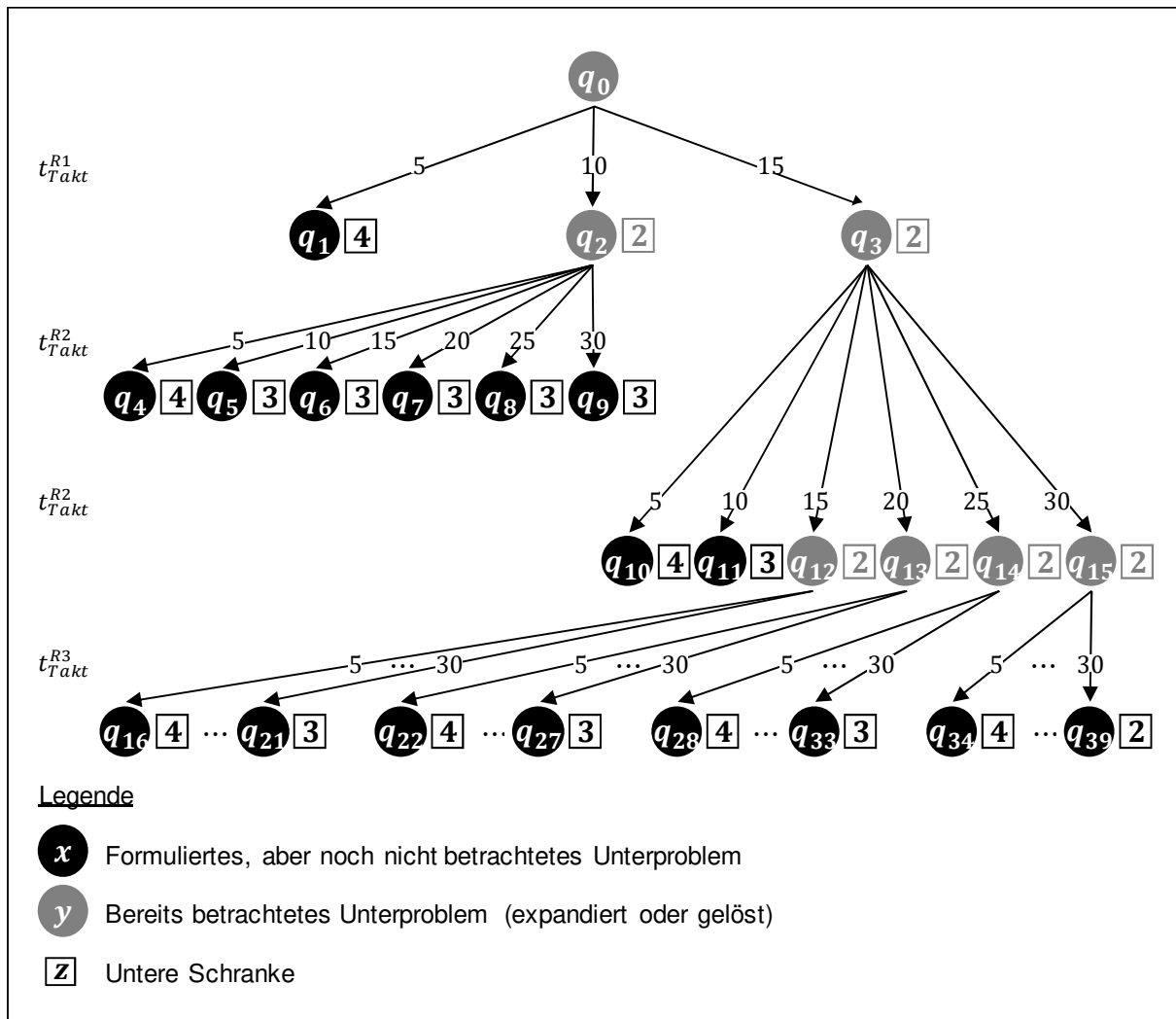


Abbildung 7-4: Lösungsbaum der Testinstanz nach Abschluss der siebten Branch & Bound Iteration (eigene Darstellung)

In der achten Branch & Bound Iteration wird das Unterproblem q_{39} mit der kleinsten unteren Schranke i. H. v. zwei ausgewählt. Da hierin alle Variablen gebunden sind, also die Wurzel des Suchbaums erreicht ist, kann das Routenzugfahrplan-Problem gelöst werden. Hierfür werden gemäß Unterprogram (7-13) zunächst die Konstanten für das Routenzugfahrplan-Problem bestimmt und über die Concert-Schnittstelle an das CPLEX-Optimierungsmodell übergeben. Die Lösung entspricht dabei der bereits in Abschnitt 6.5.3 beschriebenen Testinstanz I mit einer Gesamtzahl benötigter Ressourcen i. H. v. zwei, d. h. der Zielfunktionswert nimmt den Wert der unteren Schranke an. Somit wird der aktuell beste Zielfunktionswert C_{RZT} auf zwei gesetzt. Da alle anderen formulierten Unterprobleme nur eine untere Schranke größer oder gleich zwei besitzen, werden diese Unterprobleme dem Suchbaum in den folgenden Branch & Bound

Iterationen entnommen, ohne dass diese weiter betrachtet werden müssen. Der Branch & Bound Algorithmus endet nach Iteration 41 mit der optimalen Lösung $\min C_{RRF}(q_{39}) = 2$. Um dieses Optimum zu erzielen sind folgende Takt- und Abfahrtszeiten zu wählen:

$$\vec{t}_{Takt} = \begin{pmatrix} 15 \\ 30 \\ 30 \end{pmatrix} \min \qquad \vec{t}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2,5 \\ 17,5 \end{pmatrix} \min$$

Bereits in diesem, vergleichsweise einfachen Beispiel zeigt sich die Vorteilhaftigkeit der impliziten Enumeration mittels Branch & Bound gegenüber einer vollständigen Enumeration: Für die Testinstanz ergeben sich 108 unterschiedliche Taktzeitkonfiguration, drei für Route *R1* und jeweils sechs für Route *R2* und *R3*. Bei einer vollständigen Enumeration müsste für jede dieser Konfigurationen das Routenzugfahrplanproblem gelöst werden. Der Branch & Bound Algorithmus hingegen formuliert lediglich 41 unterschiedliche Taktzeitkonfigurationen, bevor das Optimum gefunden und nachgewiesen ist. Der Lösungsraum des Branch & Bound Algorithmus ist im Beispiel somit nur ca. 1/3 so groß wie der Lösungsraum bei vollständiger Enumeration. Das rechenzeitintensive Routenzugfahrplan-Problem muss im Beispiel sogar nur ein einziges Mal gelöst werden. Dies lässt sich auch quantitativ belegen: Die Lösung des Routenzugfahrplan-Problems mittels CPLEX benötigt für die verwendete Testinstanz gemäß Abbildung 6-15 durchschnittlich 5 Millisekunden pro Lauf, bei 108 möglichen Kombinationen bei vollständiger Enumeration in Summe also ca. 540 Millisekunden. Der in C# implementierte Branch & Bound Algorithmus benötigt hingegen zur Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems durchschnittlich 104 Millisekunden pro Lauf⁶⁵, also nur ca. 19 % der Rechenzeit bezogen auf die vollständige Enumeration.

Der zuvor genannte, absolute Unterschied zwischen den Rechenzeiten bei vollständiger Enumeration und Branch & Bound mag an dieser Stelle noch nicht signifikant erscheinen: 540 Millisekunden Rechenzeit bei vollständiger Enumeration wären für einen potenziellen Anwender sicherlich hinnehmbar. Allerdings ist die Anzahl an Routen bei realen Anwendungen deutlich größer im Vergleich zu der vergleichsweise kleinen Testinstanz mit lediglich drei Routen. Gleichermaßen wächst die Größe des zu betrachtenden Lösungsraums sowohl für das integrierte Routenzugtakt-Problem als auch das Fahrplanproblem mit der Anzahl an Routen (siehe hierzu Eigenschaften ganzzahliger Optimierungsprobleme in Abschnitt 6.5.1). Dadurch ist eine überproportionale Steigerung der Rechenzeit zur Lösung des Fahrplanproblems und des inte-

⁶⁵ Es wurden wiederum 30 Läufe mit gleichen Eingangsdaten unter Nutzung identischer Hard- und Software durchgeführt (vgl. Anhang A).

grierten Routenzugtakt-Problems zu erwarten. Dieser Sachverhalt wird im nachfolgenden Kapitel anhand zweier beispielhafter Anwendungen des entwickelten Ansatzes zur operativen Routenzugplanung in der Automobilindustrie näher betrachtet.

8 Experimentelle Evaluation am Beispiel der Automobilindustrie

In den vorhergehenden Kapiteln konnten die Teilfragen eins bis fünf (vgl. Abschnitt 3.4) positiv beantwortet werden. Zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage ist noch eine letzte Teilfrage offen, derer sich dieses Kapitel widmet:

Wie kann der entwickelte Planungsansatz sowie dessen Ergebnisse evaluiert und verallgemeinert werden?

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter Evaluation „die systematische Untersuchung des Nutzens oder Wertes eines Gegenstandes [verstanden.] Solche Evaluationsgegenstände können z. B. Programme, Projekte, Produkte, Maßnahmen, Leistungen, Organisationen, Politik, Technologien oder Forschung sein.“ [DeGEval-2002, S. 15]⁶⁶. Eine Evaluation der Forschungsergebnisse ist u. a. notwendig, da während der Modellerstellung vereinfachende Annahmen getroffen und reale Sachverhalte abstrahiert wurden. Zudem werden durch die Anwendung der Forschungsergebnisse in der betrieblichen Praxis neue Situationen geschaffen, über deren Auswirkungen bisher nur Annahmen getroffen werden können [Ble-2009, S. 182]. Nach *Blessing und Chakrabarti* beinhaltet eine methodische Evaluation von Forschungsergebnissen gemäß obiger Definition drei Teilschritte, in denen jeweils die folgenden Kernfragen beantwortet werden sollen [Ble-2009, S. 184ff.]:

1. Support Evaluation (dt. *Evaluation der Funktionalität*)

Wurden die abzubildenden Sachverhalte korrekt in ein formales Modell überführt und liefert dieses Ergebnisse, welche im Rahmen der weiteren Teilschritte evaluiert werden können⁶⁷?

2. Application Evaluation (dt. *Evaluation der Anwendbarkeit*)

Sind das Modell sowie dessen Ergebnisse auf reale Szenarien anwendbar und werden die Zielgrößen wie erwartet beeinflusst⁶⁸?

3. Success Evaluation (dt. *Evaluation des Erfolgs*)

Führt die Anwendung der Forschungsergebnisse zu einer Verbesserung der tatsächlichen Situation im realen Einsatz?

66 In Wissenschaft und Praxis werde die Begriffe „Evaluation“ und „Validierung“ teilweise synonymisch verwendet (siehe hierzu u. a. [VDI-3633b; Fre-2006]).

67 Im vorliegenden Fall sollte das integrierte Routenzugtakt-Problem also für eine gegebene Transportnachfrage und Routenkonfiguration einen Fahrplan und die dafür notwendige Ressourcenanzahl ermitteln.

68 Beispielsweise ist zu erwarten, dass bei gleicher Routenkonfiguration eine Reduzierung der Transportnachfrage zu einer geringeren Ressourcenanzahl führt.

Der Teilschritt „Support Evaluation“ wurde dabei bereits im Rahmen der Modellerstellung anhand von Testinstanzen umfangreich beschrieben (siehe hierzu Abschnitt 6.5.3 und 7.3). In diesem Kapitel sollen nun auch die beiden folgenden Teilschritte behandelt werden. Um die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse nachzuweisen („Application Evaluation“), wurde der entwickelte Ansatz zur operativen Routenzugplanung auf zwei Routenzugsysteme in der Automobilindustrie im BMW Montagewerk Dingolfing angewendet. Durch Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems werden für beide Anwendungsfälle optimale Fahrpläne präsentiert und mit Szenarien verglichen, welches sich ohne Anwendung der Forschungsergebnisse ergeben würden („Success Evaluation“). Hierzu sei zunächst angemerkt, dass auch für diese Szenarien ein Verfahren bekannt sein muss, mit welchem die Takt- und Umlaufzeiten der Routen festgelegt werden können. Die Taktzeiten der Routen bestimmen das zur Verfügung stehende Transportangebot, welches wiederum die Versorgungssicherheit direkt beeinflusst. Die (geplanten) Umlaufzeiten definieren darüber hinaus die Anzahl benötigter Ressourcen, welche entsprechend einzuplanen und vorzuhalten sind. Da keines der bekannten Verfahren alle übergeordneten Anforderungen unterstützt (siehe Abschnitt 3.3) wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die in Kapitel 5 (Taktzeitberechnung) sowie die in Abschnitt 6.1 (Umlaufzeitberechnung) hergeleiteten Zusammenhänge bekannt sind. Unter deren Nutzung können die Taktzeiten t'_{Takt} und Umlaufzeiten t'_{UZ} aller Routen derart bestimmt werden, dass die Routenzugkapazität maximal ausgenutzt wird. Diese analytischen Formeln können generell auch ohne das entwickelte Modell zur integrierten Takt- und Fahrplanplanung angewendet werden. Dieses Szenario, im Folgenden „Maximale Kapazitätsauslastung“ bezeichnet, ist gekennzeichnet durch:

- Die Anzahl an Routen, deren Verlauf und die sich daraus ergebenden Behälterdurchsätze bleiben unverändert (vgl. übergeordnete Anforderungen aus Abschnitt 3.2).
- Eine Route wird nur genauso häufig bedient, wie durch die Transportnachfrage bzw. die Versorgungs- oder Bedarfserkennungsintervalle vorgegeben ist. Das heißt, dass die Route im Optimalfall mit der auslastungsoptimalen Taktzeit bedient wird. Sollte das Versorgungs- oder Bedarfserkennungsintervall eine niedrigere Taktzeit fordern, wird diese für die jeweilige Route gewählt.
- Mit den dadurch bestimmten Taktzeiten ergeben sich die Umlaufzeiten der Routen gemäß der Formeln (6-1), (6-2)⁶⁹ (6-9) (6-10) und (6-11)⁷⁰.

Zur Einordnung dieser Einsatzfälle wird in Abschnitt 8.1 zunächst die Struktur der zu versorgenden Bereiche beschrieben. In den darauffolgenden Abschnitten 8.2 und 8.3

69 Respektive Formel (6-3) bei Verwendung einer Durchschnittsgeschwindigkeit.

70 Respektive Formel (6-12) falls die Leergutentladung durch den Routenzugfahrer selbst erfolgt. In diesem Fall gilt $t_{EZ} = f(t'_{Takt})$.

wird der entwickelte Ansatz zur operativen Routenzugplanung auf zwei Routenzugsysteme angewendet und gemäß der zuvor beschriebenen Systematik evaluiert. Die hier beschriebenen Anwendungsfälle und Ergebnisse wurden bereits teilweise in [Sta-2015] und [Dew-2014] durch den Autor bzw. dessen Mitwirkung veröffentlicht. Dieses Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Evaluierungsergebnisse.

8.1 Ausgangssituation im BMW Montagewerk Dingolfing

Im Montagewerk Dingolfing der BMW Group werden Fahrzeuge nach dem Prinzip einer getakteten Variantenfließproduktion endmontiert. Dies erfolgt auf mehreren Produktionslinien. Der Standort Dingolfing gehört zu den größten Produktionsstandorten der BMW Group. Dementsprechend groß sind auch die zu versorgenden Bereiche und die resultierenden Routenzugsysteme. In Abbildung 8-1 ist eine Übersicht der Fahrzeugmontage dargestellt.

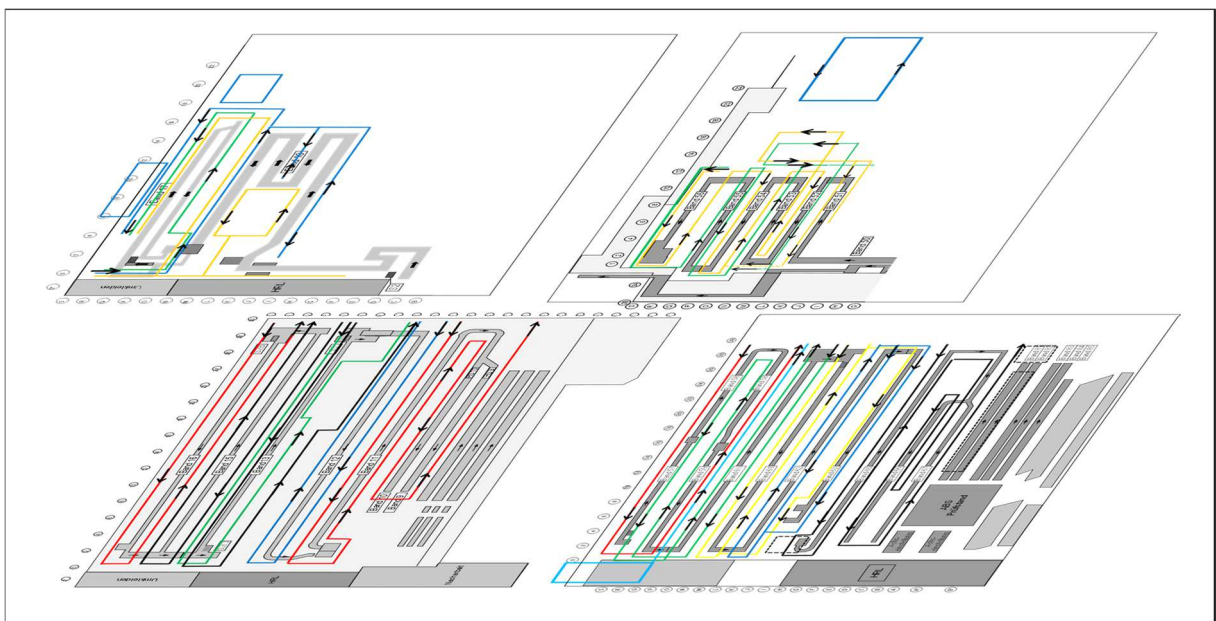


Abbildung 8-1: Layout der Fahrzeugmontage im BMW Werk Dingolfing [BMW-2015]

Die Fahrzeugmontage erfolgt in 2 unterschiedlichen Werkshallen, wobei in jeder Halle unterschiedliche Fahrzeugvarianten produziert werden. In jeder Halle werden die Karosserien und weitere Baugruppen zunächst einem oberen Stockwerk vormontiert und dann in das darunterliegende Stockwerk gefördert, wo die Endmontage erfolgt. Die Versorgung der Produktion erfolgt aus zentralen logistischen Strukturelementen, welche Quellen für die in Abschnitt 8.2 und 8.3 beschriebenen Routenzugsysteme sind.

bereits in Abschnitt 1.2 genannten Vorteile hat sich die BMW Group dazu entschlossen, die innerbetriebliche Produktionsversorgung zukünftig ausschließlich über innerbetriebliche Routenverkehre zu realisieren. An den PVB werden unterschiedliche Materialien benötigt, welche in Abhängigkeit der Größe und des Gewichts des Materials in unterschiedlichen Bereitstelleinheiten bereitgestellt werden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Weiterhin beeinflusst die Anzahl an Varianten eines Materials sowie die Gesamtzahl unterschiedlicher Materialien, welche an einem PVB bereitgestellt werden muss, dessen Bereitstellart. Hier wird zwischen sortenreiner, sequenzierter sowie kommissionierter Bereitstellung unterschieden. Bei einer sortenreinen Bereitstellung werden unterschiedliche Materialien auch in unterschiedlichen Bereitstelleinheiten angedient. In einer Bereitstelleinheit befinden sich nur Teile desselben Materials. Typischerweise werden schnelldrehende Teile mit geringer Variantenvielfalt sortenrein bereitgestellt. Bei einer kommissionierten Bereitstellung werden unterschiedliche Materialien für dasselbe Produkt im Vorfeld in eine Bereitstelleinheit kommissioniert und angedient. Es besteht eine 1:1-Zuordnung zwischen Bereitstelleinheit und Produkt. Im Automobilumfeld werden bspw. die unterschiedlichen Zierleisten im Fahrzeuginneren gemäß dem Kundenwunsch in Bezug auf Farbe, Schriftzug etc. kommissioniert bereitgestellt. Im Unterschied dazu sind bei einer sequenzierten Bereitstellart Materialien (i. d. R. aus der gleichen Teilefamilie) für unterschiedliche Produkte in einer Bereitstelleinheit in der geforderten Verbaureihenfolge angeordnet. Hier besteht eine 1:n-Zuordnung zwischen Bereitstelleinheit und Produkt [Sch-2008a, S. 128f.].

Der entwickelte Ansatz zur operativen Routenzugplanung soll allgemeingültig anwendbar sein. Deshalb werden für die Evaluation Anwendungsfälle herangezogen, in denen sowohl unterschiedliche Bereitstelleinheiten als auch Bereitstellarten verwendet werden. Prinzipiell wäre es denkbar, den Ansatz mittels eines Anwendungsfalls zu evaluieren, welche alle zuvor genannten Ausprägungen beinhaltet. Allerdings verlangen unterschiedliche Bereitstelleinheiten auch unterschiedliche, vorgelagerte Prozesse und Routenzugtechniken. So werden KLT in manuellen Supermärkten oder automatischen Kleinteilelagern gelagert, während GLT in Block-, Fachboden- oder automatischen Hochregallagern gelagert werden. Deshalb werden diese i.d.R. auch über unterschiedlichen Routenzugsysteme bereitgestellt [Gün-2012, S. 41ff.].

Im BMW Montagewerk Dingolfing wurden hierfür zwei Routenzugsysteme umgesetzt, deren Planung im Rahmen einer Forschungs Kooperation vom Autor begleitet wurden. Beim ersten Anwendungsfall handelt es sich um ein Routenzugsystem zur Montageversorgung von sortenreinen KLT, welche in einem automatischen Kleinteilelager gelagert und in einem Routenzugbahnhof automatisch auf Routenzüge verladen werden (vgl. Abschnitt 8.2). Der zweite Anwendungsfall behandelt ein Routenzugsystem zur Versorgung von GLT mit sequenziertem Material, welche in einem manuellen Lager

kommissioniert werden. Die Beladung der Routenzüge erfolgt manuell in einem Routenzugbahnhof (vgl. Abschnitt 8.3). Beide Anwendungsfälle sind im Folgenden genauer erläutert. Für eine komprimierte Darstellung sei auf Anhang B verwiesen, in dem die Anwendungsfälle anhand der in Abschnitt 2.2 erarbeiteten Routenzugsystem-Morphologie eingeordnet sind.

8.2 Anwendungsfall I: Bereitstellung von Kleinladungsträgern mit sortenreinem Material

Der erste Anwendungsfall betrachtet die sortenreine Bereitstellung von KLT in der Produktion. Auf einer Tour werden unterschiedliche PVB mit jeweils unterschiedlichen Materialien versorgt. Um Verwechslungen bei der Bereitstellung auszuschließen und Suchaufwände für den Routenzugfahrer zu minimieren, wird der Routenzug bereits in derjenigen Reihenfolge beladen, in welche das Material später ausgeliefert wird. Die Routenzüge selbst bestehen aus einem Schleppfahrzeug mit vier Anhängern in Plattformwagen-Bauweise. Um die Transportkapazität des Routenzugs zu erhöhen, werden Etagengestelle verwendet als Ladehilfsmittel, in denen die KLT einsortiert werden (vgl. Abbildung 8-3).

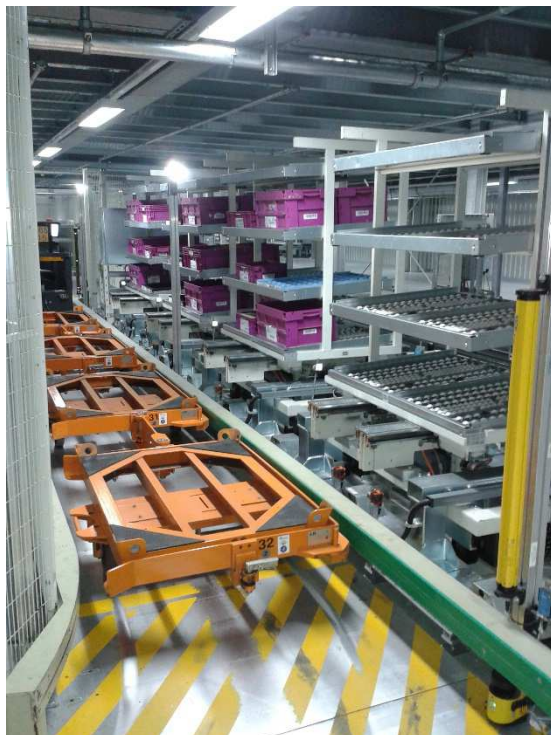


Abbildung 8-3: Routenzugbeladung im BMW Montagewerk Dingolfing [Dew-2015]

Jedes Etagengestell besteht aus drei Ebenen mit jeweils zwei Kanälen pro Ebene. In jedem Kanal können KLT bis zu einer maximalen Tiefe von 800 mm hintereinander

gereiht werden, was eine 1-dimensionalen Anordnung entspricht. Da ausschließlich VDA-KLT (vgl. Abschnitt 5.1) eingesetzt werden, ergibt sich mit dem gemeinsamen Längenraster gemäß Tabelle 5-1 eine Anzahl Ladepositionen pro Kanal i. H. v. acht (entspr. vier KLT mit der Grundfläche von 300 mm x 200 mm hintereinander). Pro Routenzug stehen somit 192 Ladepositionen zur Verfügung. Die Beladung der Etagengestelle erfolgt vollautomatisch mittels eines automatischen Materialflusssystems, welches im Folgenden beschrieben wird. Der Ablauf ist in Abbildung 8-4 schematisch dargestellt.

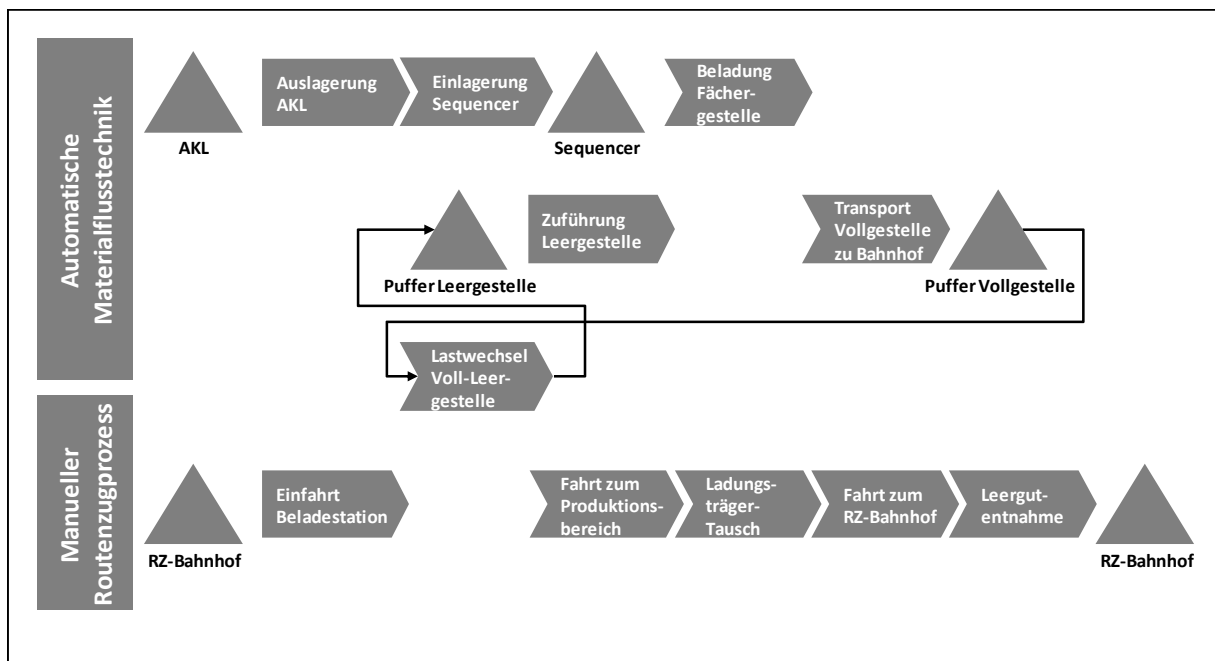


Abbildung 8-4: Schematische Darstellung der Teilprozesse zur KLT-Versorgung (eigene Darstellung)

Die Lagerung der KLT erfolgt zentral in einem automatischen Kleinteilelager (AKL). Die Materialabrufe aus der Produktion werden systemisch vom übergelagerten Warehousemanagement-System (WMS) erfasst. Bei bedarfsgesteuerten Materialien werden diese über ein separates IT-System an das WMS übermittelt, bei verbrauchs-gesteuerten Materialien werden die Abrufe durch Scannen des Kanban-Etiketts durch den Routenzugfahrer im WMS angelegt. Das WMS disponiert die Materialabrufe gemäß internen Logiken (u. a. unter Berücksichtigung der Materialverfügbarkeit im Lager, Restreichweiten am Bestandort etc.) auf die entsprechenden Routenzugfahrten gemäß Fahrplan. Mit einer definierten Vorlaufzeit, welche benötigt wird um das Material auszulagern und auf die Etagengestelle zu verladen, werden die KLT aus dem AKL ausgelagert. Da in diesem Prozessschritt noch nicht die korrekte Reihenfolge für die Auslieferung hergestellt werden kann, werden diese anschließend in einem s.g. Sequencer zwischengepuffert. Aus diesem werden Sie dann in der geforderten Reihen-

folge auf die Etagengestelle verladen. Anschließend werden diese zum Routenzugbahnhof gefördert. Parallel dazu fährt der RZ mit leeren Etagengestellen in den Routenzugbahnhof ein. Dort werden die leeren Etagengestellen vollautomatisch gegen die beladenen Etagengestelle getauscht. Anschließend kann der Routenzugfahrer mit der Auslieferung der Tour beginnen.

Eine Synchronisation des manuellen Routenzugsprozesses mit der automatischen Materialflusstechnik sowie die Forderung nach einem überschneidungsfreien Fahrplan sind in diesem Anwendungsfall besonders relevant, da:

- Der Fahrplan die Abfahrtszeiten der Routenzüge definiert, auf deren Basis die Materialabrufe vorausschauend disponiert und ausgelagert werden.
- Die Auslager- und Sequenzierleistung durch die automatische Förder- und Handhabungstechnik begrenzt ist. Fahrplanüberschneidungen könnten die Grenzleistung der Fördertechnik zeitweise übersteigen.
- Staus vor der leistungsbegrenzenden Be- und Entladestation zu Wartezeiten für die Mitarbeiter führen würden.

Das betrachtete Routenzugsystem besteht dabei aus 17 Routen, welche jeweils unterschiedliche Bereiche der in Abbildung 8-1 dargestellten Montage versorgen. Folgende Tabelle dient als Überblick über die Routenkonfiguration, wie sie im Rahmen der Routenplanung festgelegt wurde, sowie der geforderten Transportnachfrage.

Tabelle 8-1: Routenkonfiguration Anwendungsfall I

Nr.	Routenname	Gesamtfahrtweg [m]	Anzahl Haltestellen [1]	Ladungsträgerdurchsatz [LT / h]	Ø Ladepositionen pro Ladungsträger [LP / LT]	Maximales Versorgungsintervall [min]	Maximales Bedarfserkennungsintervall [min]
1	R_AKL_Halle1_Linie1	680	37	56	3,5	240	120
2	R_AKL_Halle1_Linie2	830	74	95	3,7	240	120
3	R_AKL_Halle1_Linie3	830	58	72	4,5	240	120
4	R_AKL_Halle1_Linie4	760	49	69	5,2	240	120
5	R_AKL_Halle1_Linie5	1270	100	105	4,7	240	120
6	R_AKL_Halle1_Linie6	760	2	28	3,9	240	120
7	R_AKL_Halle1_Linie7	1150	26	22	3,5	240	120
8	R_AKL_Halle1_Linie8	980	57	44	3,7	240	120
9	R_AKL_Halle1_Linie9	680	4	57	4,2	240	120
10	R_AKL_Halle2_Linie1	850	61	40	3,2	240	120
11	R_AKL_Halle2_Linie2	670	24	30	5	240	120
12	R_AKL_Halle2_Linie3	680	8	15	5,1	240	120
13	R_AKL_Halle2_Linie4	690	57	88	5	240	120
14	R_AKL_Halle2_Linie5	700	31	33	5	240	120
15	R_AKL_Halle2_Linie6	720	33	23	4,4	240	120
16	R_AKL_Halle2_Linie7	970	26	41	3,9	240	120
17	R_AKL_Halle2_Linie8	1610	70	75	3,6	240	120

Ein Routenzug kann mit der zuvor beschriebenen technischen Ausführung 192 Ladepositionen transportieren. Weiterhin wird eine Routenzugfolgezeit t_{RZF} i. H. v. zwei Minuten und eine minimal zulässige Taktzeit $t_{Takt,min}$ i. H. v. fünf Minuten angenommen.

Für diese Eingangsdaten sind die Takt- und Umlaufzeiten für das Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ (t'_{Takt} , t'_{UZ}) und die Ergebnisse des in C# implementierten, integrierten Routenzugtakt-Problems (t_{Takt} , t_{UZ}) in Tabelle 8-2 vergleichend gegenübergestellt. Der optimale Routenzugfahrplan ist in Anhang C als Balkendiagramm dargestellt. Der hierfür notwendige, initiale Startzeitversatz τ_0 ist ebenfalls in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 8-2: Takt- und Umlaufzeiten der Routen für Anwendungsfall I bei maximaler Kapazitätsauslastung sowie bei der Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems

Nr.	Routenname	Maximale Kapazitätsauslastung		Integriertes Routenzugtakt-Problem		
		$t'_{Takt} [min]$	$t'_{UZ} [min]$	$t_{Takt} [min]$	$t_{UZ} [min]$	$\tau_0 [min]$
1	R_AKL_Halle1_Linie1	59	36	45	30	34
2	R_AKL_Halle1_Linie2	33	38	30	36	13
3	R_AKL_Halle1_Linie3	36	33	30	30	15
4	R_AKL_Halle1_Linie4	32	30	30	28	9
5	R_AKL_Halle1_Linie5	23	38	20	35	1
6	R_AKL_Halle1_Linie6	105	31	90	28	29
7	R_AKL_Halle1_Linie7	120	41	90	36	89
8	R_AKL_Halle1_Linie8	71	44	60	40	55
9	R_AKL_Halle1_Linie9	48	34	45	33	19
10	R_AKL_Halle2_Linie1	88	41	60	33	17
11	R_AKL_Halle2_Linie2	77	29	45	22	4
12	R_AKL_Halle2_Linie3	120	24	120	24	57
13	R_AKL_Halle2_Linie4	26	30	20	26	7
14	R_AKL_Halle2_Linie5	69	29	60	27	36
15	R_AKL_Halle2_Linie6	114	31	90	27	59
16	R_AKL_Halle2_Linie7	69	41	60	38	53
17	R_AKL_Halle2_Linie8	43	51	40	50	11

Es ist ersichtlich, dass die durch das integrierte Routenzugtakt-Problem ermittelten Taktzeiten stets, teilweise sogar deutlich, unter den auslastungsoptimalen Taktzeiten liegen, was jedoch auch nicht anders zu erwarten war: bei höheren Taktzeiten könnte schließlich die Transportnachfrage aufgrund eines zu geringen Transportangebotes nicht gedeckt werden. Gleichsam sind jedoch auch die ermittelten Umlaufzeiten geringer, da pro Tour weniger Behälter transportiert werden. Für diese Lösung nimmt die Zielfunktion den Wert 14 an und wurde durch den Branch & Bound Algorithmus in einer Rechenzeit von 28 Sekunden gefunden. Die Qualität dieses Ergebnisses zeigt sich bereits aus einem Vergleich mit dem Szenario maximale Kapazitätsauslastung: Gewichtet man hier die Anzahl Touren pro Stunde (Kehrwert der Taktzeit) mit der Umlaufzeit einer Tour fällt pro Stunde eine Fahrplanmasse i. H. v. 714 Minuten an. Bei optimaler Kapazitätsauslastung würden also 11,9 Routenzüge und Mitarbeiter zeitlich vollständig ausgelastet, was bei gleichen Randbedingungen einem theoretisch erzielbaren Globaloptimum entspricht. Würde ein anderes als in dieser Arbeit vorgestelltes Verfahren existieren, welches die Touren ohne Anpassung der Taktzeiten so zueinander synchronisieren kann, dass der Fahrplan trotzdem überschneidungsfrei ausgeführt werden, so dürfte der daraus resultierende Fahrplan:

- bei 12 Routenzügen und Mitarbeitern maximal 30 Sekunden Wartezeit pro Stunde und Routenzug enthalten, was einem Fahrplanwirkungsgrad $\alpha'_{C=12} = 714 \text{ min} / (12 * 60 \text{ min}) = 99,2 \%$ entspricht
- bei 13 Routenzügen und Mitarbeitern maximal 5 Minuten Wartezeit pro Stunde und Routenzug enthalten, was einem Fahrplanwirkungsgrad $\alpha'_{C=13} = 714 \text{ min} / (13 * 60 \text{ min}) = 91,5 \%$ entspricht

Dies Betrachtungen stellen jedoch nur theoretische Überlegungen dar, da nicht zueinander abgestimmte Taktzeiten immer zu überlappenden Umlauf- und Abfahrtszeiten führen werden. Inwieweit sich diese in diesem fiktiven Fahrplan auswirken, bleibt offen. In dem durch das integrierte Routenzugtakt-Problem ermittelten Fahrplan sind hingegen Wartezeiten durch Überschneidungen an der Quelle per Definition ausgeschlossen. Weiterhin sind die Touren so zeitlich zueinander synchronisiert, dass sich der Fahrplan mit der ermittelten Ressourcenanzahl ausführen lässt. Im Vergleich zu einer maximalen Kapazitätsauslastung beträgt der Fahrplanwirkungsgrad in der ermittelten Lösung $\alpha'_{C=14} = 714 \text{ min} / (14 * 60 \text{ min}) = 85 \%$.

Weiterhin gilt es, die Vorteile durch dessen Anwendung zu quantifizieren, um damit den Beitrag zur Verbesserung einer betrieblichen Situation nachzuweisen. Ohne die Anwendung der Forschungsergebnisse ist nicht gewährleistet, dass die Touren auf den unterschiedlichen Routen zueinander zeitlich so synchronisiert sind, dass die Routenzugfahrer zwischen den Routen wechseln können. Dementsprechend muss von einer 1:1-Zuordnung von Routenzug zu Route ausgegangen werden. Dass für diese zeitliche Synchronisation kein Verfahren etabliert ist, zeigt sich auch darin, dass eine dynamische Dispositionsstrategie in der Praxis nur sehr selten Anwendung findet: In der Studie von *Günthner et al.* wurde eine flexible Fahrzeugzuordnung nur in 4 von 21 Prozessen angewendet [Gün-2012, S. 39]. In der Studie nach *Lieb et al.* gaben nur 61 % der Befragten an, dass die Ressourcenzuweisung seltener als täglich geändert wird, also entsprechend inflexibel geplant ist [Lie-2017, S. 64]. Hierzu zeigt Abbildung 8-5 die sich ergebenden Takt-, Umlauf- und Wartezeiten bei maximaler Kapazitätsauslastung nochmals in grafischer Form:

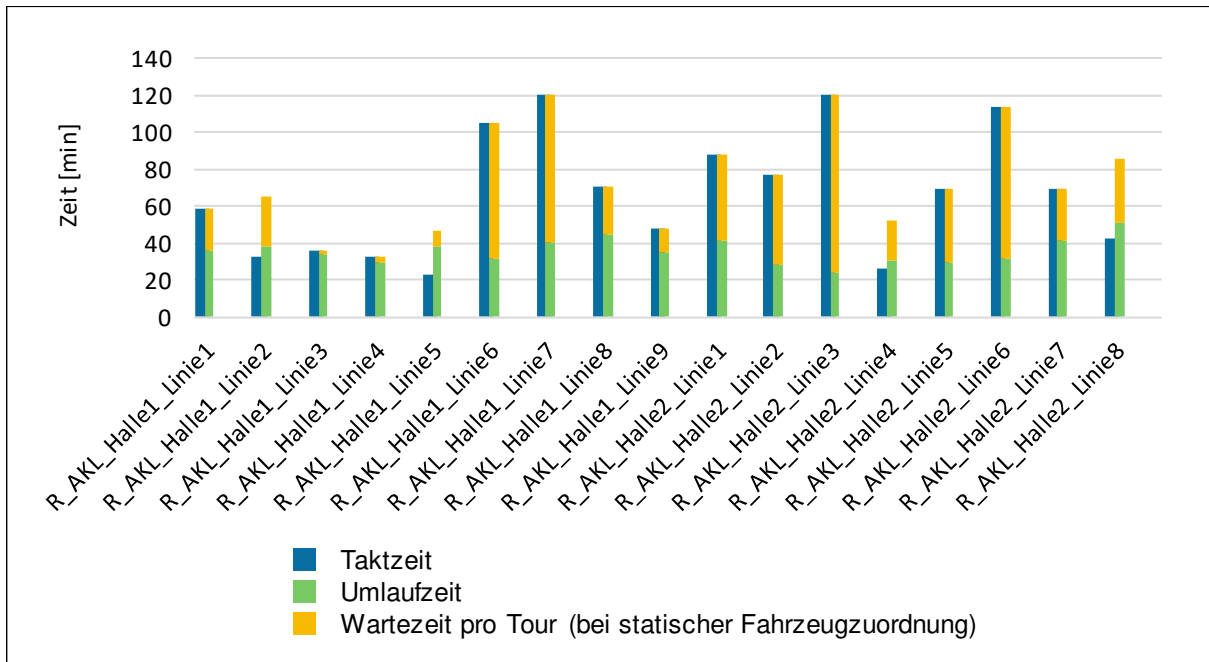


Abbildung 8-5: Takt- und Umlaufzeiten der Routen aus Anwendungsfall I und die sich daraus ergebende Wartezeiten je Route im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ und statischer Fahrzeugzuordnung (eigene Darstellung)

Erkennbar ist, dass für diese 1:1-Zuordnung die Takt- und Umlaufzeiten der unterschiedlichen Routen teilweise in einem sehr schlechten Verhältnis stehen. Ist die Taktzeit größer als die Umlaufzeit (bspw. Route „R_AKL_Halle1_Linie6“ oder „R_AKL_Halle1_Linie7“), muss der Routenzugfahrer entsprechend lang auf den Start der nächsten Tour warten. Ist hingegen die Taktzeit kleiner als die Umlaufzeit (bspw. Route „R_AKL_Halle1_Linie2“ oder „R_AKL_Halle2_Linie8“), müssen mehrere Routenzüge für diese Route vorgesehen werden. Auch in diesem Fall entsteht jedoch Wartezeit auf die dann über- oder drittnächste Tour auf dieser Route. In Summe müssen 21 Routenzüge und Mitarbeiter vorgesehen werden, woraus sich ein Fahrplanwirkungsgrad i. H. v. 57 % ergibt.

Die optimale Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems und der zugehörige Fahrplan wurde bereits in Tabelle 8-2 präsentiert. Die Anzahl gleichzeitig aktiver Touren beträgt darin 14 Routenzüge. Somit ergibt sich ein um 7 Routenzüge oder 33 % geringerer Ressourceneinsatz gegenüber einer statischen Fahrzeugzuordnung.

Der damit verbundene, betriebswirtschaftliche Vorteil ist in Tabelle 8-3 zusammengefasst. In dieser exemplarischen Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die jährlichen Arbeitskosten für eine Fachkraft für Lagerlogistik durchschnittlich 39.040 € / Jahr betragen. Diese enthalten die direkten Arbeitskosten i. H. v. 30.500 € / Jahr⁷² sowie Lohnnebenkosten i. H. v. 8.540 € / Jahr⁷³. Zusätzlich zu den jährlichen Arbeitskosten werden aber auch Investitionen in Routenzüge reduziert. Hierfür werden 39.500 € / Routenzug bestehend aus einem Schleppfahrzeug und 4 E-Frame Anhängern angenommen [Kuz-2019]⁷⁴.

Tabelle 8-3: Gegenüberstellung der Arbeitskosten und Investitionen des Routenzugsystems bei statischer Fahrzeugzuordnung gegenüber der Anwendung des integrierten Modells zur Taktzeit- und Fahrplanplanung für Anwendungsfall I

	Arbeitskosten pro Jahr [€/Jahr]	Investitionen in Routen- zugtechnik [€]
1-Schicht Betrieb		
statische Fahrzeugzuordnung	819.840	829.500
Integrierte Takt- und Fahrplanplanung	546.560	553.000
Mögliche Einsparung	273.280	276.500
2-Schicht Betrieb		
statische Fahrzeugzuordnung	1.639.680	829.500
Integrierte Takt- und Fahrplanplanung	1.093.120	553.000
Mögliche Einsparung	546.560	276.500
3-Schicht Betrieb		
statische Fahrzeugzuordnung	2.459.520	829.500
Integrierte Takt- und Fahrplanplanung	1.639.680	553.000
Mögliche Einsparung	819.840	276.500

Es ist erkennbar, dass die Anwendung der Forschungsergebnisse zu einer signifikanten Effizienzsteigerung führen kann. Durch die optimale Synchronisation der Touren lassen sich insbesondere die jährlichen Arbeitskosten deutlich reduzieren, was bei einem Mehrschicht-Betrieb zu Einsparungen in einem hohen sechsstelligen Bereich führen kann.

72 Diese entspricht laut der Online-Jobplattform „StepStone“ dem Brutto-Jahresgehalt einer Fachkraft für Lagerlogistik im bundesdeutschen Durchschnitt [Ste-2019].

73 Diese umfassen u. a. die Sozialbeiträge der Arbeitgeber, Kosten für die berufliche Aus- und Weiterbildung und Steuern und betragen laut statistischem Bundesamt im Jahr 2016 im Bundesdurchschnitt bei 28 % des Bruttoverdienstes [Sta-2018]

74. Nicht enthalten sind darin ggf. notwendige zusätzliche Investitionen in Ladetechnik und Batterien zur Überbrückung der Ladezyklen.

8.3 Anwendungsfall II: Bereitstellung von Großladungsträgern mit sequenziertem Material

Die Bereitstellung von sequenziertem Material stellt ein weiteres, in der betrieblichen Praxis mögliches Einsatzfeld für Routenzugsysteme dar. Hierfür wird im Folgenden ein zweiter Anwendungsfall bei der BMW Group betrachtet, bei dem auf einer Tour s. g. Sequenzgestelle an unterschiedlichen PVB bereitgestellt werden. Jedes besteht aus mehreren Fächern, in welche das entsprechende Material für ein Produkt vorsortiert bereitgestellt wird. Die unterschiedlichen Fächer sind bereits gemäß der Reihenfolge bestückt, in der die Produkte den PVB passieren. Innerhalb eines solchen Sequenzgestells werden ausschließlich Materialien desselben, s. g. Sequenzstroms einsortiert, welcher aus Materialvarianten derselben Teilefamilie besteht (bspw. unterschiedliche Farbvarianten des Außenspiegels). An einem PVB können somit auch mehrere Sequenzgestelle unterschiedlicher Sequenzströme bereitgestellt werden müssen. Jedes Sequenzgestell ist auf einem Trolley platziert, sodass diese manuell geschoben werden können. Am PVB befinden sich je Sequenzstrom i. d. R. zwei Sequenzgestelle, Eines, aus dem Werker gerade Teile entnimmt (s. g. Aktivgestell) und ein zweites Nachschubgestell, welches gegen das Aktivgestell getauscht werden kann, sobald das Aktivgestell leer ist. Der in diesem Anwendungsfall zugrundeliegende Routenzugprozess ist in Abbildung 8-6 grafisch dargestellt und im Folgenden näher beschrieben.

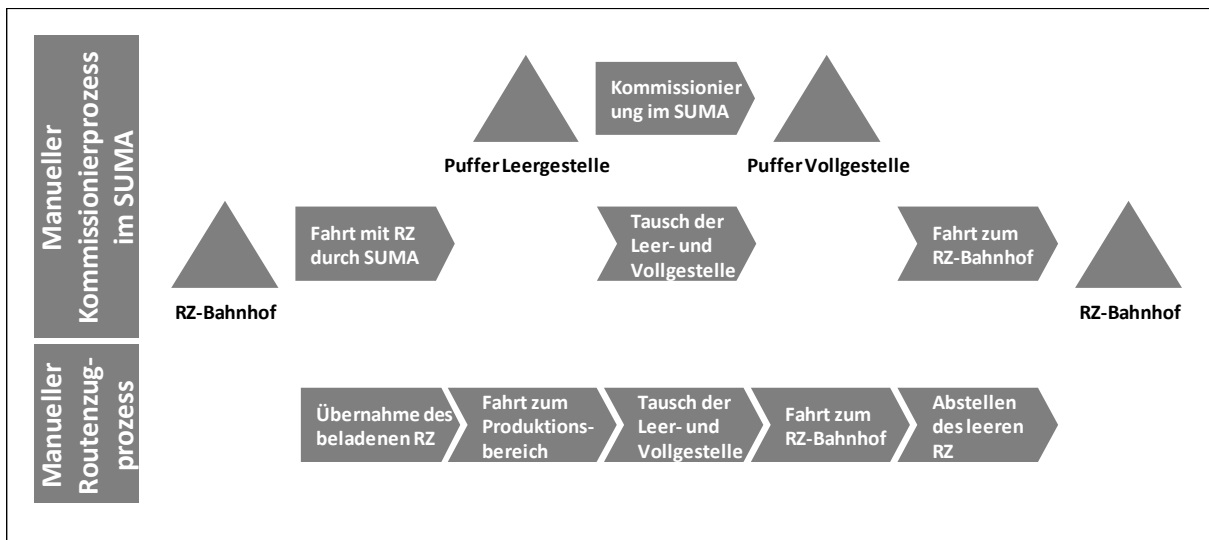


Abbildung 8-6: Schematische Darstellung der Teilprozesse zur GLT-Sequenzversorgung (eigene Darstellung)

Die Sequenzierung des Materials erfolgt in einem manuellen Lager, welches nach dem s. g. Supermarkt-Konzept (Abk. SUMA) organisiert ist. Dabei handelt es sich um ein verbauortnahes Logistiksystem, in dem die Kommissionier- und Sequenzierzonen für Material analog dem Produktionssystem angeordnet sind. Material, welches am selben

PVB benötigt wird, befindet sich im Supermarkt in derselben Greifzone, wodurch Wegezeiten für den Lagermitarbeiter bei der Kommissionierung / Sequenzierung reduziert werden. Man spricht hier von einer „Spiegelung“ der zu versorgenden Bandabschnitte der Montagelinie innerhalb des Supermarkts [Klu-2010, S. 197ff.]. Die eigentliche Routenzugbeladung erfolgt zweistufig. Die Sequenzgestelle werden innerhalb der einzelnen Greifzonen durch Mitarbeiter kommissioniert und auf Übergabeflächen an den jeweiligen Greifzonen bereitgestellt. Ein anderer Mitarbeiter mäandert mit dem Routenzug durch den Lagerbereich und tauscht an jeder der jeweiligen Tour zugewiesenen Greifzonen volle gegen leere Sequenzgestelle aus. Anschließend stellt er den beladenen Routenzug im Routenzugbahnhof ab. Der Routenzugfahrer, welcher die Auslieferung in den Produktionsbereich übernimmt, stellt den Routenzug seiner vorherigen Tour im Routenzugbahnhof ab und übernimmt einen neuen Routenzug.

Auch bei diesem Anwendungsfall ist die Forderung nach einem überschneidungsfreien Fahrplan relevant, da die Supermärkte und Kommissionierung möglichst gleichmäßig ausgelastet werden sollen. Zudem besitzen die Sequenzgestelle eine geringe Reichweite, wodurch an den PVB ein geringerer Sicherheitsbestand als in Anwendungsfall I vorhanden ist (siehe maximale Versorgungsintervalle in Tabelle 8-4). Durch Fahrplanüberschneidungen hervorgerufene Verzögerungen bei der Kommissionierung oder Materialbereitstellung bieten hier eher das Risiko von Materialabrissen in der Produktion.

Folgende Tabelle dient als Überblick über die Routenkonfiguration für Anwendungsfall II sowie der geforderten Transportnachfrage:

Tabelle 8-4: Routenkonfiguration Anwendungsfall II

Nr.	Routenname	Gesamtfahrtweg [m]	Anzahl Haltestellen [1]	Ladungsträgerdurchsatz [LT / h]	Ø Ladepositionen pro Ladungsträger [LP / LT]	Maximales Versorgungsintervall [min]	Maximales Bedarfserkennungsintervall [min]
1	R_GLT_Halle1_Linie01	1024	3	19	1	17	-
2	R_GLT_Halle1_Linie02	968	3	5	1	29	-
3	R_GLT_Halle1_Linie03	983	3	6	1	19	-
4	R_GLT_Halle1_Linie04	1668	5	38	1	19	-
5	R_GLT_Halle1_Linie05	1668	5	8	1	19	-
6	R_GLT_Halle1_Linie06	1263	5	10	1	19	-
7	R_GLT_Halle1_Linie07	2618	5	12	1	24	-
8	R_GLT_Halle1_Linie08	1293	5	12	1	28	-

Nr.	Routenname	Gesamtfahrtweg [m]	Anzahl Haltestellen [1]	Ladungsträgerdurchsatz [LT / h]	Ø Ladepositionen pro Ladungsträger [LP / LT]	Maximales Versorgungsintervall [min]	Maximales Bedarfserkennungintervall [min]
9	R_GLT_Halle1_Linie09	1718	5	10	1	19	-
10	R_GLT_Halle1_Linie10	1243	5	15	1	20	-
11	R_GLT_Halle1_Linie11	1213	5	7	1	28	-
12	R_GLT_Halle1_Linie12	1693	5	22	1	19	-
13	R_GLT_Halle2_Linie01	1398	5	14	1	28	-
14	R_GLT_Halle2_Linie02	948	5	17	1	30	-
15	R_GLT_Halle2_Linie03	1448	5	15	1	26	-
16	R_GLT_Halle2_Linie04	1398	5	17	1	24	-
17	R_GLT_Halle2_Linie05	903	5	3	1	43	-
18	R_GLT_Halle2_Linie06	873	5	9	1	28	-
19	R_GLT_Halle2_Linie07	873	5	3	1	35	-
20	R_GLT_Halle2_Linie08	769	5	15	1	28	-
21	R_GLT_Halle2_Linie09	769	5	4	1	31	-
22	R_GLT_Halle2_Linie10	1609	5	9	1	17	-
23	R_GLT_Halle2_Linie11	1609	5	1	1	44	-
24	R_GLT_Halle2_Linie12	1609	5	3	1	33	-

Ein Routenzug setzt sich aus einem Schleppfahrzeug mit vier Anhängern zusammen, welche jeweils ein Sequenzgestell transportieren können. Es können also maximal vier Ladungsträger pro Tour transportiert werden. Weiterhin wird eine Routenzugfolgezeit t_{RZF} i. H. v. 30 Sekunden⁷⁵ und eine minimal zulässige Taktzeit $t_{Takt,min}$ i. H. v. 5 Minuten angenommen.

Die sich daraus ergebenden Takt- und Umlaufzeiten sind in Tabelle 8-5, analog zum Vorgehen für Anwendungsfall I (vgl. Abschnitt 8.2), für das Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ (t'_{Takt} , t'_{UZ}) sowie für die Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems (t_{Takt} , t_{UZ}) gegenübergestellt. Der optimale Routenzugfahrplan ist in Anhang D als Balkendiagramm dargestellt. Der hierfür notwendige, initiale Startzeitversatz τ_0 ist ebenfalls in der folgenden Tabelle aufgeführt:

⁷⁵ De facto dauert die Beladung eines Routenzuges in diesem Anwendungsfall durchschnittlich 1,5 min. Da im Bahnhof jedoch drei unabhängig nutzbare Beladepositionen vorgesehen sind, ergibt sich eine Routenzugfolgezeit i. H. v. 30 Sekunden (vgl. Formel (6-22)).

Tabelle 8-5: Takt- und Umlaufzeiten der Routen für Anwendungsfall II bei maximaler Kapazitätsauslastung sowie bei der Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems

Nr.	Routenname	Maximale Kapazitätsauslastung		Integriertes Routenzugtakt-Problem		
		$t'_{Takt} [min]$	$t'_{UZ} [min]$	$t_{Takt} [min]$	$t_{UZ} [min]$	$\tau_0 [min]$
1	R_GLT_Halle1_Linie01	13	22	10	21	7
2	R_GLT_Halle1_Linie02	29	20	25	20	19
3	R_GLT_Halle1_Linie03	19	20	15	20	13
4	R_GLT_Halle1_Linie04	6	21	5	21	1,5
5	R_GLT_Halle1_Linie05	19	20	15	20	3,5
6	R_GLT_Halle1_Linie06	19	17	15	16	6
7	R_GLT_Halle1_Linie07	20	31	20	31	17,5
8	R_GLT_Halle1_Linie08	20	18	20	18	7,5
9	R_GLT_Halle1_Linie09	19	21	15	21	8
10	R_GLT_Halle1_Linie10	16	17	15	17	11
11	R_GLT_Halle1_Linie11	28	16	25	16	24
12	R_GLT_Halle1_Linie12	11	22	10	22	2,5
13	R_GLT_Halle2_Linie01	17	19	15	18	3
14	R_GLT_Halle2_Linie02	14	14	10	13	5,5
15	R_GLT_Halle2_Linie03	16	19	15	19	13,5
16	R_GLT_Halle2_Linie04	14	19	10	18	2
17	R_GLT_Halle2_Linie05	43	12	30	12	0
18	R_GLT_Halle2_Linie06	27	13	25	13	14
19	R_GLT_Halle2_Linie07	35	12	25	11	9
20	R_GLT_Halle2_Linie08	16	20	15	19	10
21	R_GLT_Halle2_Linie09	31	18	30	18	9,5
22	R_GLT_Halle2_Linie10	17	27	15	27	14,5
23	R_GLT_Halle2_Linie11	44	26	30	25	4,5
24	R_GLT_Halle2_Linie12	33	26	30	26	24,5

Im Gegensatz zu Anwendungsfall I sind die Taktzeiten der Routen deutlich geringer, da zum einen weniger Ladungsträger pro Tour transportiert werden können und zum anderen, bedingt durch die geringere Stellplatzanzahl an den PVB (vgl. Abschnitt 5.1), die Sequenzgestelle in höherer Frequenz nachversorgt werden müssen. So müssen auf Route „R_GLT_Halle1_Linie03“ bspw. nur sechs Ladungsträger pro Stunde transportiert werden. Bei einer Routenzugkapazität von vier Ladungsträger pro Routenzug würden hier theoretisch 1,5 Touren pro Stunde, respektive eine Taktzeit i. H. v. 40 Minuten, ausreichen. Da auf dieser Route jedoch ein Sequenzgestell mit einer Ladungsträgerreichweite i. H. v. 19 Minuten transportiert wird, darf diese Route maximal mit einer Taktzeit i. H. v. ebenfalls 19 Minuten bedient werden, sowohl im Szenario „Maxi-

male Kapazitätsauslastung“ sowie im optimalen Fahrplan. Aufgrund dieser beiden Tatsachen fällt im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ eine Fahrplanmasse i. H. v. 1.591 Minuten pro Stunde an⁷⁶, wofür bereits mindestens 27 Routenzüge und Mitarbeiter benötigt würden.

In der ermittelten optimalen Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems werden hingegen 32 Routenzüge und Mitarbeiter benötigt. Dies liegt wieder darin begründet, dass die Routen i. d. R. mit einer niedrigeren Taktzeit als im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ bedient werden. Zur Lösung hat der Branch & Bound Algorithmus eine Rechenzeit von 61 s benötigt. Diese höhere Rechenzeit im Vergleich zu Anwendungsfall I (dort 28 Sekunden) lässt sich vorrangig auf die höhere Anzahl Routen und Fahrten zurückführen (17 Routen in Anwendungsfall I gegenüber 24 Routen in Anwendungsfall II).

Der ermittelte, optimale Fahrplan kann mit 32 Ressourcen überschneidungsfrei ausgeführt werden, was im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ nicht sichergestellt werden kann. Hier können sich die Touren ungünstig überlappen und zeitweise mehr Ressourcen zur Aufrechterhaltung des Fahrplans binden. Um diese Überschneidungen sicher abzufangen, muss von einer 1:1-Zuordnung von Routenzug zu Route ausgegangen werden. Hierzu zeigt folgende Abbildung die sich ergebenden Takt-, Umlauf- und Wartezeiten bei maximaler Kapazitätsauslastung nochmals in grafischer Form:

⁷⁶ Die Fahrplanmasse ergibt sich aus einer Gewichtung der Anzahl Touren pro Stunde (Kehrwert der Taktzeit) mit der Umlaufzeit einer Tour.

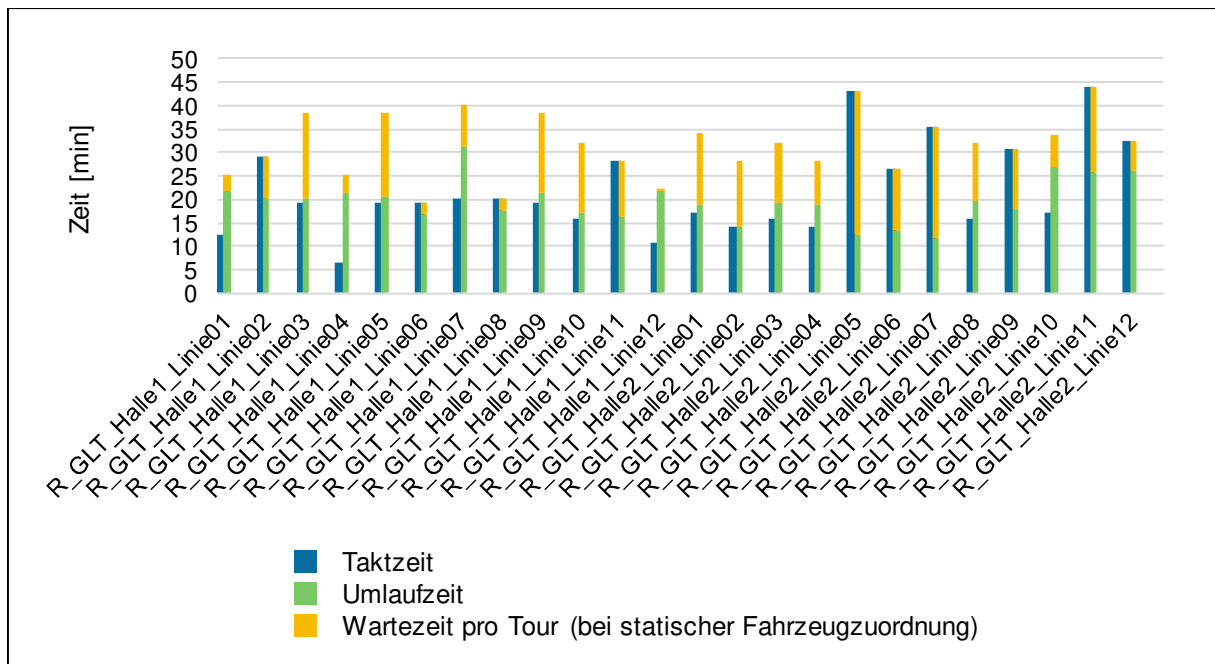


Abbildung 8-7: Takt- und Umlaufzeiten der Routen aus Anwendungsfall II und die sich daraus ergebende Wartezeiten je Route im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ und statischer Fahrzeugzuordnung (eigene Darstellung)

Auch hier stehen, analog zu Anwendungsfall I, die Takt- und Umlaufzeiten der Routen teilweise in einem schlechten Verhältnis. So müssen bspw. auf Route „R_GLT_Halle1_Linie03“ zwei Routenzüge eingesetzt werden, welche jeweils 19 Minuten Wartezeit auf die nächste Tour auf dieser Route haben. In Summe müssen hier 40 Routenzüge und Mitarbeiter vorgesehen werden, woraus sich ein Fahrplanwirkungsgrad i. H. v. $\alpha'_{C=40} = 1591 \text{ min} / (40 * 60 \text{ min}) = 66 \%$ ergibt. Bezogen auf diese Fahrplanmasse i. H. v. 1.591 Minuten⁷⁷ beträgt der Fahrplanwirkungsgrad in der optimalen Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems mit 32 Routenzügen und Mitarbeitern $\alpha'_{C=32} = 1591 \text{ min} / (32 * 60 \text{ min}) = 83 \%$.

Zum Abschluss dieses Abschnitts ist in Tabelle 8-6 der betriebswirtschaftliche Vorteil aufgezeigt, welcher sich durch die Anwendung der Forschungsergebnisse im Vergleich zu einer statischen Fahrzeugzuordnung ergeben kann. Die darin getroffenen Annahmen bzgl. Arbeitskosten und Investitionen entsprechen denen für Anwendungsfall I und können Abschnitt 8.2 entnommen werden.

⁷⁷ Der durch das integrierte Routenzugtakt-Problem ermittelte, optimale Fahrplan besitzt eine höhere Fahrplanmasse, da die Routen i.d.R. in höherer Frequenz bedient werden und mehr Touren eingeplant sind. Allein zur Deckung der Transportnachfrage werden hingegen „nur“ so viele Touren wie im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ benötigt. Wird die reale Fahrplanmasse im optimalen Fahrplan i. H. v. 1.857 Minuten berücksichtigt beträgt der Fahrplanwirkungsgrad $\alpha_x = 1857 \text{ min} / (32 * 60 \text{ min}) = 97 \%$

Tabelle 8-6: Gegenüberstellung der Arbeitskosten und Investitionen des Routenzugsystems bei statischer Fahrzeugzuordnung gegenüber der Anwendung des integrierten Modells zur Taktzeit- und Fahrplanplanung für Anwendungsfall II

	Arbeitskosten pro Jahr [€/Jahr]	Investitionen in Routen- zugtechnik [€]
1-Schicht Betrieb		
statische Fahrzeugzuordnung	1.561.600	1.580.000
Integrierte Takt- und Fahrplanplanung	1.249.280	1.264.000
Mögliche Einsparung	312.320	316.000
2-Schicht Betrieb		
statische Fahrzeugzuordnung	3.123.200	1.580.000
Integrierte Takt- und Fahrplanplanung	2.498.560	1.264.000
Mögliche Einsparung	624.640	316.000
3-Schicht Betrieb		
statische Fahrzeugzuordnung	4.684.800	1.580.000
Integrierte Takt- und Fahrplanplanung	3.747.840	1.264.000
Mögliche Einsparung	936.960	316.000

8.4 Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse

Das integrierte Routenzugtakt-Problem konnte für beide, vergleichsweise sehr großen Anwendungsfälle⁷⁸, optimal gelöst werden. Weiterhin werden die Zielgrößen auf die erwartete Weise bestimmt und beeinflusst. Konkret wurden die folgenden Funktionen und Korrelationen gezeigt:

- Die Taktzeiten wurden stets so gewählt, dass diese kleiner oder gleich der Taktzeiten bei maximaler Kapazitätsauslastung sind. Die Transportnachfrage und alle zeitlichen Restriktionen können durch den ermittelten, optimalen Fahrplan gedeckt werden.
- Der ermittelte Fahrplan ist an der Quelle überschneidungsfrei (vgl. Anhang C und Anhang D).
- Die initialen Startzeitversätze wurden so gewählt, dass sich der Fahrplan stets mit einer geringeren Ressourcenanzahl als bei statischer Fahrzeugzuordnung ausführen lässt. Offenbar werden die Touren also so zeitlich zueinander synchronisiert, dass die Mitarbeiter zwischen den Routen wechseln können.

⁷⁸ In der Studie nach Lieb et al. gaben 19 % der 144 Befragten an, Routenzugsysteme zur KLT-Versorgung mit einem Durchsatz i. H. v. 501 LT pro Stunde oder mehr zu betreiben (Anwendungsfall I: 893 KLT pro Stunde). Für Routenzugsysteme zur GLT-Versorgung gaben 12 % der 130 Befragten an, Routenzugsysteme ähnlicher Größe mit 200 LT pro Stunde oder mehr zu betreiben (Anwendungsfall II: 274 GLT pro Stunde) [Lie-2017, S. 49]

Der Branch & Bound Algorithmus konnte beide Anwendungsfälle innerhalb sehr kurzer Zeit (28 Sekunden für Anwendungsfall I und 61 Sekunden für Anwendungsfall II) optimal lösen. Dies unterstützt die Anwendbarkeit für die operative Routenzugplanung, da diese rollierend in vergleichsweise kurzen Abständen wiederholt werden muss. Durch die kurze Rechenzeit kann der Planer neue Eingangsdaten, ggf. auch für unterschiedliche Szenarien, ohne einen signifikanten Zeitverzug planen und prüfen. Somit wurde der Teilschritt „Application Evaluation“ mit positivem Ergebnis durchgeführt und die Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes zur operativen Routenzugplanung ist bestätigt.

Um die Vorteile durch die Anwendung der Forschungsergebnisse im Teilschritt „Success Evaluation“ zu evaluieren, wurden je Anwendungsfall zwei Szenarien betrachtet: Im ersten Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ wurden die Takt- Umlaufzeiten aller Routen derart bestimmt, dass die Routenzugkapazität möglichst maximal ausgenutzt wird. Dabei wurden sämtliche Nebenbedingungen bzgl. Überschneidungen gleichzeitig aktiver Touren und im Routenzugbahnhof ignoriert. Die daraus resultierenden Fahrplanwirkungsgrade $\alpha'_{Max}(I)$ und $\alpha'_{Max}(II)$ entsprechen also einem theoretischen Globaloptimum, welches in Realität allerdings aufgrund nicht zueinander abgestimmter Takt- und Umlaufzeiten und der sich daraus ergebenden Fahrplanüberschneidungen nicht erzielbar sein wird. Im zweiten Szenario „Statische Fahrzeugzuordnung“ werden die Takt- und Umlaufzeiten ebenfalls so gewählt, dass die Routenzugkapazität möglichst maximal ausgenutzt wird. Überschneidungen bezüglich gleichzeitig aktiver Touren werden darin durch eine feste Zuweisung zwischen Ressource und Route abgefangen. Überschneidende Abfahrtszeiten im Routenzugbahnhof werden weiterhin ignoriert. Würde die Leistung des Routenzugbahnhofs und vorgelagerter Prozesse deutlich über der geforderten Transportnachfrage liegen, wären die resultierenden Fahrpläne mit den zugehörigen Fahrplanwirkungsgraden $\alpha'_{Min}(I)$ und $\alpha'_{Min}(II)$ für das Szenario „Statische Fahrzeugzuordnung“ realisierbar.

In folgender Abbildung sind die Fahrplanwirkungsgrade für diese Szenarien noch einmal mit den Fahrplanwirkungsgraden $\alpha'_{iRZT}(I)$ und $\alpha'_{iRZT}(II)$ der Lösungen des integrierten Routenzugtakt-Problems vergleichend gegenübergestellt:

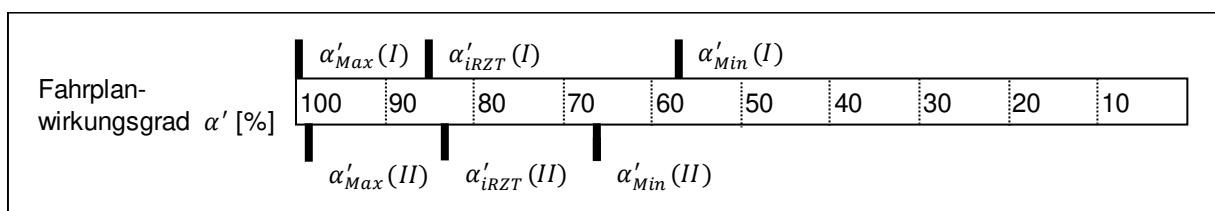


Abbildung 8-8: Gegenüberstellung der Fahrplanwirkungsgrade bei maximaler Kapazitätsauslastung, statischer Fahrzeugzuordnung und der Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems (eigene Darstellung)

In beiden Anwendungsfällen wird durch das integrierte Routenzugtakt-Problem ein Fahrplan mit deutlich besserem Wirkungsgrad als bei einer statischen Fahrzeugzuordnung erzeugt. Fahrplanwirkungsgrad liegt bei beiden Lösungen jeweils ca. 15 % unter den theoretischen Globaloptima. Dies kann zu signifikanten Effizienzsteigerungen beim Betrieb eines getakteten Routenzugsystems mit statischen Routen führen (vgl. Tabelle 8-3 und Tabelle 8-6). Diese Effizienzsteigerung ist teilweise auf die Ausnutzung einer variablen Fahrzeugzuordnung zurückzuführen. Ein Fahrplan für das Szenario „Statische Fahrzeugzuordnung“ sollte auch mit einem geringeren Ressourceneinsatz ausgeführt werden können, wenn im untertägigen Betrieb dynamisch Routenzüge den Touren zugewiesen werden⁷⁹. Hierbei würde es sich jedoch um ein rein steuerndes Verhalten handeln, da Überschneidungen nicht bereits während der Fahrplanplanung betrachtet werden. Offen bliebe für eine solche Anwendung, wie viele Ressourcen vorgehalten werden müssten, um die resultierenden Überschneidungen abzufangen. Im präsentierten Modell hingegen werden diese Überschneidungen bereits planerisch betrachtet und der resultierende Fahrplan kann mit der durch die Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems bestimmten Ressourcenanzahl ausgeführt werden.

Somit ist auch die letzte verbliebene Forschungsfrage:

Wie kann der entwickelte Planungsansatz sowie dessen Ergebnisse evaluiert und verallgemeinert werden?

positiv beantwortet.

⁷⁹ Ein solches System könnte bspw. durch steuernde Eingriffe eines Leitsystems im Routenzugbahnhof realisiert werden: Routenzugfahrer melden sich nach Abschluss einer Tour als „verfügbar“ und ein Leitsystem weist diese nach definierten Prioritätsregeln den nächsten anstehenden Touren zu.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Moderne Logistikkonzepte zur Produktionsversorgung basieren in zunehmendem Maße auf „just in time“ Ansätzen für die Bereitstellung von Material. Das heißt, dass nur dasjenige Material in der entsprechenden Menge bereitgestellt wird, welches auch unmittelbar am Bedarfsort benötigt wird. Dadurch müssen durch die innerbetriebliche Logistik häufig kleinere Einheiten in höherer Frequenz transportiert werden. Klassische Direkttransportkonzepte, welche bspw. mittels Gabelstaplern ausgeführt werden, können diese Anforderung nur bedingt erfüllen. Hier werden die Aufträge für mehrere Bedarfsorte nacheinander ausgeführt, weshalb jeder einzelne Bedarfsort nur in einer vergleichsweise geringen Frequenz versorgt werden kann. Sammeltransporte, bei denen die (kleineren) Einheiten für unterschiedliche Bedarfsorte gebündelt auf einer Fahrt transportiert und bereitgestellt werden, gewährleisten hingegen eine hochfrequente Materialversorgung und eine hohe Auslastung der Transportmittel.

Innerbetriebliche Transportsysteme, welche nach dem Sammeltransport-Prinzip betrieben werden, werden gemeinhin als Routenzugsysteme bezeichnet. Innerhalb eines Routenzugsystems zirkulieren s. g. Routenzüge zwischen den unterschiedlichen Materialflussquellen und -senken, welche häufig aus einem Schleppfahrzeug und einem oder mehreren Anhängern bestehen. In der Praxis existieren vielfältige Ausprägungen solcher Routenzugsysteme sowohl in Bezug auf die eingesetzte Technik, den Routenzugprozess und die Steuerung des Routenzugsystems. Viele Ausprägungsmerkmale werden dabei bereits im Rahmen der taktischen Routenzugplanung definiert, bspw. die verwendeten Transportmittel oder Informationsflüsse. Allerdings sind logistische Systeme fortwährenden Änderungen unterworfen, seien es die zu transportierenden Mengen oder die Anzahl und Position der zu versorgenden Bereitstellorte. Aufgabe der operativen Routenzugplanung ist es deshalb, die Ergebnisse vorheriger Planungen regelmäßig an Umfeldveränderungen anzupassen. Dies kann durch eine Anpassung der Routenführung, des Fahrplans und / oder der Ladelisten der Routenzüge erfolgen.

Viele wissenschaftliche Ansätze zur operativen Routenzugplanung forcieren die Anpassung der Routenverläufe, also die Findung einer möglichst optimalen Route mittels angepasster vehicle routing Probleme. Deren Anwendung würde demnach eine flexible Routenführung voraussetzen, welche in der Praxis u. U. nicht gewährleistet werden kann. Weiterhin ist zu unterscheiden, ob Routenzüge auf einer Route in fixen Intervallen verkehren oder die Abfahrtszeiten dynamisch entsprechend der aktuellen

Auftragslage festgelegt werden. Die Vorteilhaftigkeit streng getakteter Routenzugsysteme wird in der Literatur umfangreich dargelegt. Ein fester Takt dient der besseren Planbarkeit und Transparenz der Logistik und gewährleistet eine konstante Wiederbeschaffungszeit, wodurch sich Bestände an den Bereitstellorten reduzieren lassen. Es ist daher wenig verwunderlich, dass die Mehrzahl der in der Praxis eingesetzten Routenzugsysteme statische Routen besitzen und nach einem streng getakteten Routenzugfahrplan gesteuert werden. Für solche Systeme ist die Anpassung des Routenzugfahrplans, d. h. der Taktzeiten, in denen ein Routenzug die einer Route zugewiesenen Bereitstellorte versorgt, die naheliegende Lösung, um auf eine geänderte Transportnachfrage zu reagieren: Sinkt die Transportnachfrage auf einer Route, wird diese seltener bedient als eine Route mit höherer Transportnachfrage. Bei dieser Ausprägungsform ergibt sich jedoch die Gefahr, dass bei ungünstigem Verhältnis zwischen Taktzeiten der Routen und Umlaufzeiten der Routenzüge erhöhte Wartezeiten entstehen. Zudem können sich die einzelnen Touren z. T. ungünstig überlagern und zu Kapazitätsengpässen bei vor- und nachgelagerten Prozessen führen. Da dieser Aspekt bisher in keinem verfügbaren Modell betrachtet wurde, sollte im Rahmen dieser Arbeit folgende übergeordnete Forschungsfrage beantwortet werden:

Wie kann ein anwendungsorientierter Ansatz zur operativen Planung getakteter Routenzugsysteme in der Produktionslogistik ausgestaltet werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurde ein Modell entwickelt, welches sich durch formalisierte Algorithmen automatisiert lösen lässt. Damit können die Takt-, Umlauf- und Abfahrtszeiten der Routenzüge eines Routenzugsystems bestimmt werden. Der resultierende Routenzugfahrplan deckt einerseits die geforderte Transportnachfrage und kann andererseits mit einer minimalen Anzahl an Ressourcen, d. h. Routenzügen und Mitarbeitern, ausgeführt werden. Damit wird ein potenzieller Nutzer in die Lage versetzt werden, getaktete Routenzugsysteme mit statischen Routen operativ zu planen.

Dieses Modell wurde in drei Stufen aufgestellt. Zunächst wurden die Wechselwirkungen zwischen dem notwendigen Transportangebot und der geforderten Transportnachfrage hergeleitet. Basierend auf der Transportkapazität eines Routenzuges sowie einer gegebenen Transportnachfrage (Ladungsträgerdurchsatz pro Stunde) kann durch die präsentierten Berechnungszusammenhänge die maximal zulässige Taktzeit einer Route bestimmt werden. Dabei werden auch zeitliche Restriktionen berücksichtigt, welche garantieren, dass Transportaufträge innerhalb einer definierten Zeitspanne erkannt und ausgeliefert werden können. Damit kann eine Wiederbeschaffungszeit ga-

rantiert werden, auf deren Basis die Bestände an den Bereitstellorten ausgelegt werden können. Diese Zusammenhänge, welche im Rahmen der ersten Stufe hergeleitet wurden, wurden unter der Planungsaufgabe „Taktzeitplanung“ zusammengefasst.

Die Taktzeit einer Route hat direkten Einfluss auf die Abfahrtszeiten aller Touren im Fahrplan (Touren auf einer Route werden im Abstand der Taktzeit gestartet) sowie auf die Umlaufzeit einer Route. Werden durch eine höhere Taktzeit mehr Ladungsträger auf einer Fahrt transportiert, dauert diese auch länger, da mehr Ladungsträger bereitgestellt werden müssen. Die Abfahrtszeitpunkte der Touren im Fahrplan sowie deren Umlaufzeiten bestimmen wiederum die Anzahl an Touren, welche gleichzeitig aktiv sind. Dies ist gleichbedeutend mit der Anzahl an Ressourcen, welche zur Einhaltung des Fahrplans vorgehalten werden muss. Diese Zusammenhänge wurden in der zweiten Stufe, der s. g. Fahrplanplanung, hergeleitet und modellhaft beschrieben. Ergebnis war ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem, welches als „Routenzugfahrplan-Problem“ bezeichnet wurde. Durch dessen Lösung kann, basierend auf einer gegebenen Taktzeitplanung, ein Fahrplan generiert werden, welcher mit einer minimalen Anzahl an Ressourcen ausgeführt werden kann. Zusätzlich gewährleistet der Fahrplan überschneidungsfreie Abfahrzeiten an der Quelle (Routenzugbahnhof) und damit eine geglättete Auslastung vorgelagerter Prozesse.

Die sequentielle Lösung der Taktzeit- und Fahrplanplanung führt jedoch nicht automatisch zu einem Gesamtoptimum. So kann zwar mittels Taktzeitplanungsmodells die Taktzeit für jede Route so bestimmt werden, dass die Transportnachfrage exakt gedeckt wird. Allerdings sind dann Überschneidungen im Routenzugfahrplan sowie dessen gute Ressourcenauslastung nicht garantiert. Andererseits kann während der Fahrplanplanung ein optimaler Fahrplan erzeugt werden, welcher dann jedoch u. U. zu wenige Touren zur Deckung der Transportnachfrage enthält. In der dritten Stufe wurden daher die Takt- und Fahrplanplanung zu einem Gesamtplanungsmodell zusammengeführt. Dieses wurde als ganzzahliges nichtlineares Optimierungsproblem formuliert und als „Integriertes Routenzugtakt-Problem“ bezeichnet. Zur Lösung dieses Problems wurde ein Branch & Bound Algorithmus präsentiert. Mithilfe dessen können die Taktzeiten der Routen und der Routenzugfahrplan derart bestimmt werden, dass:

- die gegebene Transportnachfrage gedeckt wird,
- die zulässigen Versorgungsintervalle eingehalten werden,
- überschneidungsfreie Abfahrzeiten an der Quelle (Routenzugbahnhof) gewährleistet sind, und
- der Fahrplan mit einer minimalen Anzahl an Mitarbeitern und Routenzügen ausgeführt werden kann.

Das integrierte Routenzugtakt-Problem wurde anhand zweier Anwendungsfälle aus der Automobilindustrie evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Forschungsergebnisse zu einer signifikanten Effizienzsteigerung beim Betrieb eines getakteten Routenzugsystems mit statischen Routen führen kann. In beiden betrachteten Anwendungsfällen kann die Anzahl an gleichzeitig aktiven Touren und damit die Anzahl notwendiger Ressourcen um 20 % (Anwendungsfall II) bis 33 % (Anwendungsfall I) reduziert werden. Das Routenzugtakt-Problem konnte für beide, sehr große Anwendungsfälle innerhalb sehr kurzer Zeit (28 Sekunden für Anwendungsfall I und 61 Sekunden für Anwendungsfall II) optimal gelöst werden. Dadurch ist die Anwendbarkeit für die operative Routenzugplanung, welche rollierend in vergleichsweise kurzen Abständen wiederholt werden muss, gegeben. Somit kann die übergeordnete Forschungsfrage und alle davon abgeleiteten Teilfragen positiv beantwortet werden.

Anforderungen, welche sich darüber hinaus an eine nutzerfreundliche Umsetzung des Modells ergeben, könnten durch Überarbeitung des in C# implementierten, integrierten Routenzugtakt-Problems umgesetzt werden. So könnten intuitiv bedienbare Benutzeroberflächen oder Schnittstellen zu tangierenden IT-Systemen wie bspw. Abrufsystemen oder Materialflussrechnern vorgesehen werden. Deren Implementierung war allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Im präsentierten Modell werden derzeit nur Überschneidungen im Routenzugbahnhof vermieden. Vergleichsweise einfach hingegen ließe sich der Routenzugfahrplan auch hinsichtlich Überschneidungsfreiheit an weiteren logistischen Strukturelementen wie beispielsweise Aufzügen oder Leergutsammelstellen optimieren. Hierzu müssen lediglich zusätzliche Nebenbedingungen im Routenzugfahrplan-Problem aufgenommen werden und es muss die Fahrzeit zu diesen Punkten bekannt sein. Erste Analysen der betrachteten, manuellen Routenzugsysteme haben jedoch gezeigt, dass insbesondere die Fahrzeiten zu diesen Punkten zu stark schwanken und die realen Ankunftszeiten an diesen Punkten nicht mit dem theoretisch ermittelten Optimum übereinstimmen. Schließlich hängen diese u. a. von der aktuellen Ladeliste (Anzahl Ladeeinheiten auf einer Tour und Anzahl an Haltestellen) ab. Im Routenzugbahnhof hat der Betreiber jedoch die Möglichkeit, die theoretisch ermittelten, optimalen Abfahrtszeiten zu „erzwingen“, bspw. durch zeitpunktgenaues Bereitstellen der Ladungsträger oder ein Ampelsystem. Anders würde es sich bei teil- oder vollautomatisierten Routenzugsystemen verhalten, welche aktuell in Wissenschaft und Praxis viel diskutiert werden. Hier könnten diese Zeitpunkte durch steuernde Eingriffe des Leitsystems erzwungen werden, bspw. indem Routenzüge gezielt verzögert werden oder durch Vorfahrtsregeln Verspätungen aufholen könnten. Dadurch ließen sich auch weitere logistische Strukturelemente gleichmäßiger ausgelastet werden. Offen bleibt aber die Frage, in

wie weit diese zusätzlichen Nebenbedingungen die Anzahl gleichzeitig aktiver Touren erhöhen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass ein Nachteil solcher Routenzugsysteme, nämlich die erhöhten Wartezeiten bei ungünstigem Verhältnis zwischen Takt- und Umlaufzeiten der Routen und mögliche Fahrplanüberschneidungen an vor- und nachgelagerten Prozessen, deutlich vermindert werden. Gleichzeitig profitieren Planer und Betreiber von einer einfacheren Plan- und Steuerbarkeit solcher Routenzugsysteme: Die Routenführung und Haltestellenzuordnung muss nicht laufend verändert werden, wie dies bei einer dynamischen Routenführung und / oder Abfahrtszeitsteuerung der Fall wäre. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob diese Steuerungsstrategien für den konkreten Anwendungsfall weitere Effizienzvorteile bieten würden und falls ja, wie groß dieser ausfallen würde. In der Literatur werden hierzu bereits Ansätze präsentiert, welche jedoch zum Teil von anderen Rahmenbedingungen ausgehen als sie in dem hier entwickelten Modell zugrunde gelegt wurden. So gehen einige Ansätze davon aus, alle Transportaufträge bereits zum Zeitpunkt der Planung zu kennen, um dadurch eine vorausschauende Tourenplanung erstellen zu können. Diese Voraussetzung ist in der Praxis, insbesondere bei Verwendung verbrauchgesteuerter Nachschubstrategien, derzeit häufig nicht gegeben. Im Rahmen einer exemplarischen Analyse könnten hier fiktive Zeitpunkte angenommen oder simuliert werden. Aber selbst, wenn diese dynamischen Strategien einen weiteren Effizienzvorteil bieten, bleibt offen, wie diese unter den Restriktionen realer Anwendungsfälle aktuell realisiert werden können. Allerdings werden in Wissenschaft und Industrie im Rahmen des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 derzeit Lösungen zur Digitalisierung, Vernetzung und Selbstorganisation der industriellen Produktion erarbeitet. Bei konsequenter Umsetzung könnten diese zukünftig die Grundlage für dynamische Steuerungsstrategien auch für Routenzugsysteme bilden.

Zusammenfassend wurde in der vorliegenden Arbeit ein Modell präsentiert, mithilfe dessen getaktete Routenzugsysteme mit statischen Routen operativ geplant und überplant werden können. Die Lösung des Modells erfolgt mittels Methoden der mathematischen Optimierung und liefert einen einsatzoptimalen Routenzugfahrplan. Die Umsetzung der entwickelten Berechnungszusammenhänge und Algorithmen in einer industriell nutzbaren Softwareumgebung kann wesentlich zur Effizienzsteigerung beim Betrieb solcher Routenzugsysteme beitragen.

Literaturverzeichnis

- [Abe-2009] Abele, E.; Brungs, F.: Optimierung der innerbetrieblichen Materialversorgung mittels Milkrun. In: *Industrie Management* (2009) Nr. 25, S. 61–64.
- [Ali-2004] Alisch, K.; Arentzen, U.; Winter, E.: *Gabler Wirtschaftslexikon*. Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l., 2004.
- [All-1999] Allgayer, F.: *Computergestützte Planung von Materialflusssystemen auf Basis statischer Materialflüsse*. Dissertation. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 1999.
- [Aln-2013] Alnahhal, M.; Noche, B.: Efficient material flow in mixed model assembly lines. In: *SpringerPlus*, Jg. 2 (2013), S. 415.
- [Aln-2015] Alnahhal, M.: *Efficient Material Flow in Mixed Model Assembly Lines*. Dissertation. Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Essen, 2015.
- [Arl-2012] Arlt, T.: *Neue Wege in der Automobillogistik bei BMW*, 21. Deutscher Materialfluss-Kongress. Vortrag. VDI Wissensforum GmbH, Garching bei München, 29.03.2012.
- [Arn-2008a] Arndt, H.: Einfluss der Megatrends auf die Logistik. In: Arndt, H. (Hrsg.): *Supply Chain Management*. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008, S. 8–26.
- [Arn-2008b] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer, Berlin, 2008.
- [Arn-2008] Arndt, H. (Hrsg.): *Supply Chain Management – Optimierung logistischer Prozesse*. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008.
- [Bat-2012] Battini, D.; Boysen, N.; Emde, S.: Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. In: *Journal of Management Control*, Jg. 24 (2012) Nr. 2, S. 209–217.

- [Bau-2004] Baudin, M.: Lean logistics – The nuts and bolts of delivering materials and goods. Productivity Press, New York, NY, 2004.
- [BAuA-ASR A1.8] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Technische Regeln für Arbeitsstätten - Verkehrswege Nr. ASR A1.8, 2012.
- [Bie-2004] Bierwirth, T.: Virtuelle Logistikplanung für die Automobilindustrie – Methoden und Modelle im Rahmen der Digitalen Fabrik. Techn. Univ., Diss.--Clausthal, 2003. Shaker, Aachen, 2004.
- [Ble-2009] Blessing, L. T.M.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, London, 2009.
- [BMW-2015] BMW Group: Routenplanung Werk Dingolfing. BMW Group, 2015.
- [BMW-2019a] BMW Syndikat: BMW Modelle - Baureihen - E-Tpen - Motoren. https://www.bmw-syndikat.de/bmwsyndikatforum/bmw_modelle.asp, Aufruf am 28.03.2019.
- [BMW-2019b] BMW Group: Modellhistorie. <https://www.bmwgroup-werke.com/regensburg/de/produkte/modellhistorie.html>, Aufruf am 28.03.2019.
- [Bok-2006] Bokranz, R.; Landau, K.; Becks, C. (Hrsg.): Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen – MTM-Handbuch. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2006.
- [Bop-2007] Boppert, J.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A.: Zukunftsorientierte Logistik durch adaptive Planung. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Neue Wege in der Automobillogistik : die Vision der Supra-Adaptivität ; mit 14 Tabellen. Springer, Berlin [u.a.], 2007, S. 345–357.
- [Bop-2008] Boppert, J.: Entwicklung eines wissensorientierten Konzepts zur adaptiven Logistikplanung. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2008.
- [Bor-2002] Borndörfer, R.; Löbel, A.; Weider, S.: Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im öffentlichen Nahverkehr. Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Konrad-Zuse-Zentrum f. Informationstechnik, Göttingen, Hannover, Berlin, 2002.

- [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) Nr. 1, S. 107–120.
- [Boz-2013] Bozer, Y. A.; Ciernoczolowski, 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) Nr. 2, S. 555–567.
- [Bri-1974] Brink, H.-J.; Fabry, P.: *Die Planung von Arbeitszeiten – Unter besonderer Berücksichtigung der Systeme vorbestimmter Zeiten*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1974.
- [Bru-2012] Brungs, F.: *Der Milkrun in der Produktionslogistik*. Dissertation. Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2012.
- [Bul-1994] Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1994.
- [Bul-2009] Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: *Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung*. Springer-Verlag, s.l., 2009.
- [Bur-1986] Burkard, R. E.: Optimal schedules for periodically recurring events. In: *Discrete Applied Mathematics*, Jg. 15 (1986) Nr. 2-3, S. 167–180.
- [Cao-2011] Cao, H.; Folan, P.: Product life cycle – The evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. In: *Production Planning & Control*, Jg. 23 (2011) Nr. 8, S. 641–662.
- [Cho-2002] Choi, W.; Lee, Y.: A dynamic part-feeding system for an automotive assembly line. In: *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 43 (2002) Nr. 1-2, S. 123–134.
- [Cie-2013] Ciernoczolowski, 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) Nr. 2, S. 568–581.

- [Con-2014] Conze, M. H.: Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge zur schlanken Versorgung der Automobilmontage. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2014.
- [Cos-2008] Costa, B.; Dias, L. S.; Oliveira, J. A.; Pereira, G.: Simulation as a tool for planning a material delivery system to manufacturing lines. In: IEEE (Hrsg.): IEEE International Engineering Management Conference (IEMC-Europe 2008), 2008, S. 1–5.
- [Dad-1995] Daduna, J. R.; Voß, S.: Practical Experiences in Schedule Synchronization. In: Fandel, G.; Trockel, W.; Daduna, J. R.; Branco, I.; Paixão, J. M. P. (Hrsg.): Computer-Aided Transit Scheduling. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1995, S. 39–55.
- [Dan-2013] Daniel, M. W.: Umsetzung neuer Prozesse im Brose-Werk Tschechien – ein Erfahrungsbericht. In: Günthner, W. A.; Boppert, J. (Hrsg.): Lean Logistics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 213–226.
- [DeGEval-2002] DeGEval - Gesellschaft für Evaluation e.V.: Standards für Evaluation, 2002.
- [Des-2007] Desaulniers, G.; Hickman, M. D.: Public Transit. In: Barnhart, C.; Laporte, G. (Hrsg.): Transportation. Elsevier North-Holland, Amsterdam, 2007, S. 69–127.
- [Dew-2012a] Dewitz, M.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Drive-Thru Loading Concept for InPlant Milk Runs. In: Bošnjak, S.; Kartnig, G.; Znić, N. (Hrsg.): MHCL'12. University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2012, S. 237–242.
- [Dew-2012b] Dewitz, M.: Umsetzung eines automatischen Routenzug-Beladekonzeptes für die Produktionsversorgung. Diplomarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2012.
- [Dew-2013] Dewitz, M.; Günthner, W. A.: Routenzug ist nicht gleich Routenzug. In: F + H Fördern und Heben, Jg. 2013 (2013), S. 38–41.
- [Dew-2014] Dewitz, M.; Günthner, W. A.; Arlt, T.: Fahrplanoptimierung für innerbetriebliche Routenverkehre. In: Logistics Journal: Proceedings (2014)

- [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), S. 16–19.
- [DIN EN-66001] Deutsches Institut für Normung: Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung. DIN EN Nr. 66001, 1983.
- [Dom-1989] Domschke, W.: Schedule synchronization for public transit networks. In: OR Spectrum, Jg. 11 (1989) Nr. 1, S. 17–24.
- [Dom-1992] Domschke, W.; Forst, P.; Voß, S.: Tabu Search Techniques for the Quadratic Semi-Assignment Problem. In: Fandel, G.; Gullledge, T.; Jones, A. (Hrsg.): New Directions for Operations Research in Manufacturing. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1992, S. 389–405.
- [Dre-2009] Dreher, S.; Nürnberger, A.; Kulus, D.: Routenzugoptimierung in der Produktionslogistik. In: ZWF, Jg. 104 (2009) Nr. 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: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Berlin/Heidelberg/New York, 2011, S. 605–610.
- [Dro-2013a] Droste, M.: Mathematische Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Optimierung der produktionsbezogenen Materialversorgung (OptiMilk) – Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 17159 N. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund, Dortmund, 2013.
- [Dro-2013b] Droste, M.: Parameterbasierte Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Dissertation. Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund, Herzogenrath, 2013.
- [Dyc-1990] Dyckhoff, H.: A typology of cutting and packing problems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 44 (1990) Nr. 2, S. 145–159.
- [Emd-2012a] Emde, S.; Fliedner, M.; Boysen, N.: Optimally loading tow trains for just-in-time supply of mixed-model assembly lines. In: IIE Transactions, Jg. 44 (2012) Nr. 2, S. 121–135.

- [Emd-2012b] Emde, S.; Boysen, N.: Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. In: *European Journal of Operational Research* (2012) Nr. 217, S. 287–299.
- [Emd-2015] Emde, S.; Gendreau, M.: Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines, CIRRELT working paper 2015-50, 2015.
- [EN-13626] Europäisches Komitee für Normung: Boxpaletten. EN Nr. 13626, 2003.
- [EN-13698] Europäisches Komitee für Normung: Produktspezifikation für Paletten. EN Nr. 13698, 2003.
- [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) Nr. 2, S. 187–208.
- [Fat-2014] Fathi, M.; Alvarez, M. J.; Hassani Mehraban, F.; 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) Nr. 1, S. 1–12.
- [fml-2015a] fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München: Transporteinheit – Eintrag im Logistikkompedium. http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=945&letter=T&title=Transporteinheit, Aufruf am 09.11.2015.
- [fml-2015b] fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München: Transportmittel – Eintrag im Logistikkompedium. http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=945&letter=T&title=Transportmittel, Aufruf am 02.12.2015.
- [Fon-2013] Fontius, J.: Megatrends und ihre Implikationen für die Logistik – Ableitung von Wirkungszusammenhängen. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2013. Univ.-Verl. der TU Berlin, Berlin, 2013.
- [Fre-2006] Frey, D. D.; Dym, C. L.: Validation of design methods – Lessons from medicine. In: *Research in Engineering Design*, Jg. 17 (2006) Nr. 1, S. 45–57.

- [Fri-2010] Friedemann, S.; Schumann, M.: Der Umgang mit Unsicherheit in der Produktion bei der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen – State of the Art. Arbeitsbericht. Institut für Wirtschaftsinformatik, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, 2010.
- [Fri-2013] Friedrich, A.: Hybrides Vorgehensmodell der innerbetrieblichen Fördersystemwahl – Entwicklung und Überprüfung eines Modells zur Unterstützung von Planungs- und Investitionsentscheidungen für Fördersysteme im betriebsinternen Materialfluss kleiner und mittelständischer Unternehmen. Dissertation. Institut für Grundlagen des Bauens und Planungsmanagement (IGB), Universität Leipzig, Leipzig, 2013.
- [Gal-2013] Galka, S.; Dewitz, M.; Günthner, W. A.: Drive-Thru für Routenzüge Effizienzsteigerung bei der Beladung von Routenzügen mit Kleinladungsträgern. In: free beratung GmbH (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2013, Korschbroich, 2013, S. 128–132.
- [Gal-2015] Galka, S.; Klenk, E.; Günthner, W. A.; Trautzsch, D.; Vogel-Daniel, C.: Exakt im Takt – Optimales Zusammenspiel von Automatiklagern und Routenzügen. In: Industrie Management, Jg. 2015 (2015), S. 57–60.
- [Gen-2003] Genç, Z.: Ein neuer Ansatz zur Fahrplanoptimierung im ÖPNV. Dissertation, Universität zu Köln, Köln, 2003.
- [Goe-1997] Goedel, H.: Gestaltung der Planung – Konzeptioneller Ansatz und Fallstudien. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1997.
- [Gol-2012] Golz, J.; 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) Nr. 2, S. 119–141.
- [Gru-2015] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung – Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. Hanser, München, 2015.
- [Gud-2011] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Gul-1980] Guldan, F.: Maximization of distances of regular polygons on a circle. In: Aplikace matematiky, Jg. 25 (1980) Nr. 3, S. 182–195.

- [Gün-2007] Günthner, W. A.; Meißner, S.; Grinninger: Komplexitätsbeherrschung in der Automobilfertigung durch Analyse und Optimierung der Auftragssteuerungsprozesse. In: Bruns, R. (Hrsg.): Tagungsbeiträge zum 3. Fachkolloquium der WGTL. Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik, 2007, S. 79–90.
- [Gün-2012] Günthner, W. A.; Klenk, E.; Galka, S.; Knössl, T.; Dewitz, M.: Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport – Ergebnisse einer Studie. fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, München, 2012.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E.: Schlanke Logistikprozesse – Handbuch für den Planer. Springer Vieweg, Berlin, 2013.
- [Gün-2015a] Günthner, W. A.; Dewitz, M.; Arlt, T.: Erstellung von Fahrplänen für getaktete Routenzüge – Der Verbrauch bestimmt den Takt. In: f+h, Jg. 65 (2015) Nr. 1-2/2015, S. 16–19.
- [Gün-2015b] Günthner, W. A.: Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2015.
- [Gün-2016] Günthner, W. A.; Keuntje, C.: IntegRoute – Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung – Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 18136 N. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [Hal-1969] Haller-Wedel, E.: Das Multimoment-Verfahren in Theorie und Praxis – Ein statistisches Verfahren zur Untersuchung von Vorgängen in Industrie, Wirtschaft und Verwaltung ; mit 71 Tafeln und einem Sonderrechenstab. Hanser, München, 1969.
- [Hel-2010] Helton, J. C.; Johnson, J. D.; Oberkampf, W. L.; Sallaberry, C. J.: Representation of analysis results involving aleatory and epistemic uncertainty. In: International Journal of General Systems, Jg. 39 (2010) Nr. 6, S. 605–646.
- [Hof-2014] Hoffmann, K.-H.; Witterstein, G.: Mathematische Modellierung. Springer Basel, Basel, 2014.
- [Hom-2008] Hompel, M. ten; Hömberg, K.: Übersicht analytischer Berechnungsverfahren in Kommissioniersystemen. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge

- zu einer Theorie der Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 391–408.
- [Hur-1996] Hurink, J.: Polygon scheduling. In: *Discrete Applied Mathematics*, Jg. 70 (1996) Nr. 1, S. 37–55.
- [Ish-1986] Ishikawa, K.: *Guide to quality control*. Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.
- [ISO-3394] Internationale Organisation für Normung: Verpackung - Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Maße von starren rechteckigen Verpackungen. ISO-Norm Nr. 3394, 2012.
- [ISO-5053] Internationale Organisation für Normung: Flurförderzeuge mit eigenem Antrieb - Benennungen. ISO-Norm Nr. 5053, 1987.
- [Jor-2011] Jordan, M.: Start für das Automatisierte Kleinteilelager im Mercedes-Benz Werk Wörth. <http://blog.mercedes-benz-pas-sion.com/2011/06/start-fur-das-automatisierte-kleinteilelager-im-mercedes-benz-werk-worth/#comments>, Aufruf am 02.12.2015.
- [Kal-2013] Kallrath, J.: *Gemischt-ganzzahlige Optimierung – Modellierung in der Praxis ; mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*. Springer, Wiesbaden, 2013.
- [Kar-2007] Karjalainen, I.; Domingo, R.; Alvarez, R.; Melodía Peña, M.; Calvo, R.: Materials flow improvement in a lean assembly line – A case study. In: *Assembly Automation*, Jg. 27 (2007) Nr. 2, S. 141–147.
- [Keu-2014] Keuntje, C.; Dewitz, M.; Günthner, W. A.; Schmidt, F.: Mehr Transparenz – Routenzugauswahl - Mehr als eine Investitionsentscheidung. In: *Logistik Heute* (2014) Nr. 36, S. 26–27.
- [Kil-2012] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.; Baskak, M.: Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 62 (2012) Nr. 9-12, S. 1135–1146.
- [Kin-2005] Kinkel, S.: *Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen – Wie verändern sich Variantenzahlen, Losgrößen, Materialeinsatz, Genauigkeitsanforderungen und Produktlebenszyklen tatsächlich?* ISI, Karlsruhe, 2005.

- [Kla-2009] Klaus, P.: Gabler Lexikon Logistik. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2009.
- [Kle-2015a] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Operating Strategies for In-Plant Milk-Run Systems. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 48 (2015) Nr. 3, S. 1882–1887.
- [Kle-2015b] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Potenziale einer flexiblen Routenzugsteuerung – Strategien zum besseren Umgang mit schwankenden Transportbedarfen. In: ZWF (2015) Nr. 110, S. 805–809.
- [Kle-2017] Klenk, E. M.: Ein analytisches Modell zur Bewertung der Leistung von Routenzugsystemen bei schwankenden Transportbedarfen. Dissertation, Technische Universität München, 2017.
- [Klu-2010] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Kri-1996] Krista, M. (Hrsg.): Verfahren zur Fahrplanoptimierung – Dargestellt am Beispiel der Synchronzeiten. Inst. für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, Braunschweig, 1996.
- [Kuz-2019] Kuzmany, Florian. Expertengespräch am 16.08.2019.
- [Las-2015] Laschinger, K.; Mass, C.; Günthner, W. A.: Flexible Container Filling Quantities – A Measure for Logistics Flexibility in the Automotive Industry. Vortrag. Molde University College, Molde, Norwegen, 04-05.06.2015.
- [Lie-2017] Lieb, C.; Klenk, E.; Galka, S.; Keuntje, C.: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung – Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Garching b. München, 2017.
- [Lin-2012] Lindemann, U.: Forschungsmethodik in den Ingenieurwissenschaften. Hochschulsriptum. Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, München, 2012.
- [Mar-2014] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.

- [Mei-2009] Meißner, S.: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2009.
- [Mei-2013] Meindl, B.; Templ, M.: Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems (2013)
- [Mil-2008] Miles, M. B.; Huberman, A. M.: Qualitative data analysis – An expanded sourcebook. Sage, Thousand Oaks, Calif., 2008.
- [Mol-1997] Mollemeier, A.: Integrierte Steuerung getakteter Variantenfließlinien. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1997.
- [Nac-1996] Nachtigall, K.; Voget, S.: A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization. In: Computers & Operations Research, Jg. 23 (1996) Nr. 5, S. 453–463.
- [Nac-2008] Nachtigall, K.; Opitz, J. (Hrsg.): Solving Periodic Timetable Optimisation Problems by Modulo Simplex Calculations, 2008.
- [Nyh-2012] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.; Fiege, T.; Mühlenbruch, H.: Materialbereitstellung in der Montage. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 285–313.
- [Opi-2009] Opitz, J.: Automatische Erzeugung und Optimierung von Taktfahrplänen in Schienenverkehrsnetzen. Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [Pio-2013] Piontek, J.: Bausteine des Logistikmanagements – [Supply Chain Management, E-Logistics, Logistikcontrolling, Green Logistics, Logistikinstrumente]. NWB-Verl., Herne, 2013.
- [REF-1997] REFA: Datenermittlung. Hanser, München, 1997.
- [Reg-2011] Reggelin, T.; Tolujew, J.: A mesoscopic approach to modeling and simulation of logistics processes. In: Jain, S.; Creasey, R. R.; Himmelpach, J.; White, P. P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, S. 1508–1518.
- [Sat-2013] 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: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 65 (2013) Nr. 1-4, S. 319–332.

- [Saw-2003] Sawilowsky, S. S.: You Think You've Got Trivials? In: Journal of modern applied statistical methods (JMASM), Jg. 2 (2003) Nr. 1, S. 218–225.
- [Sch-2008a] Schedlbauer, M. J.: Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2008.
- [Sch-2008b] Schneider, M.; Hainzinger, F.; Otto, A.: Logistikplanung in der Automobilindustrie – Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor "Start-of-Production" im Rahmen der Digitalen Fabrik. Gabler Verlag, s.l., 2008.
- [Sch-2010] Schlick, C. M.; Luczak, H.; Bruder, R.: Arbeitswissenschaft. Springer, Heidelberg, 2010.
- [Ser-1989] Serafini, P.; Ukovich, W.: A Mathematical Model for Periodic Scheduling Problems. In: SIAM Journal on Discrete Mathematics, Jg. 2 (1989) Nr. 4, S. 550–581.
- [Sma-2004] Smalley, A.; Womack, J.: Creating level pull – A lean production-system improvement guide for production-control, operations, and engineering professionals ; a lean toolkit method and workbook. Lean Enterprise Inst, Brookline, Mass., 2004.
- [Sta-2013] 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, 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.; Fadda, P.; Fancello, G.; Piera, M. A. (Hrsg.): The 8th international Workshop on applied Modeling & Simulation, 2015, S. 34–43.
- [Sta-2018] Statistisches Bundesamt: Arbeitskosten im Produzierenden Gewerbe Arbeitskosten im Produzierenden Gewerbe und im Dienstleistungsbereich – Ergebnisse für Deutschland. https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitskosten-Lohnnebenkosten/_inhalt.html, Aufruf am 28.10.2019.

- [Sta-2019] Statista GmbH: Anzahl der produzierten Autos durch die BMW Group in den Jahren 2005 bis 2018. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/220369/umfrage/automobilproduktion-von-bmw/>, Aufruf am 28.03.2019.
- [Ste-2019] Stepstone: Fachkraft Lagerlogistik Gehälter in Deutschland, Aufruf am 15.08.2019.
- [Suh-2013] Suhl, L.; Mellouli, T.: Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Springer Gabler, Berlin, 2013.
- [Sun-2014] Sunk, A.; Nemeth, T.; Edtmayr, T.; Kuhlang, P.; Sihn, W.: Modellierung logistischer Prozesse als Grundlage systematischer Verbesserungsarbeit. In: Zsifkovits, H. E.; Altendorfer-Kaiser, S. (Hrsg.): Logistische Modellierung. Rainer Hampp Verlag, Mering, 2014, S. 15–30.
- [Tak-2013] Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem – Just-in-time für das ganze Unternehmen. Vahlen, München, 2013.
- [Tem-2006] Tempelmeier, H.: Material-Logistik – Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen ; mit 127 Tabellen. Springer, Berlin, 2006.
- [Tes-2019] Teschemacher, U. S.; Reinhart, G.: Dynamische Routenzugoptimierung bei kurzfristigen Materialabrufen. Universitätsbibliothek der TU München, München, 2019.
- [Tre-2019] Treichel, A.: BMW Fahrzeug Codes (Entwicklungscodes). <https://www.bimmerarchiv.de/e-code/>, Aufruf am 28.03.2019.
- [Ulbr-2010] Ulbrich, A.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Secure Planning of Order Picking Systems with the Aid of Simulation. In: Proceedings of the Forty-Third Annual Hawaii International Conference on System Sciences (2010), S. 1530–1605.
- [Vai-1999] Vaidyanathan, B. S.; Matson, J. O.; Miller, D. M.; Matson Jack E.: A capacitated vehicle routing problem for just-in-time delivery. In: IIE Transactions, Jg. 31 (1999) Nr. 11, S. 1083–1092.
- [VDA-4500] Verband der Automobilindustrie: Kleinladungsträger (KLT)-System. VDA-Empfehlung Nr. 4500, 2014.

- [VDA-5010] Verband der Automobilindustrie: Standardbelieferungsformen. VDA-Empfehlung Nr. 5010, 2008.
- [VDI-2406] Verein Deutscher Ingenieure: Anhänger für Flurförderzeuge. VDI-Richtlinie Nr. 2406, 2013.
- [VDI-2498] Verein Deutscher Ingenieure: Vorgehen bei einer Materialflussplanung - Grundlagen. VDI-Richtlinie Nr. 2498 Blatt 1, 2011.
- [VDI-3633a] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. VDI-Richtlinie Nr. 3633 Blatt 1, 2016.
- [VDI-3633b] VDI Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen; Verifikation und Validierung. VDI-Richtlinienentwurf Nr. 3633 Blatt 13, 2019.
- [VDI-3978] Verein Deutscher Ingenieure: Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen. VDI-Richtlinie Nr. 3978, 1998.
- [VDI-5586] Verein Deutscher Ingenieure: Routenzugsysteme - Planung und Dimensionierung. VDI-Richtlinienentwurf Nr. 5586 Blatt 2, 2016.
- [Vin-1989] Vince, A.: Scheduling periodic events. In: Discrete Applied Mathematics, Jg. 25 (1989) Nr. 3, S. 299–310.
- [Voß-1992] Voß, S.: Network Design Formulations in Schedule Synchronization. In: Beckmann, M.; Krelle, W.; Desrochers, M.; Rousseau, J.-M. (Hrsg.): Computer-Aided Transit Scheduling. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1992, S. 137–152.
- [Wan-2010] Wannowetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik – Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Wäs-2007] Wäscher, G.; Haußner, H.; Schumann, H.: An improved typology of cutting and packing problems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 183 (2007) Nr. 3, S. 1109–1130.
- [Weg-1993] Wegener, I.: Theoretische Informatik – Eine algorithmenorientierte Einführung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1993.

- [Wei-2004] Weidt, S.: Intraorganisationales Kompetenzmanagement für die Logistikplanung. Dissertation. Lehrstuhl für Unternehmenslogistik, Universität Dortmund, Dortmund, 2004.
- [Wer-2013] Werner, H.: Supply Chain Management – Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. Springer, Wiesbaden, 2013.
- [Wil-2006] Wildemann, H.; Niemeyer, A.: Das Milkrun-Konzept: Logistikkostensenkung durch auslastungsorientierte Konsolidierungsplanung. http://www.tcw.de/uploads/html/publikationen/aufsatz/files/Logistikkostensenkung_Milkrun_Niemeyer.pdf, Aufruf am 26.10.2015.
- [Wil-2011] Wilke, J.: Supply Chain Koordination durch Lieferverträge mit rollierender Mengenflexibilität – Eine Simulationsstudie am Beispiel von Lieferketten der deutschen Automobilindustrie. Dissertation. Lehrstuhl für betriebswirtschaftliche Informationssysteme, Universität Paderborn, Paderborn, 2011.
- [Zäp-1998] Zäpfel, G.; Piekarz, B.: Regelkreisbasiertes Supply Chain Controlling. In: Wildemann, H. (Hrsg.): Innovationen in der Produktionswirtschaft. TCW Transfer-Centrum Verl., München, 1998, S. 45–96.

Durch den Autor betreute studentische Arbeiten

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
[fml-2013a]	Ganzheitliche Bewertung von technischen Lösungen zur Materialbereitstellung von Großladungsträgern durch innerbetriebliche Routenverkehre	Keuntje, Christopher	Masterarbeit	2013/02
[fml-2013b]	Materialflusskonzeption und –simulation zur Absicherung und Entwicklung von Strukturvarianten bei der Planung der Routenzugversorgung eines Greenfield-Werkes der BMW Group	Lauritz, Andreas	Diplomarbeit	2013/03
[fml-2013c]	Simulative Untersuchung eines komplexen automatischen Materialflusssystems im Kontext der Routenzug-Montageversorgung für die Werke der BMW-Group	Röschinger, Markus	Diplomarbeit	2013/05
[fml-2013d]	Simulative Untersuchung der Produktionsversorgung mittels getakteten Routenzügen im Bereich der automobilen Endmontage	Rousseau, Pierre-Marie	Masterarbeit	2013/10
[fml-2015c]	Optimierungsmethoden für Taktfahrpläne und Routenzüge	Schmid, Tobias	Bachelorarbeit	2015/01
[fml-2015d]	Fahrplanoptimierung für innerbetriebliche Routenverkehre mittels Periodic Event Scheduling	Knaus, Alexander	Masterarbeit	2015/03
[fml-2016]	Planung innerbetrieblicher Routenverkehre durch den Einsatz von exakten und heuristischen Verfahren	Platzer, Jona Malte	Masterarbeit	2016/04

Abbildungsverzeichnis

Hauptteil

Abbildung 1-1: Anzahl produzierter Fahrzeuge und Anzahl angebotener Modellreihen bezogen auf das Vergleichsjahr 2005 am Beispiel der BMW Group [Sta-2019; Tre-2019; BMW-2019b; BMW-2019a]	2
Abbildung 1-2: Wirkmodell der Megatrends auf die Produktionslogistik (basierend auf [Fon-2013; Arl-2012; Arn-2008a])	3
Abbildung 2-1: Standardbelieferungskonzepte in Anlehnung an [Klu-2010, S. 224]	10
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Routenzugsystems sowie verwendeter Begriffe (eigene Darstellung)	14
Abbildung 2-3: Materialflusseinheiten innerhalb eines Routenzugsystems (eigene Darstellung)	15
Abbildung 2-4: Anhängerbauformen für Routenzüge (eigene Darstellung)	22
Abbildung 2-5: Vorgehensmodelle zur taktischen Planung logistischer Systeme allgemein und Routenzugsystemen im Speziellen (in Anlehnung an [All-1999, S. 36ff.], [Gün-2012, S. 31ff.], [Bop-2007, S. 349ff.] und [Bru-2012, S. 40ff.])	25
Abbildung 2-6: Operative Planungsaufgaben im Rahmen der Beschaffungs- und Produktionslogistik in der Automobilindustrie (in Anlehnung an [Boy-2015])	27
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Folgen von Prozessunsicherheiten (links) und Nachfrageunsicherheiten (rechts) (eigene Darstellung)	36
Abbildung 3-2: Ishikawa-Diagramm zu Prozessunsicherheiten innerhalb eines Routenzugsystems (eigene Darstellung)	37
Abbildung 3-3: Ishikawa-Diagramm zu Nachfrageunsicherheiten hinsichtlich der mittleren Transportnachfrage und untertägiger Schwankungen (eigene Darstellung)	38
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Modells zur operativen Routenzugplanung sowie den darin enthaltenen Teilplanungsaufgaben (eigene Darstellung)	49
Abbildung 4-2: Beispielhafter Fahrplan für ein Routenzugsystem mit 2 Routen, wenn diese mit der auslastungsoptimalen Taktzeit gefahren werden (links) und wenn die Taktzeit einer Route reduziert würde (rechts) (eigene Darstellung)	51
Abbildung 5-1: Exemplarische Bestandsverläufe und Ladungsträgerreichweiten bei unterschiedlichen Verbauquoten (eigene Darstellung)	56

Abbildung 5-2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Packschemen (eigene Darstellung)	57
Abbildung 6-1: Entscheidungsbaum ob ein Routenzug an einer Haltestelle anhält oder diese ohne Halt passiert (eigene Darstellung)	73
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Laufwege an einer Haltestelle am Beispiel eines Schleppers mit mehreren Anhängern (eigene Darstellung)	73
Abbildung 6-3: Exemplarische Darstellung eines Fahrplans dreier Routen mit gleicher Taktzeit auf einem absoluten Zeitstrahl (links), sowie der Routenreihenfolge innerhalb eines Systemtakts (rechts)	78
Abbildung 6-4: Exemplarische Darstellung eines Fahrplans dreier Routen mit unterschiedlichen Taktzeiten auf einer Taktuhr ohne Startzeitversatz (links), sowie auf einer s.g. Polygon-Uhr mit Startzeitversatz (rechts)	79
Abbildung 6-5: Exemplarischer PESP-Graph bestehend aus 3 Haltestellen und 3 Fahrten zwischen diesen Haltestellen (eigene Darstellung)	82
Abbildung 6-6: Zwei mögliche Fahrpläne mit maximalem Sicherheitsabstand (eigene Darstellung)	86
Abbildung 6-7: Eine optimale Lösung des Sicherheitsabstandsproblems mit zugehörigem, nicht optimalem Einsatzplan (eigene Darstellung)	87
Abbildung 6-8: Eine nicht-optimale Lösung des Sicherheitsabstandsproblems mit zugehörigem, optimalem Einsatzplan (eigene Darstellung)	88
Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Lösungssuche nach dem Simplex-Verfahren (links) und der Inneren-Punkt-Methode (rechts) [Kal-2013, S. 72]	93
Abbildung 6-10: Schematischer Ablauf des Branch & Bound Verfahrens für ein ILP mit 2 Variablen (eigene Darstellung)	95
Abbildung 6-11: Lösungen der Testinstanzen: Gefundene Optima, negative Werte für Min C zeigen an, dass keine gültige Lösung gefunden wurde (eigene Darstellung)	103
Abbildung 6-12: Lösungen der Testinstanzen: Rechenzeiten zur Ermittlung der gefundenen Optima (eigene Darstellung)	104
Abbildung 6-13: Durchschnittliche Rechenzeiten bei Veränderung der Anzahl an Routen und Fahrten (eigene Darstellung)	106
Abbildung 6-14: Werte der aktuell besten Lösung und unteren Schranke über die Laufzeit des Branch & Bound Algorithmus am Beispiel eines Routenzugsystems mit 9 Routen und 24 Fahrten und einer Zeitschrittlänge von 10 s (eigene Darstellung)	107
Abbildung 6-15: Durchschnittliche Rechenzeit zur Lösung der Testinstanz I bei Veränderung der Anzahl an Routen und Fahrten bei unterschiedlichen Zeitschrittlängen unter Verwendung des	

	angepassten Routenzugfahrplan-Problems (eigene Darstellung)	109
Abbildung 7-1:	Programmablaufplan des Branch & Bound Algorithmus zur Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems (eigene Darstellung)	118
Abbildung 7-2:	Lösungsbaum der Testinstanz nach Abschluss der ersten Branch & Bound Iteration (eigene Darstellung)	123
Abbildung 7-3:	Lösungsbaum der Testinstanz nach Abschluss der zweiten Branch & Bound Iteration (eigene Darstellung)	124
Abbildung 7-4:	Lösungsbaum der Testinstanz nach Abschluss der siebten Branch & Bound Iteration (eigene Darstellung)	125
Abbildung 8-1:	Layout der Fahrzeugmontage im BMW Werk Dingolfing [BMW-2015]	131
Abbildung 8-2:	Schematische Darstellung der Produktionsversorgung im BMW Montagewerk Dingolfing (eigene Darstellung)	132
Abbildung 8-3:	Foto der Routenzugbeladung im BMW Montagewerk Dingolfing [Dew-2015]	134
Abbildung 8-4:	Schematische Darstellung der Teilprozesse zur KLT-Versorgung (eigene Darstellung)	135
Abbildung 8-5:	Takt- und Umlaufzeiten der Routen aus Anwendungsfall I und die sich daraus ergebende Wartezeiten je Route im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ und statischer Fahrzeugzuordnung (eigene Darstellung)	140
Abbildung 8-6:	Schematische Darstellung der Teilprozesse zur GLT-Sequenzversorgung (eigene Darstellung)	142
Abbildung 8-7:	Takt- und Umlaufzeiten der Routen aus Anwendungsfall II und die sich daraus ergebende Wartezeiten je Route im Szenario „Maximale Kapazitätsauslastung“ und statischer Fahrzeugzuordnung (eigene Darstellung)	147
Abbildung 8-8:	Gegenüberstellung der Fahrplanwirkungsgrade bei maximaler Kapazitätsauslastung, statischer Fahrzeugzuordnung und der Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems (eigene Darstellung)	149

Anhang

Abbildung C-1:	Balkendiagramm eines optimalen Fahrplans für Anwendungsfall I: Jeder Balken repräsentiert die Dauer einer Tour auf der jeweiligen Route. Die Belegungszeit des Bahnhofs am Start der Tour ist schwarz eingefärbt.	C-1
Abbildung D-1:	Balkendiagramm eines optimalen Fahrplans für Anwendungsfall II: Jeder Balken repräsentiert die Dauer einer Tour auf der	

jeweiligen Route. Die Belegungszeit des Bahnhofs am Start der
Tour ist schwarz eingefärbt. D-1

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 1-1:	Veröffentlichungen des Autors mit Bezug zu den Inhalten dieser Arbeit	6
Tabelle 2-1:	Morphologie Transporteinheit	16
Tabelle 2-2:	Morphologie Routenzugprozess	18
Tabelle 2-3:	Morphologie Routenzugsteuerung	21
Tabelle 2-4:	Morphologie Transporttechnik	23
Tabelle 2-5:	Übersicht zu Modellen und Methoden zur Routenzugplanung sowie deren Zielgrößen und Restriktionen	34
Tabelle 3-1:	Abgleich der Modelle und Methoden zur Routenzugplanung mit den Anforderungen an die operative Planung getakteter Routenzugsysteme mit statischen Routen	44
Tabelle 5-1:	Berechnung der Anzahl Ladepositionen pro VDA-KLT basierend auf dem Beispiel in Abbildung 5-2	59
Tabelle 6-1:	Beispielhafter Suchraum zur Bestimmung des minimalen Sicherheitsabstands	85
Tabelle 6-2:	Beispielhafter Suchraum zur Bestimmung des Maximums gleichzeitig aktiver Touren	90
Tabelle 6-3:	Testinstanzen und deren grafisch ermittelte, optimale Lösungen inkl. Darstellung der Touren in einem Zeitstrahl (blau = Route R1, orange = Route R2, grün = Route R3)	101
Tabelle 7-1:	Eingangsdaten für die Testinstanz des integrierten Routenzugtakt-Problems	122
Tabelle 8-1:	Routenkonfiguration Anwendungsfall I	137
Tabelle 8-2:	Takt- und Umlaufzeiten der Routen für Anwendungsfall I bei maximaler Kapazitätsauslastung sowie bei der Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems	138
Tabelle 8-3:	Gegenüberstellung der Arbeitskosten und Investitionen des Routenzugsystems bei statischer Fahrzeugzuordnung gegenüber der Anwendung des integrierten Modells zur Taktzeit- und Fahrplanplanung für Anwendungsfall I	141
Tabelle 8-4:	Routenkonfiguration Anwendungsfall II	143
Tabelle 8-5:	Takt- und Umlaufzeiten der Routen für Anwendungsfall II bei maximaler Kapazitätsauslastung sowie bei der Lösung des integrierten Routenzugtakt-Problems	145

Tabelle 8-6:	Gegenüberstellung der Arbeitskosten und Investitionen des Routenzugsystems bei statischer Fahrzeugzuordnung gegenüber der Anwendung des integrierten Modells zur Taktzeit- und Fahrplanplanung für Anwendungsfall II	148
--------------	--	-----

Anhang

Tabelle B-1:	Einordnung der Anwendungsfälle in die in Abschnitt 2.2 erarbeitete Routenzugsystem-Morphologie	B-1
--------------	--	-----

Anhang A Hard- und Softwarespezifikation der Testumgebung

Alle in dieser Arbeit angeführten Instanzen des Routenzugfahrplan-Problems und des integrierten Routenzugtakt-Problems wurden mittels der folgenden Hard- und Software gelöst:

Hardware	Modell
Arbeitsspeicher	16 GB
Festplatte	Samsung SSD 850 EVO 250GB
Prozessor	Intel(R) Core(TM) i5-4690 CPU, 3.50GHz

Software	Version
Betriebssystem	Microsoft Windows 10 Professional
Optimierungssoftware	IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.8.0.0
Programmierungsumgebung	Microsoft Visual Studio Community 2017 Version 15.9.8
	Microsoft .NET Framework Version 4.8.03752

Anhang B Einordnung der Anwendungsfälle in die Routenzugsystem-Morphologie

Tabelle B-1: Einordnung der Anwendungsfälle in die in Abschnitt 2.2 erarbeitete Routenzugsystem-Morphologie

		Anwendungsfall I: Bereitstellung von Kleinladungsträgern mit sortenreinem Material	Anwendungsfall II: Bereitstellung von Großladungsträgern mit sequenzierbarem Material
Transporteinheit			
Bereitstelleinheit		Standard-KLT	Spezial-GLT
Ladehilfsmittel 2. Stufe		Spezial-GLT	Nicht vorhanden
Transporthilfsmittel		Nicht vorhanden	Trolley
Routenzugprozess			
Transportrelation		Verteiltransport (1:m)	Verteiltransport (1:m)
Routenzugbeladung	Prozessschnittstelle an Quelle(n)	Automatisiertes Lager	Pufferfläche
	Art der Kommissionierung	Vorgepuffert	Vorgepuffert
	Anzahl Handhabungsstufen	2-stufig	2-stufig
Routenzugentladung	Prozessschnittstelle an Senke(n)	Arbeitsplatz	Arbeitsplatz
	Art der Feinverteilung	Als Teil der Tour	Als Teil der Tour
	Leergutabwicklung	1:1-Tausch	1:1-Tausch

Routenzugsteuerung			
Nachschubsteuerung	Bedarfsgesteuert und Verbrauchsgesteuert	Bedarfsgesteuert	
Transportauftragsdisposition	FiFo	FiFo	
Festlegung Abfahrtszeitpunkte	Fester Zeitpunkt - Getaktet	Fester Zeitpunkt - Getaktet	
Routenführung	Statisch	Statisch	
Fahrzeugzuordnung	Variabel	Variabel	
Transporttechnik			
Art des Flurförderzeugs	Schlepper	Schlepper	
Anhänger	Bauform	C-Frame	C-Frame
	Beladeseite	Einseitig	Einseitig
	Entladeseite	Festgelegt durch Beladeseite	Festgelegt durch Beladeseite
	Lenksystem	Einachsige Anhänger (ungelenkt)	Einachsige Anhänger (ungelenkt)

Anhang C Optimaler Fahrplan für Anwendungsfall I

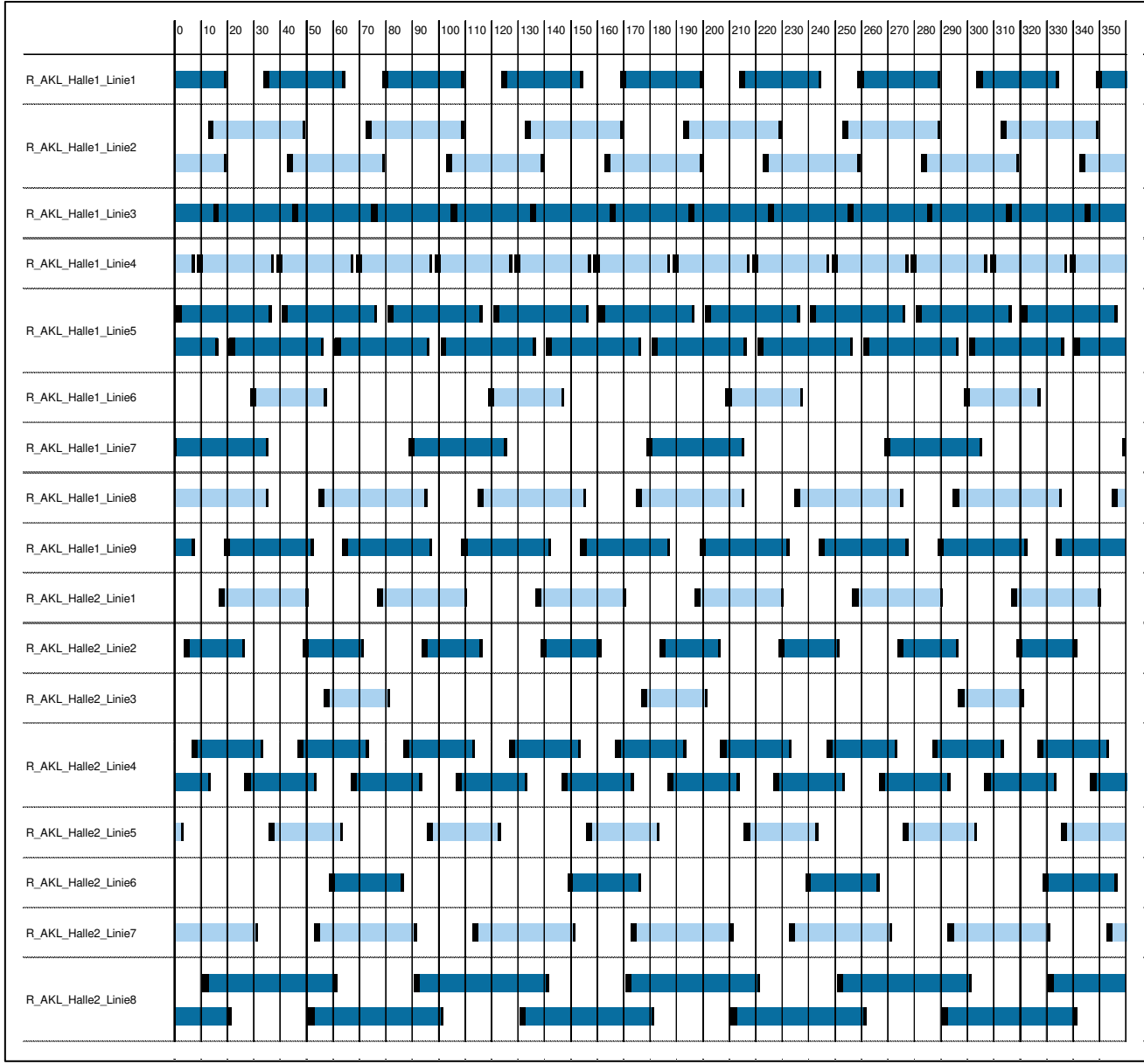


Abbildung C-1: Balkendiagramm eines optimalen Fahrplans für Anwendungsfall I: Jeder Balken repräsentiert die Dauer einer Tour auf der jeweiligen Route. Die Belegungszeit des Bahnhofs am Start der Tour ist schwarz eingefärbt (eigene Darstellung).

Anhang D Optimaler Fahrplan für Anwendungsfall II

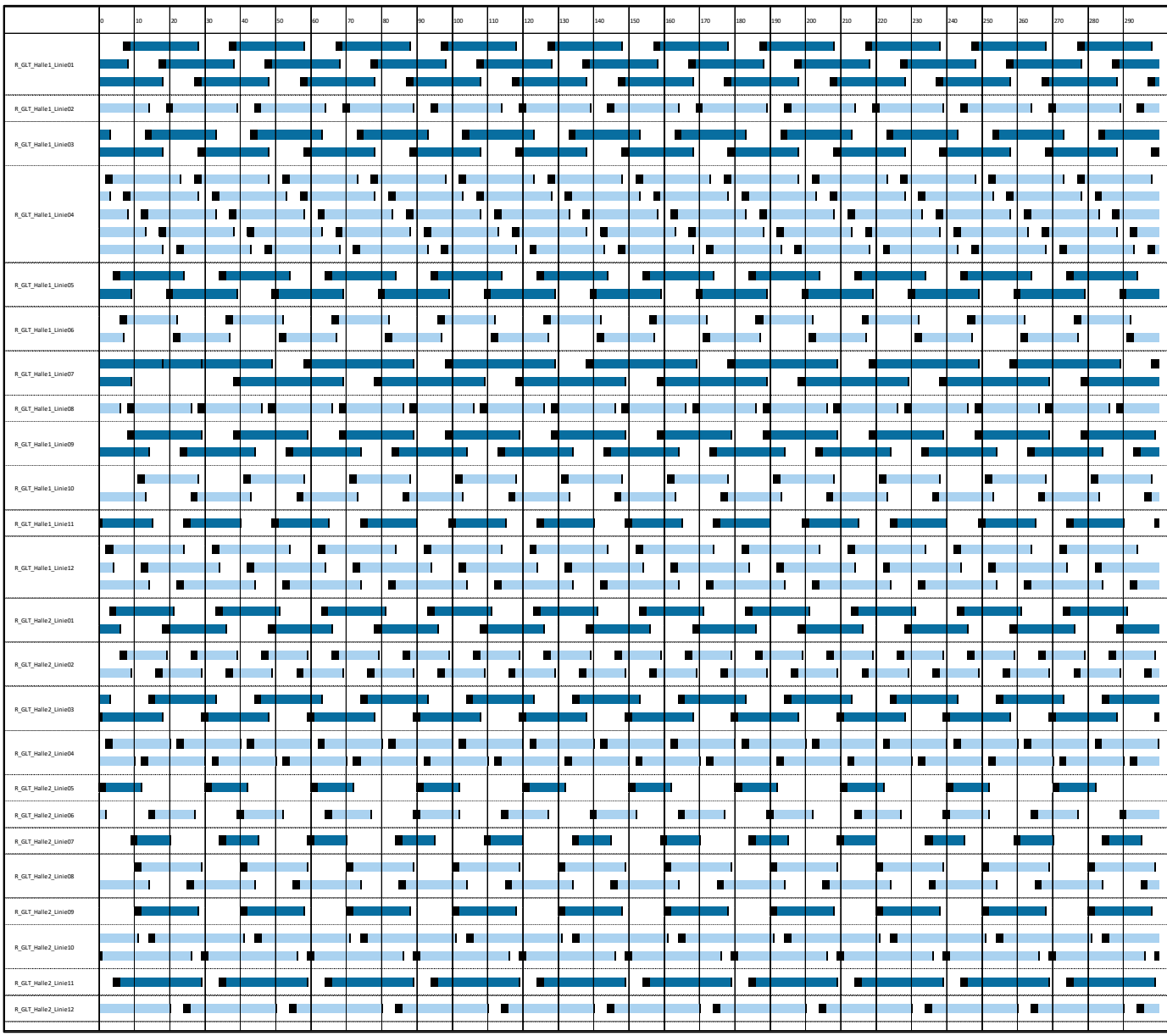


Abbildung D-2: Balkendiagramm eines optimalen Fahrplans für Anwendungsfall II: Jeder Balken repräsentiert die Dauer einer Tour auf der jeweiligen Route. Die Belegungszeit des Bahnhofs am Start der Tour ist schwarz eingefärbt (eigene Darstellung).