

Entwicklung optimaler Torbelegungspläne in Stückgutspeditiionsanlagen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

an der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Math. Annette Chmielewski
aus Mainz

-
1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen
 2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Martin Skutella

Eingereicht: Dortmund, 8. Dezember 2006

Datum der Prüfung: Dortmund, 16. März 2007

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	2
1.3 Bedeutung für Wissenschaft und Praxis	4
2 Logistik der Stückgutspedition	7
2.1 Stückgutspeditionsbranche	7
2.2 Stückguttransportnetze	9
2.3 Stückgutspeditionsanlagen	12
2.3.1 Layout	14
2.3.2 Prozesse und Ressourcen	18
2.3.3 Informationsfluss	23
2.3.4 Betrieb und Strategien	26
2.4 Planungsaufgaben in Stückgutspeditionsanlagen	28
3 Stand der Wissenschaft und Technik	31
3.1 Dispositionsleitstände in der speditionellen Praxis	31
3.2 Optimierungsansätze in Umschlaganlagen	35
3.3 Mathematische Optimierungsmodelle und ausgewählte Lösungsverfahren	44
3.3.1 Branch-and-Bound Prinzip	45
3.3.2 Column Generation Konzept	49

4	Entwicklung eines mathematischen Optimierungsmodells	55
4.1	Logistische Systemgrenzen	55
4.2	Formulierung der Optimierungsaufgabe	56
4.3	Mathematische Modellierung	60
4.3.1	Einführung von Notationen und mathematischen Systemannahmen	60
4.3.2	Einführung diskreter Zeitscheiben	63
4.3.3	Vorüberlegungen zum Modelltyp und den Entscheidungsvariablen	65
4.3.4	Zeitdiskrete Mehrgüterflussformulierung mit Nebenbedingungen	67
4.3.5	Modellanalyse	82
4.4	Übertragung auf den Sammelguteingang	84
4.5	Anwendung des Branch-and-Cut Verfahrens	86
5	Entwicklung eines Dekomposition und Column Generation Ansatzes	97
5.1	Vorstellung der Dekompositionsmethode	97
5.2	Dekompositionsansatz zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne	100
5.3	Restricted Master Problem, Pricing Problem und Dualvariablen	107
5.4	Column Generation Ansatz	110
5.5	Anwendung des Column Generation Ansatzes	115
6	Test anhand realer Praxisdaten	121
6.1	Datenbeschaffung und Aufbereitung	121
6.2	Vorstellung eines realen Praxisszenarios	123
6.3	Anwendung des Column Generation Ansatzes	127
6.3.1	Torbelegungsplanung	128
6.3.2	Layout- und Betriebsentscheidungen	129
6.4	Nutzung der entwickelten Modelle und Verfahren für weitere Planungsaufgaben	131
7	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literaturverzeichnis	139
A	Anhang	147
A.1	Inputdaten der künstlichen Testinstanzen	147
A.2	Inputdaten des realen Praxisszenarios	167

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorgehen bei Optimierungsprojekten	3
2.1	Führende Stückgutpeditionsunternehmen bzw. Stückgutkooperationen	8
2.2	Schematische Darstellung eines Stückguttransportnetzes	9
2.3	Verkehrswellen im Stückgutumschlag	10
2.4	Exemplarisches Layout einer Stückgutpeditionsanlage	13
2.5	Klassifizierung der Layoutobjekte in Stückgutpeditionsanlagen	14
2.6	Typische Grundformen von Umschlaghallen	15
2.7	Teilsystem Ankunft	19
2.8	Teilsystem Umschlag	20
2.9	Teilsystem Abfahrt	21
2.10	Informationsfluss in der (Standard-) Transportkette einer Stückgutsendung	24
2.11	Teilbereiche der Torbelegungsplanung in Stückgutpeditionsanlagen	29
3.1	LoadDOCK Navigation: Darstellung von Torbelegungsplänen als Gantt-Chart	34
3.2	Codierung der Individuen	38
3.3	Struktur von mathematischen Optimierungsmodellen	44
3.4	Lösungsraum eines ganzzahligen linearen Optimierungsmodells	45
3.5	Ablauf des Branch-and-Bound Verfahrens und Darstellung im Suchbaum	47
3.6	Ablauf des Column Generation Verfahrens	52
4.1	Formulierung in Anlehnung an Maschinenbelegungsprobleme	65
4.2	Formulierung in Anlehnung an quadratische Zuordnungsprobleme	66
4.3	Formulierung in Anlehnung an graphentheoretische Flussprobleme	67
4.4	Entwicklung eines Netzwerks zur Torbelegungsplanung	68
4.5	Erweiterung des Netzwerks um spezielle Quellen und Senken	73

4.6	Entwicklung der MIP-Gap	90
4.7	TestszENARIO IV: Layout der Stückgutspeditionsanlage	92
4.8	TestszENARIO IV: Mathematisches Netzwerk	92
4.9	TestszENARIO IV: Gantt-Chart im Szenario A und C	93
4.10	TestszENARIO IV: Beanspruchung der Tore im Szenario A und C	94
4.11	TestszENARIO IV: Wartezeiten im Szenario A und C	95
5.1	Beispiel eines zulässigen Routings	102
5.2	Column Generation Ansatz zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne	112
5.3	Zusammenspiel der entwickelten Modelle	114
5.4	Vergleich der Laufzeit und der Lösungsgüte der Verfahren	118
6.1	Klassifizierung der Inputdaten für die Optimierung	121
6.2	Praxisszenario: Layout der Umschlaghalle	124
6.3	Praxisszenario: Verteilung der Fahrzeugankünfte	127
6.4	Praxisszenario: Bestehende Torbelegungspläne im SA und SE	128
6.5	Praxisszenario: Optimierte Torbelegungspläne im SA und SE	129
6.6	Layoutvarianten	130
A.1	TestszENARIO I: Layout der Umschlaghalle	147
A.2	TestszENARIO II: Layout der Umschlaghalle	149
A.3	TestszENARIO III: Layout der Umschlaghalle	150
A.4	TestszENARIO IV: Layout der Umschlaghalle	152
A.5	TestszENARIO V: Layout der Umschlaghalle	154
A.6	TestszENARIO VI: Layout der Umschlaghalle	156
A.7	TestszENARIO IX: Layout der Umschlaghalle	163
A.8	TestszENARIO X: Layout der Umschlaghalle	165

Tabellenverzeichnis

2.1	Planungsaufgaben in Stückgutspeditionsanlagen	28
3.1	Klassifizierung bestehender Arbeiten zur Optimierung in Umschlaganlagen	42
4.1	Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil I	58
4.2	Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil II	59
4.3	Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil III	59
4.4	Aufbau der Knotenmenge für das Netzwerk zur Torbelegungsplanung	69
4.5	Aufbau der Kantenmenge für das Netzwerk zur Torbelegungsplanung	72
4.6	Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil IV (Zusatz)	76
4.7	Logistische Größe der Testszenarien	87
4.8	Mathematische Größe der Testszenarien	88
4.9	Testszenarien: Lösungsverlauf und Lösungsgüte des Branch-and-Cut Verfahren .	89
5.1	Dualvariablen des RMP der Torbelegungsplanung	108
5.2	Testszenarien: Lösungsverlauf und Lösungsgüte des Column Generation Ansatzes	116
6.1	Praxisszenario: Innerbetriebliche Flächen und Torzuordnung	124
6.2	Praxisszenario: Fahrplan der Fernverkehrsrelationen	126
6.3	Vergleich der Layoutvarianten: Bewertungsindizes im SA und SE	130
A.1	Testszenario I: Entfernungen in [m]	147
A.2	Testszenario I: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	148
A.3	Testszenario I: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	148
A.4	Testszenario I: Sendungsmix	148
A.5	Testszenario II: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	149
A.6	Testszenario II: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	149
A.7	Testszenario II: Sendungsmix	150

A.8	Testszenario III: Entfernungen in [m]	151
A.9	Testszenario III: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	151
A.10	Testszenario III: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	151
A.11	Testszenario III: Sendungsmix	152
A.12	Testszenario IV: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	153
A.13	Testszenario IV: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	153
A.14	Testszenario IV: Sendungsmix	153
A.15	Testszenario V: Entfernungen in [m]	154
A.16	Testszenario V: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	155
A.17	Testszenario V: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	155
A.18	Testszenario V: Sendungsmix	155
A.19	Testszenario VI: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	156
A.20	Testszenario VI: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	157
A.21	Testszenario VI: Sendungsmix	157
A.22	Testszenario VII: Entfernungen in [m]	158
A.23	Testszenario VII: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	159
A.24	Testszenario VII: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	159
A.25	Testszenario VII: Sendungsmix	160
A.26	Testszenario VIII: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	161
A.27	Testszenario VIII: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	161
A.28	Testszenario VIII: Sendungsmix	162
A.29	Testszenario IX: Entfernungen in [m]	164
A.30	Testszenario IX: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	164
A.31	Testszenario IX: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	164
A.32	Testszenario IX: Sendungsmix	165
A.33	Testszenario X: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	166
A.34	Testszenario X: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	166
A.35	Testszenario X: Sendungsmix	167
A.36	Szenario SA: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	168
A.37	Szenario SA: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	168
A.38	Szenario SA: Sendungsmix	168
A.39	Szenario SE: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan	169
A.40	Szenario SE: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan	169
A.41	Szenario SE: Sendungsmix	170

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist am Lehrstuhl Verkehrssysteme und -logistik der Fakultät Maschinenbau an der Universität Dortmund entstanden. Im Rahmen des Forschungsprojektes "Optimierung des Layouts und der Disposition in Stückgutspeditionsanlagen" (Nr. S 693), welches von der Stiftung Industrieforschung gefördert wird, arbeiten Wissenschaftler des Lehrstuhls zusammen mit Unternehmen der Stückgutbranche an der Entwicklung von Methoden zur Optimierung strategischer, mittelfristiger und operativer Planungsaufgaben in Stückgutspeditionsanlagen. Ziel der Arbeiten ist neben der wissenschaftlichen Untersuchung der Planungsaufgaben die Umsetzung der entwickelten Methoden in Form von Praxistools. Diese werden den Planern und Betreibern der Anlagen zur Unterstützung bei ihrer Arbeit zur Verfügung gestellt.

1.1 Problemstellung

Speditionsunternehmen der Stückgutbranche unterliegen einem starken Konkurrenzdruck. Wegen niedriger Markteintrittsbarrieren bewegen sich die Marktanteile der Stückgutunternehmen in Deutschland im einstelligen Bereich¹. Bei einem stagnierenden Volumen im deutschen Stückgutmarkt ist die Folge u.a. ein hoher Verdrängungswettbewerb. Darüber hinaus führt die gegensätzliche Entwicklung von steigenden Kosten und sinkenden Preisen in der Stückgutbranche dazu, dass die Gewinnmargen mit etwa 1 - 3%² vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen als sehr gering einzustufen sind.

Dem dauerhaft hohen Konkurrenzdruck wird in der logistischen Praxis dadurch begegnet, dass die Unternehmen Wettbewerbsvorteile durch das systematische Optimieren der Prozesse und die Umsetzung logistischer Innovationen zu erlangen versuchen. Im Mittelpunkt dieser Bemühungen standen in der Vergangenheit sowohl von Seiten der Praxis als auch der angewandten Forschung im strategischen Bereich die optimale Gestaltung der Stückguttransportnetz³ und im operativen Bereich die Optimierung der außerbetrieblichen Transportprozesse⁴.

¹ vgl. Klaus ([50]), 2006, S. 115

² vgl. Tripp ([80]), 2003, S. 7

³ vgl. Wlcek ([88]), 1998

⁴ vgl. Cardeneo ([16]), 2005

Die Verkehrsknoten der Stückguttransportnetze, d.h. die Stückgutspeditionsanlagen, fanden in wissenschaftlichen Arbeiten bisher wenig Berücksichtigung. Stückgutspeditionsanlagen agieren in Stückguttransportnetzen als Güterverteilzentren⁵ mit Sammel- und Verteilfunktion. Aufgabe einer Stückgutspeditionsanlage ist folglich der fehlerfreie und termingerechte Umschlag der Sendungen von Fahrzeugen des Nahverkehrs auf Fahrzeuge des Fernverkehrs und umgekehrt. Eine längerfristige Lagerung der Sendungen ist dabei i.d.R. unerwünscht. Innerhalb eines Verkehrstages kommen in zwei getrennten Verkehrswellen (Sammelgutausgang und Sammelguteingang) Fahrzeuge in den Anlagen an, die an die zur Verfügung stehenden Tore zur Entladung zugewiesen werden. Die entladenen Sendungen werden anschließend auf innerbetrieblichen Logistikflächen entsprechend ihrer Anschlussrelationen sortiert und zu denjenigen Toren verbracht, wo die jeweiligen Relationen abgefertigt werden. Dort werden sie erneut auf Logistikflächen gepuffert, bis die Beladung der Fahrzeuge einer Relation beginnt. Aufgrund der Produktbeschaffenheit der Stückgutsendungen, ihrem mengenmäßigen Aufkommen sowie des Layouts der Stückgutspeditionsanlagen eignen sich häufig keine automatischen Fördermittel für den innerbetrieblichen Transport. Stattdessen werden in der Mehrzahl der Fälle manuelle Umschlagmittel, wie etwa Gabelstapler und Handgabelhubwagen, eingesetzt. Diese müssen von entsprechendem Personal gelenkt werden, was u.a. dazu führt, dass die Betriebskosten der Anlagen einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Stückgutspedition ausmachen.

Der Umschlag der Sendungen zwischen den ankommenden und den abgehenden Fahrzeugen kann als mehrstufiger Transport- und Handlingsprozess identifiziert werden. Die dabei entstehenden Betriebskosten werden maßgeblich durch die Anzahl der innerbetrieblichen Transportaufträge und der Lage ihrer Quellen und Senken bestimmt. Vor allem letztere sind das Resultat des Andockverhaltens der Fahrzeuge an den Toren und der Gestaltung des innerbetrieblichen Materialflusses. Durch eine geschickte örtliche und zeitliche Zuordnung der Fahrzeuge zur Be- und Entladung zu den Toren, unter Beachtung der geladenen Sendungen, der Fahrpläne der Touren sowie der innerbetrieblichen Ressourcen kann positiv Einfluss auf die Kosten und die Effizienz einer Stückgutspeditionsanlage genommen werden.

Insgesamt ist diese Planungsaufgabe aufgrund der vielen parallel zu betrachtenden Informationen und simultan zu treffenden Entscheidungen durch eine hohe Komplexität geprägt. Derzeit wird sie fast ausschließlich durch einen menschlichen Experten, den so genannten Disponenten oder Betriebslenker, basierend auf dessen Erfahrungen durchgeführt. Planungsinstrumente oder aber Algorithmen zur Bestimmung optimaler Lösungen für die Planungsaufgabe fehlen im Praxiseinsatz. Eine suboptimale Steuerung der Anlagen führt aber langfristig zu einem überhöhten Bedarf an innerbetrieblichen Ressourcen und somit zu unnötig hohen Betriebskosten.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung mathematischer Methoden zur Unterstützung eines Disponenten beim Betrieb einer Stückgutspeditionsanlage. Strategische, mittelfristige aber auch operative Entscheidungen, die im folgenden zu dem Aufgaben-

⁵ zur Definition *Güterverteilzentren* vgl. Klaus, Krieger ([49]), 2004, S. 177

bereich des Disponenten und somit zu der von ihm zu verantwortenden Entscheidungssituation zählen sind die

- Definition der logistischen Funktion der Tore (Einteilung in Eingangstore für den Entladeprozess und in Ausgangstore für den Beladeprozess)
- örtliche Zuordnung der Relationen zu Ausgangstoren
- örtliche Zuordnung der Touren zu Eingangstoren und die zeitliche Reihenfolgeentscheidung
- Entscheidung über den Fluss der Ladeeinheiten durch die Umschlaghalle und die Organisation der zur Durchführung der innerbetrieblichen Transportprozesse benötigten Ressourcen (Logistikflächen und Umschlagmittel).

Die durch die Summe dieser Entscheidungen im Folgenden auch als **Torbelegungsplanung** definierte Optimierungsaufgabe verfolgt das Ziel, die entstehenden Betriebskosten der Anlage sowie die Wartezeiten der Fahrzeuge zu minimieren.

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist an die im Bereich des Operations Research übliche Vorgehensweise zur Durchführung von Optimierungsprojekten für logistische Problemstellungen angelehnt, die folgender Abbildung zu entnehmen ist:

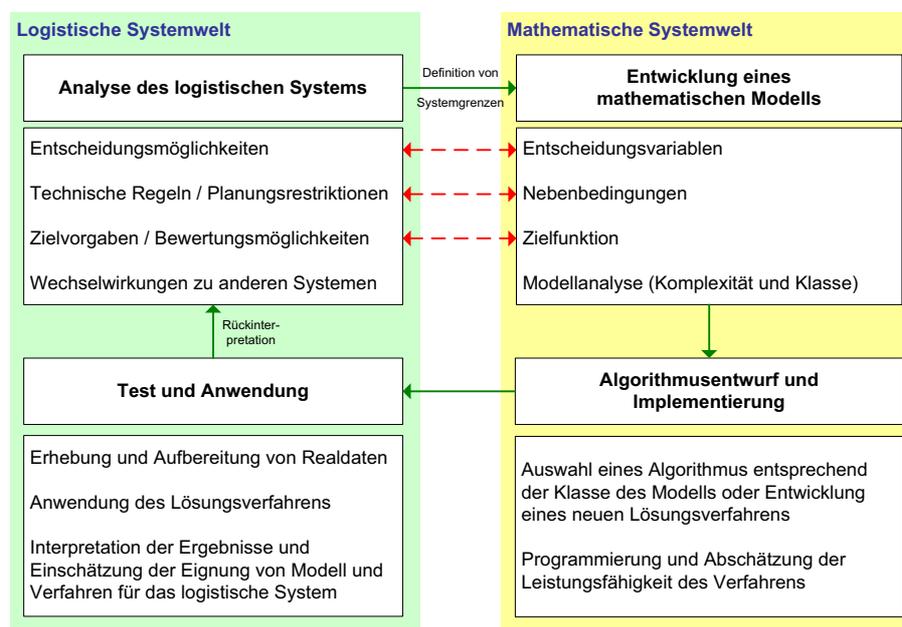


Abbildung 1.1: Allgemeines Vorgehen bei Optimierungsprojekten

In Kapitel 2 "Logistik der Stückgutspedition" wird das zugrunde liegende logistische System vorgestellt und analysiert. Dabei wird zunächst sowohl auf die Eigenschaften des Produktes Stückgut, als auch auf die Funktionsweise der übergeordneten Stückguttransportnetze eingegangen. Beide haben jeweils Auswirkungen auf die hier betrachtete Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung in Stückgutspeditiionsanlagen. Anschließend werden relevante Layoutobjekte

wie auch typische Prozesse und die zu ihrer Durchführung eingesetzten Ressourcen vorgestellt. Ergänzend werden der eine Stückgutsendung begleitende Informationsfluss sowie typische in Stückgutanlagen auftretende Betriebsstrategien analysiert. Das Kapitel endet mit einer allgemeinen Beschreibung der strategischen, mittelfristigen und operativen Planungsaufgaben in Stückgutspeditionsanlagen und einer Einordnung der Torbelegungsplanung in dieses Umfeld.

In Kapitel 3 "Stand der Wissenschaft und Technik" schließt sich eine Übersicht über aktuell bestehende Praxiswerkzeuge zur Steuerung von Stückgutspeditionsanlagen und über wissenschaftliche Optimierungsansätze in allgemeinen Umschlaganlagen an. Diese werden bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit und ihrer Eignung für die beschriebene Planungsaufgabe analysiert. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die relevanten Grundlagen der linearen Optimierung (Dualität, Column Generation Konzept) und der diskreten Optimierung (Branch-and-Bound und Branch-and-Cut Prinzip) vorgestellt, welche zum Verständnis der in der vorliegenden Arbeit angewandten bzw. entwickelten mathematischen Methoden erforderlich sind.

Die Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung wird nachfolgend in Kapitel 4 "Entwicklung eines mathematischen Optimierungsmodells" als zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen modelliert und das resultierende ganzzahlige Modell hinsichtlich seiner Komplexität analysiert. Im Anschluss werden künstliche Testinstanzen entwickelt und das Standardverfahren für ganzzahlige Optimierungsmodelle - der Branch-and-Cut Algorithmus - zur Lösung angewandt. Das Kapitel schließt mit einer Analyse des Lösungsverlaufs des Verfahrens und mit einer Analyse der Eignung des entwickelten Modells und des Verfahrens für die hier untersuchte Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung.

In Kapitel 5 "Entwicklung eines Dekomposition und Column Generation Ansatzes" wird ein spezielles Verfahren für die vorliegende Problemklasse entwickelt und dessen Implementierung beschrieben. Kernidee des Verfahrens ist die Dekomposition des Ursprungsmodells und somit die Ableitung zweier Optimierungsmodelle, welche die Anwendung eines angepassten Column Generation Ansatzes auf die Torbelegungsplanung ermöglichen. Der neue Column Generation Ansatz wird auf die im vorangegangenen Kapitel entwickelten künstlichen Testinstanzen angewandt, um so einen Vergleich des Verfahrens mit dem Standardverfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Eignung für die Optimierungsaufgabe aufstellen zu können.

Kapitel 6 "Test anhand realer Praxisdaten" dient dazu, die Anwendung des entwickelten Modells sowie des neuen Lösungsansatzes auf die erhobenen Praxisdaten eines Stückgutspediteurs zu beschreiben.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung und einem wissenschaftlichen Ausblick für die Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung in Stückgutspeditionsanlagen.

1.3 Bedeutung für Wissenschaft und Praxis

Die Torbelegungsplanung in Stückgutspeditionsanlagen ist aus wissenschaftlicher Sicht wenig berücksichtigt worden. Es existieren einige Arbeiten, die Teile des Gesamtproblems betrachten, modellieren und algorithmisch unterstützen. Durch die vorliegende Arbeit wird erstmalig eine

umfassende Modellierung sämtlicher Aspekte der Torbelegungsplanung entwickelt. Das resultierende mathematische Modell stellt eine gesonderte mathematische Problemklasse dar. Zwar stehen Mehrgüterflussprobleme auch unter Integration der Komponente Zeit seit einigen Jahren im Fokus der mathematischen Wissenschaft^{6,7}. Doch für das in dieser Arbeit betrachtete Problem sind bestimmte Bedingungen an den Fluss der Ladeeinheiten einer Tour durch die die Tore darstellenden Knotenmengen gestellt (unteilbare Flüsse). Diese führen dazu, dass bestehende Lösungsansätze nicht auf das geschilderte Problem übertragbar sind. In der vorliegenden Arbeit wird somit für diese spezielle mathematische Problemklasse ein Algorithmus aus der Gruppe der Column Generation Methoden entwickelt. Neben dem hier behandelten logistischen Problem können mit Hilfe des entwickelten Optimierungsmodells und des Verfahrens durch einfache Modifikationen (Elimination von Nebenbedingungen) auch Lösungen für allgemeine quadratische Zuordnungsprobleme bzw. allgemeine Güterumschlagsprobleme und allgemeine Schedulingprobleme bzw. allgemeine Maschinenbelegungsprobleme bestimmt werden.

Den Betreibern von Stückgutspeditionsanlagen werden durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, die sie beim optimierten Betrieb der Anlage unterstützen. Strategisch kann mittels des entwickelten Verfahrens bestimmt werden, welche und wie viele Tore unter Annahme eines bestimmten Geschäftes als Eingangstore bzw. Ausgangstore erforderlich sind und wo in der logistischen Anlage Zonen für die Ent- und Beladeprozesse liegen sollen. Des Weiteren wird mittelfristig die optimale Belegung der Ausgangstore durch die Relationen im System für den Sammelguteingang wie auch für den Sammelgutausgang unterstützt. Operative Aufgaben, die das hier entwickelte Verfahren optimiert, sind zum einen die tagesaktuelle Zuweisung der zu entladenden Touren sowohl zu Eingangstoren als auch zu Zeitspannen, innerhalb derer sie entladen werden sollen. Zum anderen wird der innerbetriebliche Transport der Ladeeinheiten zwischen den Toren und Logistikflächen und der zeitliche Einsatz und Umfang der daran beteiligten Umschlagmittelressourcen bestimmt. Die Optimierungsgüte der Lösungen wird anhand der resultierenden Betriebskosten und der Wartezeiten der Fahrzeuge gemessen. Die geschilderte komplexe Planungsaufgabe, die der Disponent bisher aufgrund seiner Erfahrung lösen musste, kann durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bei Aufnahme entsprechender Daten strukturiert und mittels mathematischer Verfahren optimiert werden. Hierdurch wird eine Senkung der Betriebskosten und somit langfristig die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Stückgutspediteure erzielt.

⁶ vgl. Barnhart, Hane, Vance ([8]), 2000

⁷ vgl. Hall, Hippler, Skutella ([42]), 2003

Kapitel 2

Logistik der Stückgutspedition

Das Segment Stückgut, häufig auch als Sammelgut oder Systemverkehr bezeichnet, hat für die in der Logistik tätigen Unternehmen stark an Bedeutung gewonnen. So betätigen sich über 40% der Speditionsunternehmen in diesem Geschäftszweig¹. Die Eigenschaften des Produktes Stückgut und der an der Erbringung der Transportdienstleistung beteiligten Akteure, Prozesse und Techniken werden in den Kapiteln 2.1 - 2.3 vorgestellt. Abschließend wird in Kapitel 2.4 eine Übersicht über die in Stückgutanlagen auftretenden strategischen, mittelfristigen und operativen Planungsaufgaben gegeben. Besondere Berücksichtigung findet die Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung.

Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die sich hieran anschließende Modellierung der Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung in Stückgutspeditionsanlagen.

2.1 Stückgutspeditionsbranche

Als Stückgut werden "verpackte oder unverpackte Sendungen, mit einem Gewicht bis etwa drei Tonnen bezeichnet, die bei Transport-, Umschlag- und Lagervorgängen als Handlingseinheit behandelt werden"².

Die Sendungen der Stückgutbranche grenzen sich in ihren Eigenschaften zur einen Seite von den Produkten der KEP-Dienstleister³ ab. Diese sind durch ein Gewicht von 2 bis ca. 31 kg, einer durchschnittlich geringeren Sendungsgröße und kurzen, oft garantierten Laufzeiten charakterisiert⁴. Zur anderen Seite grenzen sich die Sendungen der Stückgutbranche von den Produkten der Teil- und Komplettladungsverkehre ab. Bei einer Komplettladung wird die Kapazität des eingesetzten Verkehrsmittels durch den angenommenen Transportauftrag vollständig in Anspruch

¹ vgl. Jaeger und Laudel ([46]), 1999

² vgl. Klaus und Krieger ([49]), 2004, S. 498

³ zur Definition *KEP-Dienst* (= *Kurier-, Express-, Paketdienst*) vgl. Buchholz, Clausen, Vastag ([13]), 1998, S. 64

⁴ vgl. Klaus und Krieger ([49]), 2004, S. 231

genommen⁵. Teilladungen erreichen einen derartigen Auslastungsgrad nicht, sind aber dennoch aufgrund ihrer Größe nicht als Stückgut zu behandeln⁶.

Der Transport von Teil- und Komplettladungen wird i.d.R. direkt vom Verloader zum Abnehmer ohne weiteren Umschlag durchgeführt. Lediglich im Teilladungsbereich können Transportaufträge unterschiedlicher Verloader durch eine vorab durchgeführte Tourenplanung in einem Transportmittel gebündelt werden. Da Stückgutsendungen durchschnittlich nur wenige Ladeeinheiten bzw. Ladungsträger (z.B. Paletten oder Gitterboxen) umfassen, reicht hier selbst die Bündelung mehrerer Sendungen nicht aus, um große Transportmittel optimal auszulasten. Die im Fernverkehr häufig eingesetzten Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis 40 Tonnen (im Folgenden als Fernverkehrsfahrzeuge bezeichnet) verfügen über eine Kapazität von ca. 32 Palettenstellplätzen in der Grundfläche. Nachfragen nach Stückguttransporten entstehen nahezu flächendeckend und haben ebenso gleichmäßig verstreute Zieladressen. Die tägliche Durchführung einer kostenoptimalen Zuordnung der zahlreich anfallenden Transportaufträge zu Transportmitteln mit einer zusätzlichen Organisation von Rückfrachten und der Einhaltung zeitlicher Serviceversprechen ließe den Planungs- und Organisationsaufwand für die Dispositionsabteilungen der Spediteure wesentlich steigen.

Als typische Produktionsform für den Transport von Stückgut hat sich deshalb der gebrochene Verkehr in Stückguttransportnetzen herausgebildet. Stückguttransportnetze dienen dazu, den flächendeckenden Transport von Stückgutsendungen in einer Region mit einer definierten Servicezeit von maximal 24 Stunden zu akzeptablen Preisen und geringen Kosten anbieten zu können. Sie werden entweder in Eigenverantwortung durch ein einzelnes Unternehmen bzw. einen Konzern betrieben (z.B. Schenker, DHL, Dachser) oder aber sie entstehen durch den Zusammenschluss mehrerer klein und mittelständischer Unternehmen (= KMU) zu einer Stückgutkooperation (z.B. System Alliance, Cargoline, IDS). Die KMU bleiben dabei rein rechtlich unabhängige Unternehmen, die sich lediglich verpflichten, die eigene Umschlaganlage als Empfangs- bzw. Versandanlage im gemeinsamen Transportnetz zu integrieren und bestimmte Preis- und Qualitätsstandards zu gewährleisten. Es existieren ca. 12 nationale Stückgutnetze in Deutschland⁷. In folgender Abbildung⁸ sind führende Unternehmen der Stückgutbranche bzw. führende Stückgutkooperationen mit ihren Umsätzen aufgeführt:

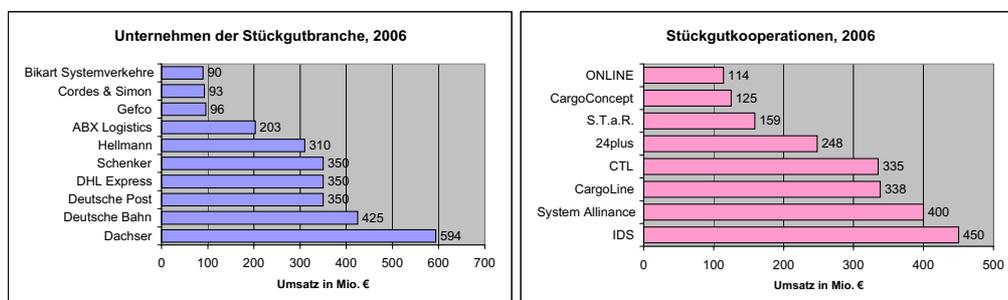


Abbildung 2.1: Führende Stückgutpeditionsunternehmen bzw. Stückgutkooperationen

⁵ vgl. Stumpf ([77]), 1998, S. 9

⁶ vgl. Stumpf ([77]), 1998, S. 11

⁷ vgl. Klaus ([50]), 2006, S. 112

⁸ vgl. Klaus ([50]), 2006, S. 115

Insgesamt wird im Jahr 2006 das Volumen des Stückgutmarktes auf ca. 5,5 Mrd. Euro Umsatz im nationalen Bereich mit transportierten 120 Mio. Sendungen und einem resultierenden Volumen von 28 Mio. Tonnen⁹ geschätzt. Die Mittelstandskooperationen haben sich zu einem starken Konkurrenten für die großen Stückgutanbieter entwickelt. Dies zeigt sich u.a. daran, dass bereits im Jahr 2003 der Gesamtumsatz der Zusammenschlüsse mit ca. 1,98 Mrd. Euro annähernd 40% des Gesamtmarktumsatzes ausmachte¹⁰.

Die Kooperationen wie auch die Großunternehmen stehen vor der Herausforderung, ihre Netzstrukturen im Hinblick auf eine hohe Flexibilität gegenüber dem Kunden und ihr Produkt- und Leistungsangebot den sich stetig ändernden Marktbedingungen anzupassen. Prognosen¹¹ gehen davon aus, dass der nationale Stückgutmarkt keine großen Wachstumssteigerungen innerhalb der nächsten Jahre erfahren wird. Es wird vielmehr erwartet, dass der Wachstumsmarkt in Europa liegt und somit der Erfolg einer Stückgutkooperation oder eines Stückgutspeditiionsunternehmens entscheidend davon abhängt, inwieweit die Fähigkeit zur Entwicklung großer funktionsfähiger und flächendeckender europäischer Netze vorhanden ist. National ist der Stückgutmarkt durch eine verstärkte Homogenisierung der Produkte und Leistungen geprägt. Eine neue Entwicklung in diesem Zusammenhang ist die Reorganisation des Transportes bestimmter Güter- und Servicearten (Langgüter, Volumentransporte, nicht stapelfähige Güter) aus dem Segment an Standardgütern in Sondersystemen. Aus Sicht der Verlager steht weiterhin der Erhalt der Servicequalität, d.h. einer garantierten Laufzeit von maximal 24 Stunden, und das Angebot eines durchgängigen Tracking und Tracings als Entscheidungskriterium im Vordergrund.

2.2 Stückguttransportnetze

Ein Stückguttransportnetz besteht aus einer Vielzahl an Stückgutspeditiionsanlagen, die flächendeckend in der zu bedienenden Region oder dem Land verteilt sind. Stückgutnetze in Deutschland beispielsweise verfügen über ca. 35 bis 40 Anlagen. In unten stehender Abbildung sind die wesentlichen Elemente eines Stückguttransportnetzes schematisch dargestellt, auf die im Folgenden eingegangen wird:

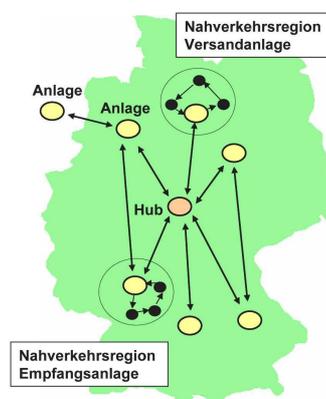


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Stückguttransportnetzes

⁹ vgl. Klaus ([50]), 2006, S. 113

¹⁰ vgl. Tripp ([79]), 2003, S. 17

¹¹ vgl. Tripp ([79]), 2003, S. 18

Jeder der Anlagen ist eine Nahverkehrsregion zugeordnet, die über eine Gruppe zusammenhängender Postleitzahlengebieten (= PLZ-Gebiete) definiert ist. Die pro Tag anfallenden Transportaufträge, d.h. Sendungen, der in dieser Region ansässigen Verlager werden im Rahmen des **Vorlaufs** eingesammelt. Dies kann entweder in Sammeltouren oder in Direktfahrten geschehen. Bei einer Sammeltour werden mehrere Verlager nacheinander durch ein Fahrzeug (i.d.R. mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 7,5 Tonnen, im Folgenden als Nahverkehrsfahrzeug bezeichnet) angefahren, welches dort die avisierten Sendungen abholt. Nach Beendigung der Sammeltour, kehrt das Fahrzeug in die Stückgutanlage zurück. Bei einer Direktfahrt fährt der Fahrer nur einen Verlager (Großkunden) direkt an und nimmt dessen Sendungen auf. Je nach Größe bzw. Ausdehnung der Nahverkehrsregion und der Anzahl der dort ansässigen Verlager handelt es sich um ca. 40 - 100 Nahverkehrsfahrzeuge, die in einer Anlage im Rahmen des Vorlaufs eintreffen¹². In der Stückgutpeditionsanlage werden die gesammelten Sendungen entsprechend ihrer Fernziele, den so genannten Fernrelationen, sortiert und von Nahverkehrsfahrzeugen auf Fernverkehrsfahrzeuge umgeschlagen. Anschließend werden die gebündelten Sendungsmengen einer jeden Fernrelation im **Hauptlauf** zu derjenigen Stückgutanlage transportiert, in deren Nahverkehrsregion wiederum die Empfänger der Sendungen ansässig sind. Hierfür werden in der Mehrzahl der Fälle die bereits beschriebenen Fernverkehrsfahrzeuge eingesetzt. Es ist ein erneuter Umschlag in den Empfangsanlagen auf Nahverkehrsfahrzeuge nötig. Letzteres wird als **Nachlauf** bezeichnet.

Insgesamt existieren für jede der Anlagen eines Stückgutnetzes zwei Zeitspannen innerhalb der täglich produziert wird. Die Zeitspannen werden auch als Verkehrswellen bezeichnet und deren Elemente sind in folgender Abbildung zeitlich dargestellt¹³:

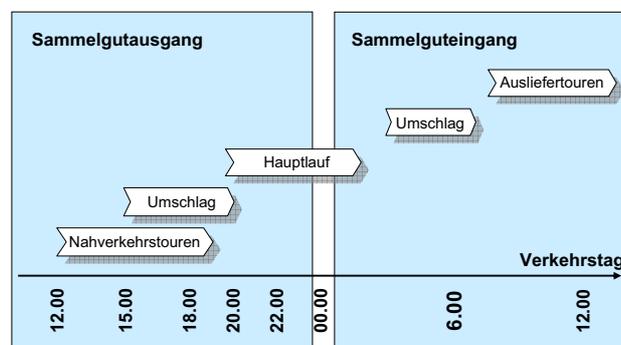


Abbildung 2.3: Verkehrswellen im Stückgutumschlag

Der **Sammelgutausgang** (= SA) umfasst das Einsammeln der tagesaktuellen Sendungen in Form von Sammeltouren oder Direktfahrten, den Umschlag von den Nahverkehrsfahrzeugen auf Fernverkehrsfahrzeuge sowie den Hauptlauf zu den Empfangsanlagen. Der **Sammelguteingang** (= SE) bezeichnet das Eintreffen der Fahrzeuge aus dem Hauptlauf und den Umschlag der Sendungen auf die Nahverkehrsfahrzeuge mit anschließender Verteilung der Sendungen in der Nahverkehrsregion. Dementsprechend arbeiten Stückgutpeditionsanlagen im SA im Auftrag

¹² Die ermittelten Anzahlen sind das Resultat einer Expertenbefragung unter den Stückgutpediteuren im Rahmen des Forschungsprojektes S 693.

¹³ vgl. Lublow ([58]), 1995, S. 4-6

von Kunden, d.h. den Versendern oder den Verladern, und im SE im Auftrag von Partnern, d.h. anderen Anlagenbetreibern, die im gleichen Stückguttransportnetz eingebunden sind.

Wichtige Begriffe, die den SA und den SE charakterisieren und die es als Bestandteile der späteren Optimierung abzugrenzen gilt, sind die *Relation*¹⁴ und die *Tour*¹⁵.

Definition 2.1 (Relation)

Eine Relation bezeichnet die Gesamtheit des Verkehrs bzw. der Verkehrsströme zwischen einem Abgangs- und einem Empfangsort. In Stückgutspeditionen bezieht sich der Begriff Relation auf die fahrplanmäßig im Linienverkehr¹⁶ angebotenen Routen zwischen verschiedenen Versand- und Empfangsdepots¹⁷.

In Zusammenhang mit Stückguttransportnetzen wird der Begriff Relation zweimal angewandt. Zum einen entspricht dies einer Linie im Hauptlauf zwischen zwei Stückgutanlagen und wird in diesem Fall *Fernverkehrsrelation* genannt. Zum anderen wird im Stückgutbereich auch für die Ausrollung der Sendungen im Nahverkehrsgebiet einer Anlage von so genannten *Nahverkehrsrelationen* gesprochen. Hintergrund hierfür ist, dass das Nahverkehrsgebiet i.d.R. in Untergebiete aufgeteilt wird, die mehrere PLZ-Gebiete umfassen. Diese bilden feststehende Relationen, die anschließend von Subunternehmern bedient werden.

Definition 2.2 (Tour)

Unter einer Tour wird in der Logistik allgemein "die Angabe der Menge aller Kunden, die auf ein und derselben, in einem Depot beginnenden und in einem Depot endenden Fahrt bedient werden" verstanden.

Auch der Begriff Tour wird im Rahmen von Stückgutnetzen zweimal verwendet. Im Fernverkehr des SA können die von einer Anlage abgehenden Relationen anhand der zu bedienenden Empfangsanlagen des Stückgutnetzes benannt werden. Es ist hierbei möglich, dass diese mit mehr als einem Fahrzeug gefahren werden. In diesem Fall bilden die Fahrzeuge einer Relation unterschiedliche *Fernverkehrstouren*. Im Nahverkehr werden äquivalent die ankommenden Nahverkehrsfahrzeuge, die entweder Sammeltouren oder Direktfahrten durchgeführt haben, als *Nahverkehrstouren* interpretiert. Für den Fall des SE verhält sich dies ähnlich, es sind lediglich die Begriffe Nah- und Fernverkehr zu ersetzen. Eine Tour ist demnach eine im Nahverkehr oder im Fernverkehr durchzuführende Fahrt und kann durch die entsprechenden Abfahrts- und Ankunftsorte, den Fahrplan sowie durch das zugewiesene Verkehrsmittel beschrieben werden.

Stückguttransportnetze nehmen unterschiedliche strukturelle Ausprägungen an. So können die Anlagen entweder durch Direktverkehre untereinander verbunden oder in ein Transportnetz vom Typ (Multi-) Hub-and-Spoke eingebettet¹⁸ sein. Bei **Direktverkehrsnetzen** ist jede der Anlagen mit allen verbleibenden Anlagen im System durch Verkehre, d.h. Relationen, miteinander

¹⁴ vgl. Stumpf ([77]), 1998, S. 10

¹⁵ vgl. Domschke und Drexl ([29]), 1990, S. 132

¹⁶ Der Begriff "Linienverkehr" ist gleichzusetzen mit dem mit einem Fahrplan versehenen Fernverkehr (vgl. Stumpf ([77]), 1998, S. 9).

¹⁷ Der Begriff "Depot" ist gleichzusetzen mit dem Begriff "Stückgutspeditionsanlage".

¹⁸ vgl. Clausen ([13]), 1998, S. 187-189

verbunden. Der Vorteil dieser Netzvariante liegt in der schnellen Erreichbarkeit sämtlicher Niederlassungen und somit sämtlicher Regionen. Was gegen diese Variante spricht, ist der Nachteil von eventuell schlecht ausgelasteten Fahrzeugen für den Fall, dass zwei Niederlassungen innerhalb des Netzes regelmäßig nur wenige Sendungen miteinander austauschen. Um diesem Nachteil zu begegnen, werden häufig Netze mit einer **Hub-and-Spoke** Struktur aufgebaut. Hierbei erhält eine oder mehrere der Niederlassungen zusätzlich die Funktion einer Hauptumschlagbasis (= Hub). Vorteil dieses zusätzlichen zentralen Umschlagpunktes ist die höhere Auslastung der Fahrzeuge auf bestimmten Teilstrecken. Ein Nachteil liegt allerdings im Zeitverlust durch den zusätzlichen Umschlag und in den höheren Kosten durch das erneute Handling der Einheiten im Hub. Möglich ist auch eine Mischform der Transportnetztypen, bei der lediglich schlecht ausgelastete Relationen durch einen erneuten Umschlag in dem Hub des Systems gebündelt werden und gut ausgelastete Relationen die Empfangsanlagen direkt anfahren (siehe Abbildung 2.2). Darüber hinaus existieren Netztypen, bei denen neben einem zentralen Hub noch zusätzliche regionale Hubs eingerichtet werden, damit Sendungen, die grundsätzlich in der gleichen Region verbleiben (z.B. Norddeutschland), nicht erst bis zu einem zentralen Hub transportiert werden müssen. Durch den anschließenden Rückweg in die Region entstehen so unnötige Kosten.

Stückgutnetze können national und/oder international ausgerichtet sein. Liegt letzteres vor, so sind neben nationalen Anlagen auch internationale Anlagen und somit internationale Relationen in das Netz integriert. Häufig werden alle Stückgutsendungen, die eine internationale Anlage erreichen sollen, über so genannte internationale Plattformen abgewickelt. Eine der nationalen Anlagen erhält zusätzlich die Funktion, als Gateway bzw. Umschlagpunkt für internationale Sendungen zu agieren. Diese Funktion ist demnach vergleichbar mit der eines Hubs nur für internationale Sendungen.

2.3 Stückgutspeditionsanlagen

Stückgutspeditionsanlagen bilden in Stückguttransportnetzen die Schnittstelle¹⁹ zwischen der *außerbetrieblichen* Produktion "Transport auf der Straße", welche durch die Nahverkehrs- und Fernverkehrsfahrzeuge im SA und SE durchgeführt wird, und der *innerbetrieblichen* Produktion "Umschlag der Sendungen zwischen den Fahrzeugen".

Kernelement einer Stückgutspeditionsanlage ist die Umschlaghalle. Dies ist ein Gebäude einer bestimmten Form und Größe, das sich auf dem Gelände der Stückgutspedition befindet. An den Außenwänden der Halle ist eine definierte Anzahl an Toren angeordnet. Es werden **Eingangstore** für die Entladung der Nahverkehrs- und der Fernverkehrstouren sowie **Ausgangstore** für die Beladung der Fahrzeuge der Fernverkehrs- und der Nahverkehrsrelationen unterschieden. Daneben existieren zusätzlich einige **Multifunktionstore**, die für beide logistischen Funktionen (Entladung und Beladung) zur Verfügung stehen und je nach Aufkommen flexibel zugewiesen werden.

¹⁹ vgl. Clausen, Heimann, Goerke ([21]), 2004, S. 158

Ein Beispiel für eine Stückgutpeditionsanlage ist folgender Abbildung zu entnehmen, bei dem es sich um die Stückguthalle (gedrehte L-Form) eines mittelständischen Unternehmens im Ruhrgebiet handelt²⁰:



Abbildung 2.4: Exemplarisches Layout einer Stückgutpeditionsanlage

Nach Eintreffen eines beladenen Fahrzeugs und der Zuweisung zu einem der Eingangstore, werden die Sendungen entladen und zu denjenigen Toren transportiert, an denen die entsprechenden Fahrzeuge für die Anschlussrelation im Laufe des Tages abgefertigt werden. Da Stückgutsendungen aufgrund ihrer heterogenen Struktur (Gewicht, Volumen, Ladungsträger etc.) i.d.R. nicht maschinenfähig sind, werden bei der innerbetrieblichen Verbringung der Sendungen zwischen den Toren - anders als in den Anlagen der KEP-Branche, wo automatisch gesteuerte Sorter den innerbetrieblichen Transport der größtenteils standardisierten Pakete vornehmen - meist manuelle Umschlagmittel (Unstetigförderer²¹) eingesetzt. Diese müssen von entsprechendem Personal geführt werden, wodurch die Handlings- und Umschlagaktivitäten innerhalb der Halle einer Stückgutpeditionsanlage sehr kostenintensiv sind. Die innerbetrieblichen Transport- und Umschlagprozesse sowie die daran beteiligten Ressourcen werden in den folgenden Kapiteln weiter detailliert.

Stückgutanlagen agieren im Rahmen eines Verkehrstages zeitlich versetzt sowohl als Versandanlage (SA) als auch als Empfangsanlage (SE). Um die Prozesse innerhalb der kompletten Transportkette im Stückguttransportnetz aufeinander abzustimmen, wird mit einem **Fahrplan** gearbeitet, der die in der jeweiligen Anlage geltenden *Abfahrtszeiten* der Fernverkehrsfahrzeuge im Hauptlauf und der Nahverkehrsfahrzeuge im Nachlauf steuert. Aufgrund der Distanz und dem Fahrprofil der Strecken zu den einzelnen Empfangsanlagen bzw. aufgrund der Länge der Ausliefertouren (Anzahl Stopps, Zeitfenster, Distanz und Fahrprofil der Strecken) lassen sich die erforderlichen Abfahrtszeiten auf 15 Minuten genau berechnen. Die Hauptabfahrtszeit der Fernverkehrsfahrzeuge im SA liegt zwischen 18.30 Uhr und 20.00 Uhr. Der Großteil der Nahverkehrsfahrzeuge im SE verlässt zwischen 7.00 Uhr und 8.30 Uhr die Anlage. Die *Ankunft* der Fernverkehrsfahrzeuge in einer Anlage im SE richtet sich nach den Abfahrtszeiten aus den jeweiligen Versandanlagen. Die Hauptankunftszeit liegt zwischen 5.00 Uhr und 6.30 Uhr. Die Ankunft der Nahverkehrsfahrzeuge im SA leitet sich aus der Länge ihrer Sammeltouren ab und

²⁰ vgl. Clausen, Heimann, Goerke ([21]), 2004, S. 160

²¹ vgl. Ten Hompel, Schmidt ([78]), 2005, S. 123

hat eine Konzentration zwischen 16.00 und 18.00 Uhr²².

Die **Auslastung** einer Stückgutspeditionsanlage innerhalb eines Verkehrstages ist aufgrund der Aufteilung in eine SA- und SE-Phase auf der einen Seite sowie dem zusätzlichen Vorhandensein von Belastungsspitzen innerhalb dieser beiden Phasen auf der anderen Seite ungleichmäßig. Perioden mit vermehrten Fahrzeugankünften, starke Belastungen des Hofes der Anlage und das Erfordernis einer temporär hohen Umschlagleistung innerhalb der Umschlaghalle sind die Folgen.

2.3.1 Layout

Das Layout einer Stückgutspeditionsanlage wird im Rahmen des Neubaus oder aber der notwendig gewordenen Erweiterung einer bestehenden Anlage festgelegt. Ziel der Layoutplanung ist, zum einen die Anzahl und die Dimension der jeweiligen Objekte dem erwarteten Geschäft und der daraus resultierenden Systemlast anzupassen. Darüber hinaus soll zum anderen die Positionierung der Objekte so vorgenommen werden, dass später ein störungsfreier und kostenoptimaler Betrieb ermöglicht wird.

Die bei der Layoutplanung einzuplanenden Objekte lassen sich, wie in der folgenden Abbildung aufgeführt, in **bauliche Einrichtungen**, **Flächen** und **Verkehrswege** einteilen. Zusätzlich ist eine Unterscheidung entsprechend ihrer räumlichen Anordnung in **Objekte des Hofes bzw. des Yards** und in **Objekte der Umschlaghalle** möglich:

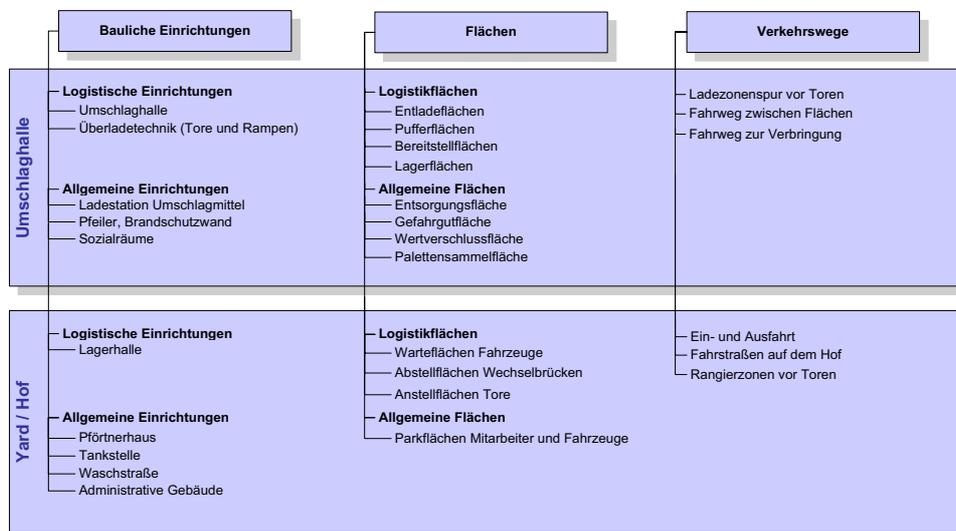


Abbildung 2.5: Klassifizierung der Layoutobjekte in Stückgutspeditionsanlagen

Im Folgenden wird - insofern sie für die spätere Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung relevant sind - auf die einzelnen Layoutobjekte eingegangen und diese mit ihren wichtigsten Eigenschaften beschrieben.

²² Die ermittelten Spitzenzeiten sind das Resultat einer Expertenbefragung unter den Stückgutspediteuren im Rahmen des Forschungsprojektes S 693.

Layoutobjekte: Bauliche Einrichtungen

Bei den baulichen Einrichtungen wird zwischen *allgemeinen Einrichtungen* und den im Rahmen der Leistungserbringung notwendigen, *logistischen Einrichtungen* unterschieden. Unter letztere fällt die *Umschlaghalle*. Es existieren die folgenden typischen Grundformen oder auch "Shapes":



Abbildung 2.6: Typische Grundformen von Umschlaghallen

Im Fall einer Neuplanung wird in der Praxis das I-Shape bevorzugt. Zum einen ist dieses in einer späteren Ausbauphase leicht in die Länge erweiterbar. Zum anderen hat ein Gebäude dieser Form möglichst wenige "Ecken". Innen- bzw. Außenecken führen dazu, dass Tore, die in der Nähe dieser Ecken installiert sind, nur eingeschränkt genutzt werden können. Ein Nachteil des I-Shapes ist die schnell ansteigende durchschnittliche Entfernung der äußeren Tore zu den zentral gelegenen Toren. Häufig ist allerdings aufgrund des Zuschnitts des Geländes oder aber einer nachträglichen Erweiterung eines der anderen Shapes gewählt worden. Die Größe der Umschlaghalle richtet sich nach der Anzahl an Toren, die in die Außenwände integriert werden müssen, sowie nach bestimmten Kennzahlen und Kapazitätsberechnungen für den Bedarf an innerbetrieblichen Flächen und Verkehrswegen.

Tore sind eine weitere wichtige logistische Einrichtung. Vor Inbetriebnahme einer Anlage findet eine Einteilung der Tore in Eingangs- und Ausgangstore statt. Grundsätzlich existieren verschiedene Tor- bzw. Rampentypen, die nach dem jeweiligen planerischen Erfordernis (z.B. Abstand zur Grundstücksgrenze, Ausnutzung des Platzes vor der Halle) ausgewählt werden. Häufigste Verwendung finden so genannte Kopframpen. Zusätzlich verfügen Anlage i.d.R. über eine bis zwei Seitenrampen zur Entladung sperriger Sendungen²³.

Viele Stückgutspeditionen treten als universelle Logistikdienstleister am Markt auf und bieten neben dem reinen Stückgutgeschäft zusätzliche Dienstleistungen wie etwa das Lagern von Sendungen in einem abgetrennten Bereich der Umschlaghalle oder aber die Bewirtschaftung eines externen Lagers an. Letztere Variante führt dazu, dass auf dem Hof der Stückgutanlage eine *Lagerhalle* steht. Sendungen, die von hier über das eigene Stückgutnetz transportiert werden sollen, werden sukzessive von der Lagerhalle in die Umschlaghalle transportiert und dort vereinnahmt.

Layoutobjekte: Flächen

Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen *allgemeinen Flächen* und *Logistikflächen* unterschieden. Eine Logistikfläche ist eine zusammenhängende räumlich begrenzte Fläche auf dem Hof oder innerhalb der Halle, welche zur Durchführung bestimmter logistischer Prozesse (z.B. Lagern)

²³ zur Definition Rampenarten vgl. VDI-Richtlinie ([84]), 1992, S. 8-10

notwendig ist. Eine allgemeine Fläche hingegen wird für zusätzliche, im Stückgutumschlag erforderliche, aber nicht logistische Funktionen verwendet (z.B. Wertverschlag, Gefahrgutfläche). Auf diese wird im Folgenden nicht weiter eingegangen, da sie für die spätere Modellierung nicht relevant sind.

Entladeflächen befinden sich räumlich in der Nähe der Eingangstore. Häufig existiert nur eine gebündelte Entladefläche für alle Eingangstore. Zweck dieser Flächen ist, auf ihnen die aus einem Fahrzeug entladenden Sendungen zunächst kurz abstellen zu können, damit das eingesetzte Umschlagmittel zeitnah die verbleibenden Sendungen entladen kann. Das hintergründige Ziel ist die möglichst schnelle Entladung des kompletten Fahrzeugs, um das Eingangstor für wartende Fahrzeuge frei zu geben und um die Sendungen möglichst schnell in das System aufnehmen zu können. Die Sendungen verbleiben i.d.R. nur eine kurze Zeitspanne von wenigen Minuten auf der Entladefläche, bevor ein anderes Umschlagmittel sie aufnimmt und weitertransportiert. Die Entladefläche dient häufig auch dazu, Schäden an Sendungen zu identifizieren, diese zu fotografieren oder aber noch notwendige Informationen aufzubringen (z.B. neu erstelltes Barcodelabel). Die Entladefläche ist zudem diejenige Fläche, auf der das Ziel einer Sendung und somit die Ausgangsrelation festgestellt wird. D.h. auf ihr findet der Verteil- und Sortierprozess der eingehenden Sendungen auf die abgehenden Relationen statt.

Bereitstellflächen sind Ausgangstoren eindeutig zugewiesen, ein Ausgangstor verfügt i.d.R. über genau eine Bereitstellfläche. Auf diesen Flächen werden alle Sendungen, die für die gleiche abgehende Relation gebucht sind, abgestellt, bis die Verladung in das entsprechende Transportgefäß beginnt. Die zielreine Bereitstellung auf einer abgegrenzten Fläche senkt das Risiko der Fehlverladung.

Eine *Pufferfläche* ist dadurch charakterisiert, dass hierauf Sendungen für eine bestimmte Dauer, die kürzer als der jeweilige Verkehrstag ist, abgestellt werden. Dies ist z.B. notwendig, wenn Sendungen im Rahmen des SA auf einem Nahverkehrsfahrzeug in der Anlage eingetroffen sind und deren Zieladresse eine Postleitzahl im eigenen Nahverkehrsgebiet ist. In diesem Fall werden die Sendungen nicht auf Fernverkehrsfahrzeuge der Hauptlaufrelationen geladen, sondern verbleiben in der Halle, bis der SA beendet wurde. Anschließend werden sie zu demjenigen Tor gebracht, an dem im SE die der Postleitzahl der Zieladresse entsprechende Nahverkehrsrelation abgefertigt wird. Häufig sind Pufferflächen in der Hallenmitte angeordnet.

Bietet der Spediteur als Zusatzgeschäft noch die Lagerung von Sendungen innerhalb seiner Umschlaghalle an, so führt dies dazu, dass zusätzlich *Lagerflächen* bereitgehalten werden müssen. Hier können Sendungen oder Produkte über einen längeren, mehrere Tage umfassenden Zeitraum hinweg abgestellt werden. Ziel ist es, die Tore der Anlage möglichst flexibel nutzbar zu halten. Eine Lagerung dieser Sendungen für die entsprechende Dauer vor einem der Ausgangstore ist nicht zweckmäßig.

Die Gestaltung des Zugriffs auf die Einheiten einer Logistikfläche hängt von dem logistischen Prozess ab, der auf der Fläche durchgeführt werden soll. Es werden hier Flächen im Blocklager und im Einzelzugriff unterschieden²⁴. Ist die Reihenfolge des Zugriffs auf die auf den Flächen befindlichen Sendungen unerheblich, so kann der Typ Blocklager verwendet werden. Dies ist

²⁴ vgl. Papendick ([64]), 2005, S. 62

z.B. bei einer Entladefläche der Fall. Soll allerdings eine Reihenfolge im Zugriff möglich sein, so muss der Typ Einzelzugriff gewählt werden. Bei der Beladung beispielsweise, muss der Fahrer aufgrund der Abfolge von Stopps in der Ausliefertour oder aber der möglichst sicheren Stauung der Sendungen eine bestimmte Reihenfolge bei der Beladung des Fahrzeugs einhalten. Somit hat sich für die Bereitstellflächen vor den Ausgangstoren in der Praxis der Einzelzugriff durchgesetzt. Dies wird i.d.R. dadurch garantiert, dass die Bereitstellfläche vor einem Tor aus zwei direkt aneinander grenzende Flächen besteht, welche mehrere Paletten hintereinander aufnehmen können. Diese auch als "Schienen" bezeichneten Flächen sind direkt vor den Toren eingezeichnet. Die Breite der Schienen richtet sich dabei nach den Abmessungen der Paletten. Die Länge hingegen ergibt sich aus den baulichen Gegebenheiten bzw. der maximalen Anzahl zeitgleich bereitzustellender EP und somit aus dem erwarteten Füllgrad der abgehenden Relationen. Dieser kann sehr unterschiedlich sein. Es wird aber versucht, 16 EP je Schiene abstellen zu können, was insgesamt je Bereitstellfläche zu 32 EP, dem Äquivalent zu der Kapazität eines Fernverkehrsfahrzeugs im Hauptlauf, führt.

Auf dem Hof einer Stückgutspeditionsanlage finden im Rahmen eines Verkehrstages logistische Prozesse statt, für die entsprechende Flächen bereit gehalten werden müssen. Hierbei handelt es sich um *Warteflächen für Fahrzeuge*, *Abstellflächen für Wechselbrücken* und *Anstellflächen vor den Toren*. Fahrzeuge des SA oder des SE, die bereits in der Anlage eingetroffen sind, für die aber noch keines der Tore frei ist, müssen auf *Warteflächen* positioniert werden, bis sie von dem Disponenten zugewiesen werden. Diese Flächen können sich am Rand des Geländes befinden oder aber direkt gegenüber den Eingangstoren. Ein häufig verwendetes Transportgefäß im Stückgutumschlag ist die Wechselbrücke (= WB). Neben dem reinen Transport dienen diese im Stückgutumschlag u.a. auch der Pufferung von Sendungen vor der Abfahrt, falls die innerbetrieblichen Flächen nicht ausreichen. In diesem Fall werden die Wechselbrücken an die Tore gestellt und sukzessive beladen. Ist der maximale Füllgrad (Volumen, Gewicht, Lademeter) erreicht, so werden sie durch eine neue Wechselbrücke ausgetauscht. Demnach ist eine Fläche erforderlich, auf der leere und volle WB gepuffert werden können. Die leeren WB werden auf dieser *Stellfläche* von Rangierfahrzeugen zur Beladung geholt bzw. nach ihrer Entladung abgestellt. Die vollen WB werden auf der Stellfläche gepuffert, bis eine zweite WB für die gleiche Tour beladen wurde und der Zug der entsprechenden Tour, bestehend aus beiden WB, zusammengestellt werden kann, um das Gelände zu verlassen. Direkt vor den Eingangs- und Ausgangstoren befinden sich *Anstellflächen*, auf denen die Transportgefäße bzw. die Transportmittel zur Be- und Entladung stehen.

Layoutobjekte: Verkehrswege

Die Verkehrswege in Stückgutspeditionsanlagen lassen sich entsprechend ihrer räumlichen Anordnung unterteilen in Verkehrswege des Hofes und in Verkehrswege der Umschlaghalle. Sie werden somit von unterschiedlichen Transport- und Umschlagmitteln befahren, woraus sich unterschiedliche Fahrwegbreiten ableiten lassen.

Vor den Toren, d.h. zwischen der Kante der Rampe und den Bereitstell- bzw. Entladeflächen, befindet sich die so genannte *Ladezone*, in denen sich die Umschlagmittel fortbewegen und drehen können. Diese Zone ist durchgängig entlang der Wand der Umschlaghalle angeordnet,

insofern hier Tore installiert sind. Die Umschlagmittel müssen zusätzlich zwischen zwei benachbarten Flächen manövrieren können. Hierfür sind *Fahrwege zwischen Flächen* eingerichtet. Im Inneren der Halle müssen Umschlagmittel längere Strecken zum Transport der Sendungen zwischen weit auseinander liegenden Flächen und Toren in höherer Geschwindigkeit zurück legen. Die erforderlichen *Fahrwege zur Verbringung* unterscheiden sich von den Fahrwegen zwischen zwei benachbarten Bereitstell- oder Entladeflächen in ihrer Breite, da sie i.d.R. Gegenverkehr der Umschlagmittel zulassen.

Zu den zu kennzeichnenden Verkehrswegen auf dem Hof einer Stückgutanlage zählen die *Ein- und Ausfahrtswege zum Gelände* und die *Fahrstraßen zwischen den Flächen und Toren*. Vor den Toren befinden sich neben den Anstellflächen zusätzliche *Rangierzonen*, um das Rückwärtssetzen der Fahrzeuge oder aber das Rangieren der Rangierfahrzeuge zum Abstellen und Aufnehmen der WB zuzulassen.

Die **Layoutplanung einer Stückgutanlage** wird i.d.R. einmalig vorgenommen und ordnet sich somit in einen strategischen Planungszusammenhang ein. Eine Anpassung des Layouts kann jedoch im Rahmen der Erweiterung der Anlage nach einigen Jahren vorgenommen werden.

2.3.2 Prozesse und Ressourcen

Im Stückgutumschlag wird die Last des Systems bzw. der Prozesse durch die beiden Begriffe **Sendung** und **Ladeinheit** beeinflusst. Diese werden zunächst voneinander abgegrenzt.

Unter einer **Sendung**²⁵ wird im Rahmen von Stückguttransportnetzen die Gesamtheit aller Güter, die als ein Transportauftrag vom Auftraggeber für einen bestimmten Verkehrstag an den Spediteur gestellt wurde, verstanden. Eine Sendung ist durch einen Be- und Entladeort sowie eine Gewichtsangabe zur Preisermittlung für die in Anspruch genommene Dienstleistung gekennzeichnet. Zusätzlich wird die Anzahl an Packstücken (= Collis) übergeben, aus denen die Sendung zusammengesetzt ist. Als **Ladeinheit**²⁶ (= LE) wird in der Logistik eine "Teilmenge von Packstücken, die zwecks Ausführung von Transport, Umschlag und Lagerung in dauerhafter Weise zusammen gefasst sind", bezeichnet. Die zu einer LE zusammengefassten Packstücke werden auf *Ladungsträgern* durch das logistische System transportiert. Durch genormte Ladungsträger wird der Handlingsaufwand der hierauf gelagerten Waren innerhalb der Transportkette vereinfacht. Eine Sendung kann aus verschiedenen Packstücken bestehen, die wiederum zu LE auf Ladungsträgern gebündelt sind. Die Ladungsträger bzw. die LE bestimmen die Häufigkeit der Wiederholung der innerbetrieblichen Handlings- und Transportprozesse, die dabei verwendeten Ressourcen und den benötigten Platzbedarf auf den Logistikflächen. In Kapitel 4 wird daher die LE als Basis für das mathematische Modell und die darin zu treffenden Entscheidungen gewählt.

²⁵ vgl. Klaus, Krieger ([49]), 2004, S. 472

²⁶ vgl. Klaus, Krieger ([49]), 2004, S. 263

Prozesse im Stückgutumschlag:

In den Abbildungen 2.7, 2.8 und 2.9 werden die Teilsysteme "Ankunft", "Umschlag" und "Abfahrt" vorgestellt. Die in den Teilsystemen enthaltenen Prozesse werden jeweils als Prozessketten²⁷ aufgeführt. Es werden u.a. Konnektoren²⁸ zur Darstellung eines Entweder-Oder und einer zeitlichen Parallelität verwendet. Eine Unterscheidung der Teilsysteme nach den Verkehrswegen SA und SE ist aufgrund der großen Übereinstimmung in den Prozessen nicht erforderlich. Es wird im Folgenden daher von ankommenden Fahrzeugen zur Entladung und abgehenden Fahrzeugen zur Beladung gesprochen.

Teilsystem Ankunft:

Nach Eintreffen eines Fahrzeugs zur Entladung in der Stückgutspeditionsanlage meldet sich der Fahrer beim Pförtner an (1.1). Für den Fall, dass der Pförtner für Prozesse, die über die reine Anmeldung hinausgehen, autorisiert ist, kann der Fahrer hier seine Begleitpapiere abgeben. Anschließend leitet der Pförtner die Informationen an die Dispositionsabteilung weiter (1.2a). Hat der Pförtner die entsprechenden Befugnisse nicht, so muss der Fahrer das Fahrzeug auf einer Parkfläche abstellen, zur Dispositionsabteilung gehen und dort die Papiere abgeben (1.2b).

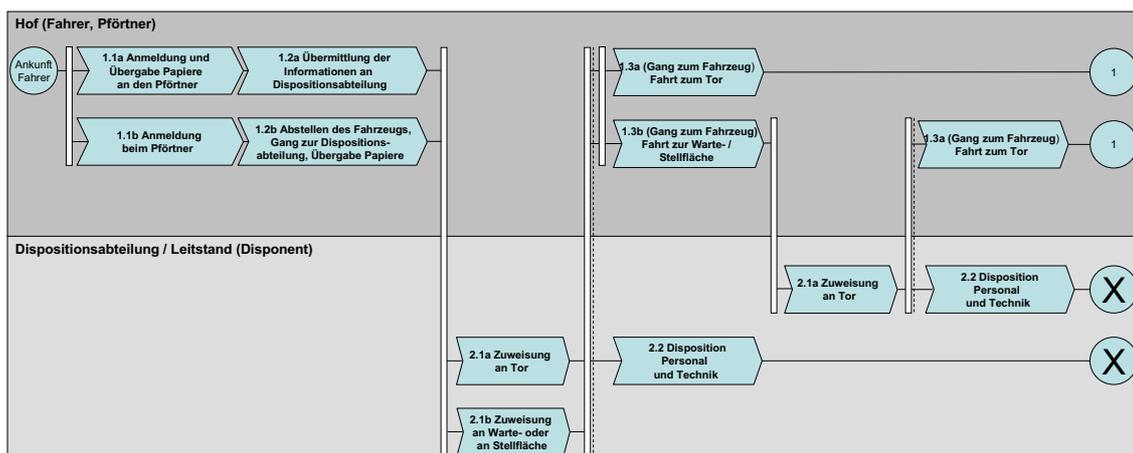


Abbildung 2.7: Teilsystem Ankunft

Aufgrund der aktuellen Situation in der Anlage und der erhaltenen Informationen weist der Disponent den Fahrer entweder einem der Eingangstore zu (2.1a) oder schickt ihn zunächst zu einer Wartefläche (2.1b). Bei Anweisung an ein Tor setzt der Disponent sich mit dem Schichtführer oder dem Hallenmeister in Verbindung, um ihn über das demnächst an einem der Eingangstore eintreffende Fahrzeug in Kenntnis zu setzen und so die Bereitstellung entsprechenden Personals bzw. Umschlagtechniken rechtzeitig zu ermöglichen (2.2). Zeitgleich fährt der Fahrer zu dem angewiesenen Tor (1.3a). Werden der Fahrer und dessen Zugmaschine nicht weiter benötigt, so kann der Fahrer auf eine Stellfläche angewiesen werden, auf der er die Wechselbrücken oder

²⁷ "Prozessketten sind die Darstellung von Material- und Informationsflüssen. Hierfür werden abgrenzbare Teilprozesse definiert und die logische Reihenfolge der Durchläufe von Aufträgen (Informationseinheiten) und operativen Basisgrößen (Transporteinheiten) durch das Unternehmen dokumentiert". (vgl. Kuhn ([53]), 1995, S. 37)

²⁸ vgl. Käppner et. al. ([48]), 2002, S. 34

den Sattelaufleger abstellt (1.3b). Von hier werden diese später vom Rangierer an das entsprechende Tor verbracht, wenn die Zuweisung durch den Disponenten erfolgt ist. Die Order an den Rangierer fällt mit unter den Prozess 2.2 "Disposition Personal und Technik".

Teilsystem Umschlag:

Wurde durch den Disponenten über die bevorstehende Entladung eines Fahrzeugs informiert, so holt ein Mitarbeiter des Umschlags die das Fahrzeug begleitenden Papiere mit Informationen zu den geladenen Sendungen und Ladeeinheiten in der Dispositionsabteilung ab (3.1).

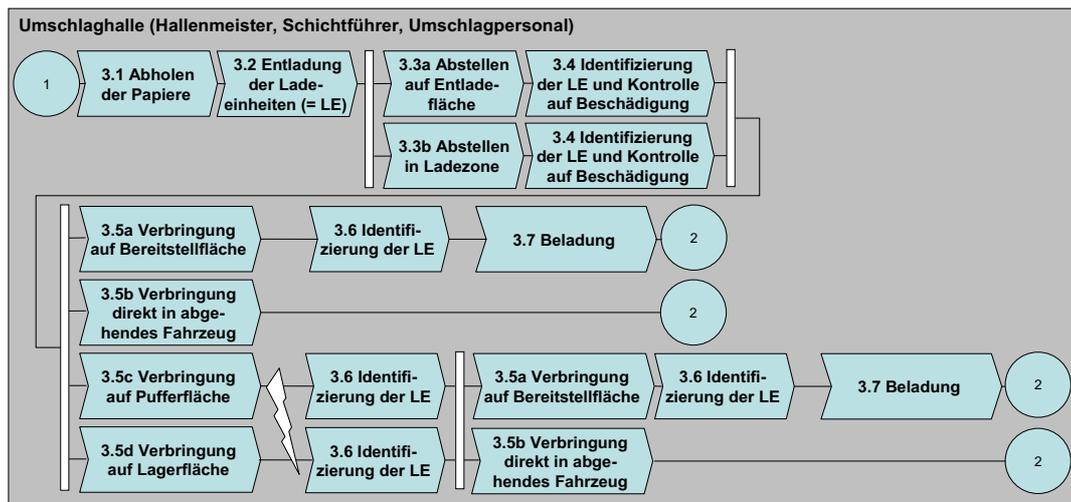


Abbildung 2.8: Teilsystem Umschlag

Mit Ankunft des Fahrzeugs am Tor wird das Transportgefäß geöffnet und nach dem endgültigen Andocken an der Rampe damit begonnen, die Ladeeinheiten zu entladen (3.2). Dabei können die LE entweder auf einer Entladefläche oder in der Ladezone abgestellt werden, wo sie zunächst identifiziert und anschließend auf Beschädigungen überprüft werden (3.3, 3.4). Falls notwendig, kann auf den Entladeflächen durch zusätzliches Personal ein Barcodelabel mit den Adress- und Relationsinformationen erstellt und auf der LE angebracht werden. Bei der Identifizierung wird festgestellt, auf welche abgehende Relation die jeweilige LE zu sortieren ist. Die LE werden anschließend vom Umschlagpersonal zu der Bereitstellfläche der identifizierten Zielrelation verbracht (3.5a). Dort werden alle LE einer Relation erneut identifiziert und anschließend auf das bereitstehende Transportgefäß bzw. Transportmittel geladen (3.6, 3.7). Für den Fall, dass eine LE nicht erst gepuffert, sondern direkt in das bereits angedockte Transportmittel verbracht werden soll (3.5b), geschieht die Identifizierung erneut in der Ladezone oder auf der Überladebrücke. Die LE muss folglich nur noch im Transportgefäß abgestellt werden. Diese spezielle Prozesskette (3.4 → 3.5b) wird im Stückgutumschlag als "Durchladen" bezeichnet. Im Großteil der Fälle werden die Ladeeinheiten einer Relation allerdings zunächst auf der Bereitstellfläche gepuffert (3.4 → 3.5a → 3.6 → 3.7). Wurde nach der Entladung festgestellt, dass die Sendung erst in den kommenden Tagen transportiert werden darf bzw. für das eigene Nahverkehrsgebiet bestimmt ist und somit nicht im SA die Anlage verlassen soll, so werden die entsprechenden Ladeeinheiten zu speziell ausgewiesenen Lager- oder Pufferflächen verbracht (3.5c und 3.5d).

Der Pfeil soll andeuten, dass hier ein zeitlicher Bruch statt findet. Die Sendungen, die entsprechend der Prozesse 3.5c und 3.5d abgestellt werden, werden erst in der nächsten Verkehrswelle oder einem der folgenden Tage erneut identifiziert und beladen.

Je nach Zusammensetzung der geschilderten Prozessschritte ergeben sich im Stückgutumschlag unterschiedliche Transportmuster zwischen zwei Fahrzeugen, die durchaus gleichzeitig in ein- und derselben Stückgutanlage auftreten können. Die Transportmuster werden in der späteren mathematischen Modellierung in Kapitel 4 erneut aufgegriffen.

Teilsystem Abfahrt:

Ist ein Transportgefäß, z.B. eine Wechselbrücke, vollständig beladen, so wird im SA zur Sicherung der Ladung noch eine Plombe an die WB angebracht (4.1). Anschließend erfolgt eine Anweisung an das Rangierpersonal oder den Fahrer, dass das Transportgefäß bzw. -mittel vom Tor abgezogen werden kann (4.2).

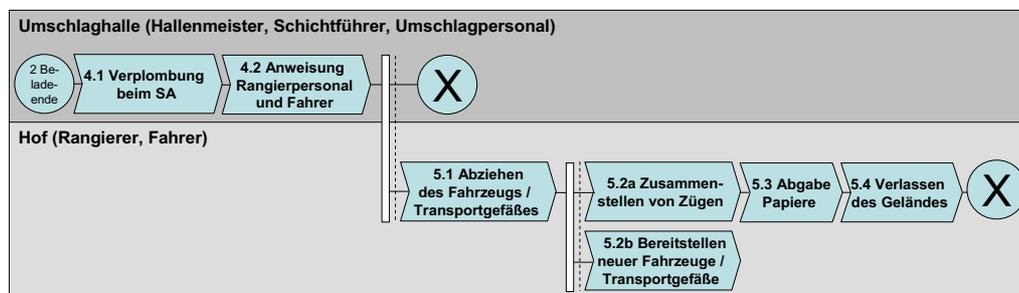


Abbildung 2.9: Teilsystem Abfahrt

Zusätzliche Aufgaben des Rangierpersonals liegen darin, bereits beladene Transportgefäße einer Tour zusammen zu stellen (5.2a) oder neue Transportgefäße an den Toren bereit zu stellen (5.2b). Ist eine Tour zur Abfahrt bereit, erhält der Fahrer die entsprechenden Papiere und kann die Anlage verlassen.

Ressourcen im Stückgutumschlag:

Zur Durchführung der oben beschriebenen Prozesse werden diverse personelle und technische Ressourcen benötigt, die im Folgenden vorgestellt werden.

Ressourcen Ladungsträger:

Der am weitesten verbreitete Ladungsträger zum vereinfachten Transport und Handling der Sendungen im Stückgut ist die Palette. Zu dieser Grundform zählen verschiedene Ausführungen, wie etwa die Europalette, die Sonderpalette, die Einwegpalette oder auch die Gitterboxpalette²⁹. Der Anteil an palettierten Sendungen bewegt sich je nach Spedition zwischen 50% und 90%. Im Durchschnitt liegt er bei 60-70%³⁰. Möglich sind aber auch Kartons und Kisten oder unhandliche Rollen und Trommeln. Die heterogene Sendungsstruktur im Stückgutgeschäft, welche sich in

²⁹ zur Definition *Palettenarten* vgl. DIN EN ISO 445 ([26]), 1998

³⁰ vgl. Papendick ([64]), 2005, S. 59

unterschiedlichen Formen, Gewicht und Verpackungsarten bzw. Ladungsträgern äußert, ist mit ein Grund für die hohen Betriebskosten in den Umschlaganlagen.

Ressourcen Informationsfluss:

Arbeitet eine Stückgutspedition mit Barcodelabeln, so werden die Sendungsinformationen über einen Barcodescanner aus dem angebrachten Label erfasst. Derart stationäre oder mobile Barcodeseegeräte befinden sich sowohl an den Eingangs- als auch an den Ausgangstoren. Sendungen, die noch kein Barcodelabel tragen, werden manuell erfasst und ein Label anschließend gedruckt und aufgeklebt. Hierfür sind im Eingangsbereich eine Tastatur und ein Labelerzeugungsgerät installiert. An den Ausgangstoren sind in regelmäßigen Abständen Informationspunkte eingerichtet. Diese bestehen aus einem Monitor und einer Tastatur. Hierüber kann sich das Umschlagpersonal Informationen zum aktuellen Status von Relationen und Sendungen holen.

Ressourcen Umschlagmittel:

Innerhalb der Umschlaghalle werden im Stückgutbereich *größtenteils manuelle Umschlagmittel* für die Hauptprozesse eingesetzt. Die manuellen Umschlagmittel können sowohl durch menschliche Kraft als auch elektrisch betrieben sein. Voraussetzung für die Definition "manuell" ist lediglich, dass ein Mitarbeiter mit der Führung betraut sein muss. Typische elektrisch betriebene manuelle Mittel sind der batteriebetriebene Handgabelhubwagen oder der 3-Rad- und 4-Rad-Gabelstapler mit Fahrer. Neben den elektrisch betriebenen Mitteln existieren noch handgeführte Handgabelhubwagen. Tendenziell werden elektrische Umschlagmittel aufgrund ihrer höheren Geschwindigkeit (ca. 16 km/h) für die Verbringung über längere Distanzen eingeteilt, während die Be- und Entladung auch durch einfachere Umschlagmittel, wie den Handgabelhubwagen durchgeführt werden können. Die Ladekapazität eines Umschlagmittels liegt i.d.R. bei einer LE (z.B. Palette). Die Betriebskosten der manuellen Umschlagmittel können in Personalkosten und Betriebskosten des technischen Geräts (z.B. Verschleiß-, Treibstoff-, Leasing-, Wartungskosten) unterteilt werden. Hierbei machen die Personalkosten mit ca. 80% den größten Anteil aus (Leasingkosten: 14%, Treibstoff 6%)³¹.

Automatisierte Umschlagmittel bilden das Gegenstück zu den manuellen Umschlagmitteln. Hierunter fallen z.B. die unterschiedlichsten Varianten des Unterflurschleppkettenförderer³², welcher in der Praxis auch allgemein als "Kette" bezeichnet wird. Das Umschlagpersonal hakt die LE, welche sich auf Gabelhubwagen befinden, in Mitnehmer in der Kette ein bzw. aus. Den Transport der LE über die Distanz in der Halle zwischen den Toren und Flächen wird anschließend von der Kette durchgeführt. Diese Form der Umschlagtechnik ist wesentlich seltener im Stückgutumschlag anzutreffen³³. Zum einen führen sie zu einem höheren Platzbedarf innerhalb der Umschlaghalle. Zum anderen ist sie aufgrund der heterogenen Sendungsstruktur, welche unterschiedliche Verpackungsarten, Gewichte und Ausmaße der Sendungen nach sich zieht, nicht für das Geschäft einer jeden Spedition geeignet.

³¹ Die ermittelten Prozentzahlen sind das Resultat eines Industrieprojektes zur Optimierung der innerbetrieblichen Umschlagmittelressourcen am Lehrstuhl Verkehrssysteme und -logistik.

³² vgl. Jünemann und Schmidt ([47]), 1999, S. 98

³³ vgl. Dilling ([27]), 2003, S. 5

Ressourcen Lagerung:

Kernaufgabe einer Stückgutspeditionsanlage ist der Umschlag der Sendungen zwischen den ankommenden und den abgehenden Fahrzeugen innerhalb eines Verkehrstages. Zur Realisierung der damit verbundenen schnellen Transport- und Umschlagprozesse ist eine Einlagerung der Sendungen in speziellen Lagertechniken nicht erwünscht. Die im Stückgutumschlag anzutreffenden Logistikflächen sind daher lediglich durch Linien auf dem Boden gekennzeichnet. Für die in der Anlage verbleibenden Sendungen des eigenen Nahverkehrsgebiets oder aber für eventuell auftretende Überhänge zum Transport in den folgenden Tagen werden auf den ausgewiesenen Lager- und Pufferflächen häufig Palettenregale eingesetzt. Andere Regaltechniken sind unüblich.

Ressourcen Verkehr und Hof:

Bei den im Fernverkehr eingesetzten Transportgefäßen handelt es sich i.d.R um Wechselbrücken. Dies gilt vor allem für den nationalen Verkehr. Für internationale Verkehre sind Wechselbrücken eher unüblich. Statt dessen werden hier Sattelaufleger oder Anhänger verwendet. Im Nahverkehr sind aufgrund der Kürze der Distanzen und der hohen Stoppdichte in den Anlagen der Verloader verstärkt Kleinfahrzeuge mit einem zulässigen Gewicht bis zu 3 oder 7,5 Tonnen anzutreffen.

Setzt ein Stückgutspediteur für den Hauptlauf Wechselbrücken oder Sattelaufleger ein, so müssen diese zwischen den Stellflächen und den Toren von einem Rangierer bewegt werden. Hierfür stehen so genannte Umsetzer zur Verfügung. In den Spitzenzeiten werden die Rangierfahrzeuge durch die Trägerfahrzeuge und Zugmaschinen der Fahrer des Fernverkehrs unterstützt.

2.3.3 Informationsfluss

Ein Großteil der Stückgutspediteure verwenden Barcodelabels³⁴ zur Identifikation, zur Sortierung und zur Nachverfolgung der Sendungen. Diese bestehen aus einer Adressinformation sowie einer Relationsinformation für den Hauptlauf. Daneben existieren verschiedene papierbehaftete Dokumente, die teilweise parallel - von manchen mittelständischen Speditionen aber auch noch durchgehend - genutzt werden. An insgesamt fünf Schnittstellen ist eine Kontrolle der Informationen zur Verfolgung der Stückgutsendungen im Rahmen der Transportkette³⁵ vom Verloader über die Versand- und Empfangsanlagen bis zum Empfänger aus Sicht der beteiligten Akteure relevant.

³⁴ zur Definition *Barcodelabel* vgl. Ten Hompel, Schmidt ([78]), 2005, S. 206-213

³⁵ Unter der Transportkette wird laut [DIN 30 780] die "Folge von technisch und organisatorisch verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden" verstanden.

Diese sind in folgender Abbildung dargestellt und werden im Anschluss erläutert:

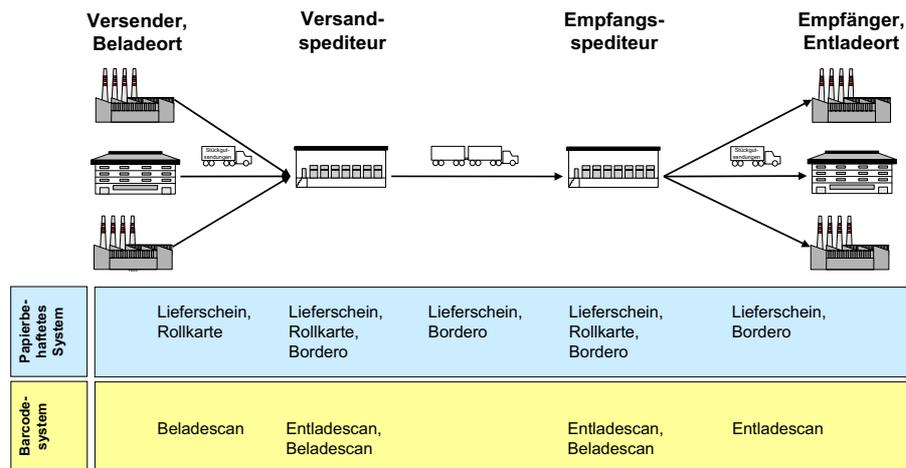


Abbildung 2.10: Informationsfluss in der (Standard-) Transportkette einer Stückgutsendung

- **Übernahme der Sendung beim Versender durch den Nahverkehrsfahrer:**

Die Auftragsannahme erfolgt in 90% der Fälle³⁶ per Datenfernübertragung. Die erhaltenen Informationen zu dem avisierten Transportauftrag bilden die *Sendungsdaten*. Diese werden in einer Speditionssoftware abgelegt und umfassen Informationen zum Auftraggeber, dem Frachtzahler, zu der Belade- und der Entladeadresse der Sendung, zu Abrechnungsdetails für die spätere Leistungsverrechnung (vor allem das frachtpflichtige Gewicht) und eventuell genauere Angaben zu den Packstücken. Basierend hierauf werden in der Dispositionsabteilung der Spedition die relevanten Begleitpapiere gedruckt. Hierzu gehören der *Lieferschein*, der die Sendungen entlang der kompletten Transportkette vom Belade- bis zum Entladeort begleitet und häufig auch zugleich als Speditionsauftrag³⁷ gilt. Im Anschluss hieran wird die Nahverkehrsdisposition durchgeführt. Ergebnis der Disposition sind die Nahverkehrstouren des jeweiligen Verkehrstages sowie die *Rollkarten*, auf denen neben verschiedenen Sendungsinformationen die Reihenfolge der Stopps für den jeweiligen Nahverkehrsfahrer vermerkt sind. Ist der Versender mit einer Möglichkeit zur Labelerzeugung ausgestattet, so kann dieser bereits vor der Abholung den entsprechenden Datenträger auf der Sendung anbringen. In diesem Fall scannt der Nahverkehrsfahrer die Sendung bei der Beladung, ansonsten übernimmt er die Sendungen, indem er sie mittels der Lieferscheine und Rollkarten kontrolliert.

- **Vereinnahmung der Sendung in der Anlage des Versandspediteurs:**

Nach Eintreffen des Nahverkehrsfahrzeuges in der Anlage des Versandspediteurs werden die Sendungen bei der Entladung anhand der Dokumente auf Richtigkeit (Vollständigkeit und Schadensfreiheit) kontrolliert. Abweichungen werden auf der Rollkarte notiert. Sind die Sendungen bereits vorgelabelt, so kann bei der Entladung durch das Entladepersonal ebenfalls ein Scan des Labels über einen Handscanner erfolgen. Besitzt eine Sendung noch kein Label, so wird an dieser Stelle entsprechend der papierbehafteten Informationen ein Label erstellt und aufgebracht. Im Anschluss an die Erfassung der Daten bei der Entladung

³⁶ vgl. Papendick ([64]), 2005, S. 125

³⁷ zur Definition *Speditionsauftrag* vgl. Klaus ([49]), 2004, S. 478

werden Ladelisten und Borderos erstellt. Die *Ladefliste* gibt dem Personal bei der Beladung der Fernverkehrsfahrzeuge für den Hauptlauf Auskunft über die zu ladenden Sendungen (z.B. Anzahl an Packstücken) und dient somit der Kontrolle der Vollständigkeit der auf den Bereitstellflächen zur Beladung bereitstehenden Sendungen. Ein *Bodero* enthält zum einen Informationen zu den Sendungen und zum anderen technische Informationen zu der zu erbringenden Dienstleistung, wie etwa der Hinweis auf eine Terminsendung.

- **Verladung der Sendung auf das im Fernverkehr eingesetzte Fahrzeug:**

Mit dem *Bodero* bestätigt der im Hauptlauf eingesetzte Frachtführer die Korrektheit der entgegengenommenen Sendungen. Es dient somit als Frachtbrief³⁸ und wird später auch als Grundlage für die Abrechnung zwischen Versand- und Empfangsspediteur verwandt. Parallel wird bei der Beladung der Hauptlauffahrzeuge, falls möglich, ein *Beladescan* der Sendungen durchgeführt. Ist das Transportgefäß vollständig beladen und verplombt, erhält der Fahrer die Ladeliste, das *Bodero* und die Lieferscheine zur Begleitung der Sendungen im Hauptlauf. Zusätzlich werden die Sendungsinformationen von der Dispositionsabteilung bei der Abfahrt per DFÜ an den Empfangsspediteur übermittelt, um frühzeitig die später eintreffenden Sendungen zu avisieren.

- **Vereinnahmung der Sendung in der Anlage des Empfangsspediteurs:**

Die Sendungen der in den Empfangsspeditionen eintreffenden Hauptlauffahrzeuge werden bei der Entladung erneut anhand der *Borderos* und Lieferscheine auf Richtigkeit überprüft und gescannt. I.d.R. sind bei Erstellung der Barcodelabel die Nummern der Nahverkehrsrelationen zur Ausrollung von der Empfangsanlage noch nicht bekannt. Die zugewiesene Nahverkehrsrelation wird daher an dieser Stelle per Hand aufgetragen, damit das Umschlagspersonal weiß, zu welchem Tor die jeweilige Sendung transportiert werden muss. Anschließend werden erneut Rollkarten für die Beladung der Touren der einzelnen Nahverkehrsrelationen von der Dispositionsabteilung erstellt und an die Nahverkehrsfahrer zur Kontrolle der Sendungen bei der Beladung verteilt.

- **Auslieferung der Sendung am Entladeort:**

Zusätzlich dient die Rollkarte zur Bestätigung der Annahme der Sendungen durch die Fahrer der in der Auslieferung eingesetzten Subunternehmer. Nach Beendigung der Ausliefertouren wird ein *Entladebericht* an den Versandspediteur übermittelt. Dieser umfasst Angaben über Fehlmengen, Schäden und Unstimmigkeiten und wird als Basis für die Abrechnung zwischen Empfangs- und Versandspediteur verwandt.

Die Kontrollen sind u.a. erforderlich, um den Übergang der Sendungen zwischen den beteiligten Speditoren nachzuvollziehen. Dies hilft bei einer späteren eindeutigen Zuweisung von eventuell aufgetretenen Schäden oder Qualitätsmängel zu dem verantwortlichen Akteur innerhalb der Transportkette.

In anderen Logistikbereichen, vor allem im Handel, sind in den letzten Jahren Transponder-Systeme als neue Technologie zur Identifikation von Objekten im Materialfluss zunehmend in den Fokus der Diskussionen und somit auch der Entwicklung und Forschung gerückt (Radio

³⁸ zur Definition *Frachtbrief* vgl. Klaus ([49]), 2004, S. 158

Frequency Identification (= RFID)). Transponder bieten gegenüber Barcodelabeln einige Vorteile. So können hierauf mehr Informationen gespeichert werden und eine Mehrfachnutzung der Datenträger ist möglich. Zusätzlich ist für die Erfassung der gespeicherten Informationen kein Sichtkontakt zwischen Lesegerät und Datenträger notwendig, was zu Vorteilen im Handling führen kann. Der Nachteil der Transpondertechnik liegt allerdings in höheren Kosten für die Anschaffung der einzelnen Tags sowie der dazugehörigen Lese- und Schreibegeräte. Aufgrund der Tatsache, dass der Handel sich verstärkt der RFID-Technologie zuwendet, sehen sowohl universelle Logistikdienstleister als auch Stückgutspediteure zukünftig die Notwendigkeit, sich mit dieser Technologie auseinander zu setzen. Die Chancen werden hierbei allerdings unterschiedlich bewertet. Für den Stückgutspediteur bildet die Ladeinheit oder der Ladungsträger die Basis seiner Prozesse. Auf dieser können sich durchaus mehrere Packstücke, Waren oder Artikel befinden. Das Handelsunternehmen bzw. auch der Logistikdienstleister, der das Warehousing für ein Handelsunternehmen übernommen hat, beziehen sich im Rahmen ihrer Prozesse auf die einzelnen Artikel. Es besteht die Frage, wie die RFID-Technik innerhalb einer Transportkette vom Verloader über die Anlagen der beteiligten Stückgutspediteure bis hin zum Empfänger zur Optimierung der Prozesse aller Akteure sinnvoll eingesetzt werden kann (Artikelebene vs. Ladungsträgerebene). Der Deutsche Speditions- und Logistikverband hat diesbezüglich eine Studie zum Einsatz von RFID im Stückgutgeschäft angefertigt. In dieser Studie wird vor allem in der Pulkerfassung³⁹ über so genannte "Schleusen" grundsätzlich die Möglichkeit gesehen, Personal für die Erfassung und Identifikation der Sendungen im Rahmen der Prozesse des Stückgutumschlags einzusparen⁴⁰. Dennoch werden basierend auf dem aktuellen Stand der Technik, nach einer szenarienbasierten Kostenbetrachtung RFID vs. Barcode, die Kosten einer durchgängigen Einführung von RFID als zu hoch eingeschätzt "ohne dass zunächst ein deutlicher Nutzen für Speditionsunternehmen erkennbar wäre"⁴¹.

2.3.4 Betrieb und Strategien

Die Durchführung der geschilderten Prozesse und die Bedienung der daran beteiligten Ressourcen wird üblicherweise innerhalb zweier Schichten durch das Umschlagpersonal vorgenommen. Die Betriebssteuerung umfasst die Personaleinsatzplanung, die Fahrzeugsteuerung auf dem Hofgelände, die Zuweisung des Personals zu den Prozessen sowie die Qualitätssicherung bei den durchzuführenden Prozessen. Sie verteilt sich auf mehrere Verantwortungsbereiche. Hierzu zählen der Betriebslenker, der Hallenmeister, der Schichtführer und der Teamführer. Manche Stückgutanlagen verfügen auch über einen separaten Leitstand und einen Disponenten, der die Steuerung der Fahrzeuge auf dem Hof der Anlage verantwortet. Bestehende Lösungsansätze werden in Kapitel 3.1 vorgestellt.

Die direkte Steuerung des Personals kann mündlich oder aber über visuelle Einrichtungen und Funkverbindungen erfolgen. Eine Schwachstelle liegt dabei in der organisatorischen Trennung der Prozesse auf dem Hof einer Stückgutanlage und der Prozesse innerhalb der Umschlaghalle. Zusätzlich sind die beiden Bereiche aufgrund ihrer räumlichen Größe und dem Mangel an

³⁹ vgl. Ten Hompel ([78]), 2005, S. 246

⁴⁰ vgl. Studie DSLV ([32]), 2003, S. 30

⁴¹ vgl. Studie DSLV ([32]), 2003, S. 20

automatisch erfassten Informationen zum aktuellen Zustand für die Führungspersonen äußerst intransparent. Die Folge sind Fehlanweisungen und eine erschwerte Leistungskontrolle des Personals. In der Verbesserung der Informations- und Kommunikationssysteme im Betrieb einer Stückgutanlage wird noch erhebliches Potenzial gesehen.

Es haben sich dennoch im Stückgutumschlag bestimmte "Betriebsstrategien" durchgesetzt, die im Folgenden vorgestellt werden:

Die *Zufahrt auf das Hofgelände* kann entweder immer frei oder aber an bestimmte Bedingungen geknüpft sein. So darf beispielsweise eine Einfahrt erst dann erfolgen, wenn ein Tor oder eine Wartefläche für das Fahrzeug frei ist. Häufig wird darauf geachtet, dass Fahrzeuge nur dann auf das Gelände fahren, wenn sichergestellt ist, dass ihre Abfertigung bald erfolgt bzw. dass sie laut Fahrplan innerhalb der nächsten Stunden wieder abfahren. Ziel hiervon ist die Reduzierung der Verkehrsbelastung des Hofes.

Ist ein Fahrzeug auf dem Hof der Anlage eingetroffen, so kann es direkt zur Entladung an ein Tor angewiesen werden. Findet die Entladung allerdings nicht sofort statt und muss das Fahrzeug warten, so kann es auf eine Wartefläche gestellt werden oder aber direkt vor das Tor, an dem es später entladen werden soll (*Wartestrategien für Fahrzeuge*). Letzteres führt dazu, dass die Tore unnötig blockiert und für zeitkritische Fahrzeuge belegt sind. Die Variante "Warten auf einer Wartefläche" ist daher vorteilhafter. Stehen mehrere Fahrzeuge gleichzeitig zur Zuweisung bereit, muss entschieden werden, welches der Fahrzeuge als nächstes an ein Tor gestellt wird. Dies kann nach der Strategie First-come-first-Serve erfolgen⁴², d.h. die Fahrzeuge werden entsprechend der Reihenfolge ihres Eintreffens in der Warteschlange einem der Tore zugewiesen. Anderen Strategien folgend, wird dasjenige Fahrzeug zuerst zugewiesen, das entweder einen sehr nahen Abfahrtszeitpunkt oder aber dringende Sendungen geladen hat. Dringlichkeit einer Sendung liegt im Stückgutbereich dann vor, wenn eine der Ladeeinheiten eine Fernrelation erreichen soll, deren letzte Tour über einen sehr nahen Abfahrtstermin verfügt.

Ausgangsseitig legen Betreiber eine *Zuordnung von Relationen zu Toren* fest. Hierbei achten sie auf die resultierenden innerbetrieblichen Wege und versuchen diese zu minimieren. Es sind in der Praxis aber auch die Strategien "nach aufsteigender Relationsnummer" oder "gleiche Postleitzahlengebiete an nebeneinander liegenden Toren" anzutreffen. Eingangsseitig ist die *Strategie zur Zuweisung der Touren an Tore* entweder offen, d.h. der Fahrer einer Tour kann an jedes beliebige Entladetor fahren und entscheidet selbst, oder ein Disponent bestimmt das anzufahrende Tor. Hierbei achtet er auf die Anschlussziele der geladenen Sendungen und weist demnach das Fahrzeug einem Tor in der Nähe derjenigen abgehenden Relation zu, wo der Großteil der Sendungen hingehen wird⁴³.

Für die *Steuerung der Abläufe in der Umschlaghalle* wird zunächst das zur Verfügung stehende Umschlagpersonal den Hauptprozessen Entladung, Verbringung und Beladung zugeordnet. Das Personal für die Be- und Entladung kann anschließend entweder selbstständig die anstehenden Arbeitsaufträge ausführen oder aber in Teams eingeteilt sein. In letzterem Fall werden beispielsweise zwei Mitarbeiter für ein oder mehrere Tore eingeteilt und müssen ausschließlich die

⁴² vgl. Bartholdi ([38]), 2000, S. 7

⁴³ Expertengespräch mit Disponenten der WM Group in Bocholt am 2. Juni 2006

dort bereitstehenden Fahrzeuge bearbeiten. Häufig werden auch die Fahrer der Nah- und Fernverkehrsfahrzeuge im Rahmen der Be- und Entladung ihrer Fahrzeuge zur Unterstützung des Umschlagpersonals eingesetzt. Das Personal zur Verbringung arbeitet i.d.R. nach dem Prinzip First-Come-first-Serve. Alle Ladeeinheiten, die zur Verbringung auf einer Fläche bereitstehen, werden der Reihe nach aufgenommen und zu den Bereitstellflächen gebracht.

2.4 Planungsaufgaben in Stückgutspeditiionsanlagen

Die in einer Stückgutspeditiionsanlage relevanten Planungsaufgaben lassen sich in *strategische*, *mittelfristige* und *operative* bzw. *dispositive* Aufgaben unterteilen:

Zeitlicher Horizont	Planungsaufgabe	Anlass	Teilgebiete
Strategisch	Layoutplanung	<ul style="list-style-type: none"> - Anlagenneubau - Anlagenerweiterungsbau (Einmalig oder alle paar Jahre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hallenlayout: Hallenform und -größe • Position der Halle auf dem Grundstücksgelände • Anzahl an Toren und ihre Position in Hallenwand • Einteilung der Tore in Eingangs- und Ausgangstore • Lage und Größe der Verkehrswege und Prozessflächen
Mittelfristig	Betriebsplanung	<ul style="list-style-type: none"> - Inbetriebnahme der Anlage - Geschäftszuwachs, -einbruch - Saisonale Effekte (Periodisch, alle paar Monate) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgangsseitige Tor-Relation-Zuordnung • Prozessdesign (Abfolge der Prozessschritte zwischen Ent- und Beladung) • Fahrplangestaltung und Nahverkehrsdisposition (Einteilung in Rahmentouren) • Ressourcenplanung (Ressourcentyp und -stärke)
Operativ / Dispositiv	Betriebssteuerung	<ul style="list-style-type: none"> - Tägliche Leistungserbringung - Steuerung der Prozesse und Ressourcen (Täglich, stündlich) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nahverkehrsdisposition, -tourenbildung (Zuweisung Stopps) • Eingangsseitige Zuweisung der Fahrzeuge zur Entladung • Yard Management • Durchsatz der Sendungen durch die Umschlagsanlage • Ressourcenplanung (Schichtplanung)

Tabelle 2.1: Planungsaufgaben in Stückgutspeditiionsanlagen

Strategische Layoutplanung:

Steht der Neubau einer Anlage bevor, fallen diverse Entscheidungen an, die das Layout der Umschlaganlage betreffen. Darunter fällt in einem ersten Schritt die Entscheidung über die Form der zu errichtenden Umschlaghalle sowie ihrer Größe in Quadratmetern. Mit ausschlaggebend hierfür ist u.a. die Anzahl an Toren, die aufgrund der prognostizierten Stückgutmen-gen sowie der Anzahl an zu bedienenden Fernverkehrs- oder Nahverkehrsrelationen aus dem übergeordneten Stückguttransportnetz grob abgeschätzt werden. Die geplante Halle wird anschließend auf dem ausgewählten Grundstück unter Beachtung der beschriebenen Flächen und Verkehrswege positioniert. Entscheidungen, die den späteren Betrieb betreffen, aufgrund ihres zeitlichen Horizontes aber nur alle paar Jahre anstehen, sind die Einteilung der Tore in Eingangs- und Ausgangstore sowie die Gestaltung der innerbetrieblichen Prozessflächen. Viele Anlagen in Deutschland arbeiten bereits jetzt an ihren Leistungs- und Kapazitätslimits. Daher ist eine Erweiterung einer Anlage aufgrund eines Geschäftszuwachses eine weitere Aufgabe der strategischen Layoutplanung.

Mittelfristige Betriebsplanung:

Sind die strategischen Entscheidungen fixiert, so wird eine mittelfristige Betriebsplanung vorgenommen. In einem ersten Schritt zählt hierzu die Frage nach den ausgangsseitigen Senken der innerbetrieblichen Transportprozesse (Tor-Relation-Zuordnung) im SA und im SE. In der

Praxis hängt über den entsprechenden Ausgangstoren eine Tafel mit zwei Nummern, welche auf die zugeordnete Fernverkehrsrelation sowie die Nahverkehrsrelation hinweisen. Die ausgangsseitige Zuordnung bleibt aus Gründen der Prozessstandardisierung über mehrere Monate hinweg gleich. Nach einer Veränderung in der Systemlast, z.B. einem Geschäftszuwachs auf einer der Relationen, ist eine Überarbeitung der Zuordnungen sinnvoll. Manche Anlagenbetreiber arbeiten aufgrund der saisonalen Schwankungen im Geschäft auch mit Sommer- und Winterpläne⁴⁴. Basierend auf den Zuordnungen wird die Feinplanung des innerbetriebliche Layouts, die Planung der Touren für Nah- und Fernverkehr und die Auswahl der Umschlagmitteltypen und -anzahlen vorgenommen.

Operative bzw. dispositive Betriebssteuerung:

Aufgabe der täglichen Betriebssteuerung ist die störungsfreie Erbringung der Umschlagleistung und somit die kosteneffiziente Steuerung der daran beteiligten Ressourcen und Prozesse. Nach Eintreffen der Fahrzeuge in der Anlage werden diese örtlich und zeitlich den Eingangstoren zur Entladung zugewiesen. Durch den Abgleich der Ankunftszeit eines Fahrzeugs und seinem Andockzeitpunkt an einem der Tore ergibt sich das Yard Management, d.h. die Steuerung der Fahrzeuge über das Gelände der Anlage (Warten vs. Andocken an Tor). Da es sich bei Stückgutpeditionsanlagen um Umschlaganlagen handelt, bei denen die Sendungen der ankommenden Fahrzeuge rechtzeitig die Touren ihrer Anschlussrelation erreichen müssen, zählt zur operativen Steuerung einer Stückgutanlage auch die zeitliche Entscheidung über die innerbetrieblichen Transport- und Umschlagprozesse. Im Rahmen der mittelfristigen Planung wurden bereits die Abfolge der Hauptprozesse sowie die dafür zur Verfügung stehenden Ressourcen definiert.

Torbelegungsplanung in Stückgutanlagen:

Die Aufgabe, optimale Torbelegungspläne in Stückgutpeditionsanlagen zu entwickeln, setzt prinzipiell am "äußeren" Rand des Teilsystems Umschlag, d.h. an den Toren der Halle an. Eine reine Betrachtung dieser Schnittstelle reicht allerdings nicht aus, um den zeitgerechten Umschlag der Sendungen zwischen den Fahrzeugen unter Beachtung aller Ressourcen zu garantieren. Die Torbelegungsplanung, wie sie in der vorliegenden Arbeit definiert wird, beeinflusst daher mehrere Teilbereiche der oben geschilderten Planungsaufgaben, die in folgender Abbildung zusammengefasst werden:



Abbildung 2.11: Teilbereiche der Torbelegungsplanung in Stückgutpeditionsanlagen

⁴⁴ Gespräch mit dem Niederlassungsleiter Hr. Zander der Dachser Niederlassung Rheine

Strategisch muss die Anzahl und Lage der Eingangs- und Ausgangstore bestimmt werden. Anschließend kann hierauf aufbauend die *mittelfristige* Zuordnung der Relationen getrennt für SA und SE zu den festgelegten Ausgangstoren vorgenommen werden. Auf der *operativen* Ebene wird das eingangsseitige Scheduling der zu entladenden Touren entschieden. Unter dem Scheduling wird hierbei sowohl die örtliche Zuordnung zu einem der vorab definierten Eingangstore als auch die Bestimmung der zeitlichen Belegdauer, d.h. dem Andock- und Abdockzeitpunkt, verstanden. Um darüber hinaus zu gewährleisten, dass alle Sendungen ihre Anschlussrelationen erreichen, wird bei der Torbelegungsplanung zusätzlich darauf geachtet, dass das eingangsseitige Scheduling der Touren und der aus dem übergeordneten Transportnetz abgeleitete Fahrplan der ausgangsseitigen Relationen aufeinander abgestimmt sind. Dies bedeutet, dass der innerbetriebliche Materialfluss der Sendungen durch die Umschlaghalle und die Nutzung der dafür benötigten Umschlagmittelressourcen und Flächen zeitlich und örtlich mit entschieden werden.

Ziel der definierten Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung ist die Erstellung eines Regelplans, der die Steuerung der Abläufe an einem typischen Verkehrstag optimiert und für eine mindestens mehrere Monate umfassende Periode Bestand hat.

Kapitel 3

Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik wird in diesem Kapitel zweigeteilt, die logistischen als auch die mathematischen Aspekte betreffend, dargestellt.

Einige Betreiber von Stückgutspeditionsanlagen setzen bereits Dispositionsleitstände zur Steigerung der Effizienz ihrer Anlage ein. In Kapitel 3.1 wird sich mit zwei aktuellen Lösungen für die speditionelle Praxis und ihren Funktionsweisen beschäftigt. Obwohl die Torbelegungsplanung in logistischen Anlagen bisher vergleichsweise wenig im Fokus der Wissenschaften stand, existieren dennoch einige Arbeiten aus den USA, Hong-Kong und Deutschland, die Teilaspekte der Torbelegungsplanung, wie sie im vorangegangenen Kapitel definiert wurde, behandeln. Die Lösungsansätze werden in Kapitel 3.2 vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Optimierungsaufgabe überprüft.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne in Stückgutanlagen sowie darauf aufbauend ein spezieller Column Generation Ansatz entworfen. Zusätzlich wird das Standardverfahren der diskreten Optimierung, das Branch-and-Bound Verfahren unter Verwendung von Schnittebenen, zur Lösung angewandt. Die Grundlagen der mathematischen Optimierung, die für die Modellbildung und das Verständnis der beiden Lösungsansätze erforderlich sind, werden daher in Kapitel 3.3 hergeleitet.

3.1 Dispositionsleitstände in der speditionellen Praxis

Kleine und mittelständische Stückgutunternehmen wie auch große Stückgutnetzbetreiber haben die Chancen, die in der koordinierten Steuerung der Abläufe auf dem Hof einer Anlage und der Ressourcen und Prozesse in der Umschlaghalle liegen, erkannt¹. Als Folge davon wurden

¹ Diskussion in der Sektion "Intelligente Dynamische Dispositionsleitstände für logistische Anlagen" im Rahmen des Forums Speditionelle Logistik 2005 an der Universität Dortmund

in einzelnen Anlagen bereits Leitstandssysteme implementiert und zu deren Bedienung entsprechendes Personal ausgebildet. Aktuelle Beispiele sind die Stückgutniederlassung der WM Group in Bocholt sowie das Zentral-Hub der Schenker AG in Friedewald².

Leitstandssystem der WM Group in Bocholt:

In der Stückgutniederlassung der WM Group wurde in der Mitte der Umschlaghalle auf zweiter Ebene ein Raum für den Leitstandsleiter bzw. Disponenten und einen weiteren Mitarbeiter zur Verfügung gestellt. Die Mitarbeiter des Leitstandes haben von hieraus die Möglichkeit, einen Teil der Halle einzusehen. Der Leitstand besteht aus einem Monitor, einem inneren und einem äußeren Kamerasystem sowie einer Sprechfunkanlage. Auf dem Monitor können verschiedene Systeme aufgerufen werden, um Informationen zum Zustand der Anlage oder zum Status der Sendungen und Touren anzuzeigen. Der Zustand der Anlage wird mittels einer Maske visualisiert, auf der das statische Layout der Halle mit allen Toren, ergänzt durch die aktuelle Belegung der Tore durch Fahrzeuge zu sehen ist. Die Belegung der Tore wird durch ein Sensorsystem automatisch erfasst. Daneben sind Kameras, die innerhalb der Umschlaghalle installiert sind, im Layout hinterlegt. Eine einzelne Kamera kann durch Klick auf das entsprechende Symbol ausgewählt werden, um das von ihr erfasste Bild (z.B. die Beladezone eines bestimmten Tors) einzublenden. Auf dem Hof der Anlage sind weitere Kameras installiert, deren aktuelle Aufnahmen alternativ über den Leitstand ausgewählt und auf dem Monitor angezeigt werden können. Die Einstellungen der äußeren Kameras (Blickwinkel, Zoomfunktion) lassen sich über eine Menüführung ändern. Weitere Informationen zur Anzeige am Monitor betreffen den Bearbeitungsstatus der avisierten Sendungen für den aktuellen Verkehrstag. So werden über Listen sämtliche Sendungen eingeblendet. Der Disponent kann diese anklicken, um genauere Informationen (Sendung bereits entladen oder beladen, Anzahl Collis einer Sendung, Typ der Dienstleistung) zu erhalten. Eine Funkverbindung besteht zum Pförtner der Anlage, zum Rangierer sowie zum Hallenmeister. Zusätzlich existiert ein Lautsprechersystem in der Umschlaghalle.

Kommt im Laufe des Tages ein Fahrzeug an, so übergibt der Fahrer die Papiere an den Pförtner. Dieser nimmt Kontakt zum Disponenten auf und teilt ihm per Funk Informationen zu dem Fahrzeug (z.B. Herkunft, Ladung) mit. Der Disponent verschafft sich anschließend über das Kamerasystem einen Überblick über die Anlage und die Belegung der Tore. Anschließend gibt er seine Entscheidung, an welches Tor der Pförtner den Fahrer schicken soll und ob dieser das Tor direkt anfahren oder aber auf einer Wartefläche warten soll, bekannt. Über die Funkverbindung zum Hallenmeister kann der Disponent Rücksprache halten oder zusätzliche Informationen zum Zustand der Ressourcen innerhalb der Halle abfragen. Des Weiteren dient eine Funkverbindung zum Rangierer dazu, diesem Anweisungen zum Freimachen eines Tores oder aber zum Bereitstellen neuer Wechselbrücken zu geben.

Leitstandssystem des Zentral-Hubs der Schenker AG:

Im Zentral-Hub der Schenker AG übernimmt der Pförtner die Aufgaben des Disponenten. Dieser ist in einem separaten Gebäude direkt an der Zufahrt zu dem Gelände platziert. Technische Systeme, die den Pförtner bei seiner Aufgabe unterstützen, sind ein Monitor zur Darstellung des Layouts der Halle sowie ein Softwaresystem zum Nachhalten von getroffenen Entscheidungen.

² vgl. Vogler ([86]), 2004

Im Gegensatz zur Lösung der WM Group, zeigt der Monitor dem Disponenten lediglich das statische Layout der Umschlaghalle. Welche Tore derzeit belegt oder frei verfügbar sind, wird nicht automatisch erfasst, sondern muss durch den Disponenten über die integrierte Software nachgehalten werden. Die Software ergänzt das Layout der Halle um Textfelder zur Eingabe von Informationen zu den Fahrzeugen und Transportgefäßen (z.B. WB). Eine Datenbank zu den bereits erfassten Fahrzeugen und Wechselbrücken ist angeschlossen.

Zu Beginn seiner Schicht umgeht der Disponent einmalig die Umschlaghalle, um die bereits an Toren stehenden Fahrzeuge und Wechselbrücken zu erfassen. Die Nummer eines erfassten Objekts trägt er in das dem Tor eindeutig zugeordnete Textfeld in der Leitstandssoftware ein. Kommt im Laufe des Abends ein Fahrzeug in dem Hub an, so gibt der Fahrer die Papiere am Pförtnerhaus ab. Der Disponent entscheidet aufgrund der Situation auf dem Gelände der Anlage und der übergebenen Informationen zu dem Fahrzeug und der Ladung, an welches Tor der Fahrer das Fahrzeug stellen soll. Einen Überblick über die aktuelle Situation auf dem Gelände verschafft er sich dabei mittels der in der Software nachgehaltenen Informationen zu den Torbelegungen. Darüber hinaus kann der Disponent über eine Funkverbindung mit dem Rangierer und dem Hallenmeister sprechen, um so seine Informationslage zu verbessern. Die jeweils getroffene Entscheidung hält er erneut nach, indem er die Nummer des Fahrzeugs bzw. der WB über die Tastatur in das betreffende Textfeld einträgt.

Analyse der bestehenden Leitstandssysteme:

Beide Ansätze zielen darauf ab, dem Disponenten zum einen Informationen zukommen zu lassen, die er für seine Entscheidung benötigt, und zum anderen ihn visuell bei der Arbeit zu unterstützen. Obwohl die beiden Lösungen in der Praxis als sehr fortschrittlich angesehen werden³, haben sie entscheidende Nachteile:

- **Fehlen einer zentralen Datenbank:**

Es existiert keine zentrale Datenbasis, die automatisch alle für die Torbelegungsplanung relevanten Informationen (z.B. Touren mit Fahrplänen und Lademengen, Situation auf dem Gelände der Anlage, Auslastung der Ressourcen) aktuell bereit hält.

- **Fehlen einer softwaregestützten Planungsmethodik:**

Alle Entscheidungen zur Fahrzeug-Tor-Zuordnungen trifft der menschliche Experte, d.h. der Disponent, aufgrund der von ihm erfassten Informationen und seiner Erfahrung.

Das Fehlen einer umfassenden Datenbasis hat zur Folge, dass der Disponent über verschiedene Medien, z.B. Kamerasysteme und / oder Funksysteme, die von ihm benötigten Informationen zur Situation auf dem Hof und in der Umschlaghalle einfordern muss. Vor allem in den Spitzenzeiten des Betriebs der Anlage kann es hier zu Überlastungen und somit zu Informationsdefiziten kommen. Das Fehlen einer standardisierten Planungsmethodik zieht nach sich, dass aktuelle Leitstandslösungen lediglich in der Lage sind, den Status-Quo der Anlage zu visualisieren. Der Disponent erzeugt aufgrund seiner Erfahrung zwar gute Lösungen und hält diese in den Masken des Leitstandes nach. Es stellt sich allerdings die Frage, ob in Anbetracht der

³ vgl. Vogler ([86]), 2004

hoch komplexen Natur der Planungsaufgabe und der Vielfalt der dafür benötigten und gleichzeitig zu verarbeitenden Informationen nicht eine Unterstützung des Disponenten durch eine Planungsintelligenz sinnvoll ist.

Neuerungen in der Leitstandstechnologie:

Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der bestehenden Systeme wurden bereits von den Anbietern von Leitstandssystemen und integrierter Software identifiziert. Ein erster Schritt in diese Richtung ist der in Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern des Lehrstuhls Verkehrssysteme und -logistik und des führenden Tor- und Überladebrückenherstellers hafa Docking systems entwickelte Prototyp eines Dispositionsleitstandes LoadDOCK Navigation⁴. Die Bedienung des Dispositionsleitstandes erfolgt über zwei Monitore (Hauptmonitor, siehe Abbildung 3.1). Auf der linken Seite des Hauptmonitors wird über eine Kalenderfunktion der zu planende Verkehrstag ausgewählt.

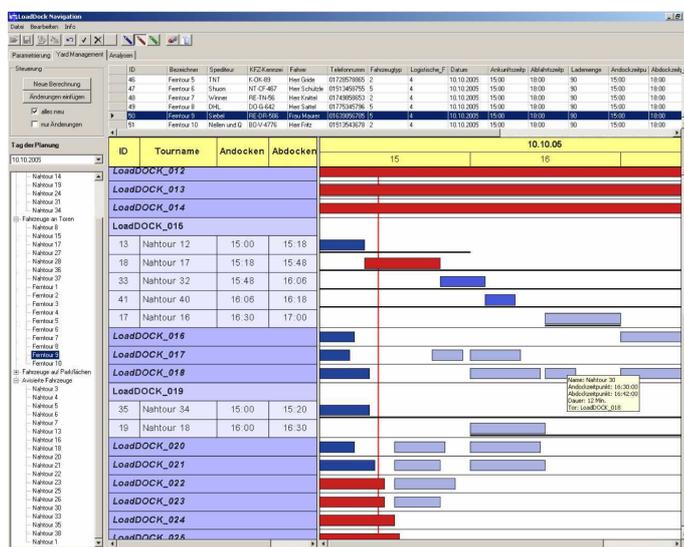


Abbildung 3.1: LoadDOCK Navigation: Darstellung von Torbelegungsplänen als Gantt-Chart

Die an dem gewählten Tag relevanten Tourdaten werden aus einer zentralen Datenbank eingelesen, welche u.a. über automatische Schnittstellen zur Speditionssoftware oder zur Tourenplanungskomponente verfügt. Sämtliche Informationen zu den avisierten Touren, wie etwa die Lademenge, der Fahrplan, die beauftragte Spedition etc. werden in einem Datenfeld im oberen Bereich des Monitors angezeigt. Anschließend wird eine regelbasierte Schedulingheuristik (siehe Kapitel 3.2) angestoßen und eine optimierte Zuordnung von Fahrzeugen zu Toren für den kompletten Verkehrstag berechnet. Das Ergebnis wird in einem Gantt-Chart visualisiert. Der Disponent kann das Ergebnis nachbearbeiten, indem er per Drag-and-Drop einzelne Touren im Gantt-Chart entweder auf dem aktuellen Tor nur zeitlich oder aber auch zusätzlich noch zwischen den Toren verschiebt. Hierdurch wird die Planungsintelligenz in Form von wissenschaftlichen Methoden und das Expertenwissen des Disponenten miteinander verbunden. Auf einem weiteren Monitor wird der aktuelle Zustand der Anlage dargestellt. Das Unternehmen

⁴ vgl. Chmielewski und Clausen ([17]), 2005

hafa Docking Systems hat eine neue Sensortechnik für die Tore und Überladerampen in logistischen Anlagen entwickelt. Diese schreibt zu jedem Zeitpunkt Informationen zu dem Zustand eines Tors (Fahrzeug steht vor dem Tor oder Tor ist frei; Ent- bzw. Beladeprozess hat begonnen oder Rampe ist in Ruheposition) in die zentrale Datenbank. Die Informationen werden von hier ausgelesen und in dem Layout visualisiert. Hierdurch können bisherige Funk- und Kameralösungen ersetzt werden. Zudem nimmt die Software einen automatischen Abgleich der aktuellen Situation mit den berechneten Zuordnungen vor und zeigt Probleme an. Ist laut Sensortechnik z.B. an Tor Nr. 2 derzeit kein Fahrzeug angedockt, was aber nach dem Gantt-Chart der Fall sein sollte, so erscheint ein Fehlerhinweis inklusive einer Einfärbung aller durch die Abweichung betroffenen Touren. Erhält der Disponent einen Hinweis (z.B. per Anruf), dass sich eines der Fahrzeuge verspätet, so kann er dies in das Datenfeld eingeben und eine Neuplanung der entsprechenden Tour anstoßen oder aber getroffene Entscheidungen direkt eingeben. Die Daten und Entscheidungen eines jeden Verkehrstages werden in die Datenbank zurückgeschrieben und können im Nachhinein für unterschiedliche Zeiträume ausgewertet werden. Daneben besteht die Möglichkeit, über eine Parametrierungsseite bestimmte Einstellungen bezüglich der Arbeitsweise der Heuristik vorzunehmen.

Der Prototyp des Dispositionsleitstandes wurde erstmalig auf dem Deutschen Logistik-Kongress der Bundesvereinigung Logistik 2005 in Berlin vorgestellt. Erfahrungen über mögliche Einsparungen durch Betriebskostenminimierung oder Wartezeitenminimierung konnten in einer realen Stückgutspedition noch nicht gesammelt werden.

Die Steuerung der Fahrzeugbewegungen auf dem Gelände eines Unternehmens ist auch in anderen logistischen Bereichen zu einem attraktiven Untersuchungsgebiet geworden. Somit existieren inzwischen europaweit verschiedenste Leitstandslösungen mit unterschiedlichen Funktionalitäten⁵. Ein erfolgreiches Beispiel ist das System LKW-Control der Firma Inform, das speziell für den Standort Kassel der Volkswagen AG entwickelt wurde und nach einer erfolgreichen Testanwendung auf die anderen Standorte ausgerollt werden soll⁶.

3.2 Optimierungsansätze in Umschlaganlagen

Im Vergleich zu der Fülle an Arbeiten zu anderen logistischen Planungsgebieten, wie etwa der Tourenplanung oder der Standortplanung, lässt sich für die Optimierung von Umschlag- und Logistikanlagen feststellen, dass diese von der Wissenschaft bisher wenig berücksichtigt wurden⁷. Dies gilt sowohl für die eher strategische und mittelfristige Sichtweise als auch für die operative bzw. dispositive Komponente.

Nach Kenntnisstand der Autorin existieren lediglich zwei Arbeiten, die sich mit **strategischen Fragestellungen**, das physische Layout einer Umschlaganlage betreffend, befassen:

Gue und Bartholdi erörtern in ihrem Beitrag ([37]) den Zusammenhang zwischen den Betriebskosten und dem Layout einer Umschlaghalle. Die Autoren untersuchen dabei gängige Layoutvarianten, wie etwa das I-Shape, L-Shape und T-Shape sowie einige seltenere Varianten, wie das

⁵ vgl. Chmielewski, Clausen, Schlüter, Stein ([19]), 2006

⁶ vgl. Schneider ([69]), Materialflusskongress in München, 2006

⁷ vgl. Gue und Bartholdi ([38]), 2000, S. 2

H-Shape und X-Shape. Als Bewertungsindex wird die in Summe beim Umschlag der Sendungen zwischen den ankommenden und den abgehenden Fahrzeugen entstehende Transportentfernung herangezogen. Die untersuchten Layoutvarianten werden hinsichtlich dreier Eigenschaften variiert: a) Größe der Halle (gemessen in Anzahl an Toren gesamt und Anzahl an Eingangstoren), b) Torbelegung (Zuordnung der abgehenden Relationen und der ankommenden Touren zu Toren entsprechend einer einfachen lokalen Suche⁸) und c) Sendungsmix (uniforme Verteilung der Sendungen eines ankommenden Fahrzeugs auf alle abgehenden Relationen versus Annahme einer ungleichmäßigen Verteilung). Dadurch entstehen verschiedene Szenarien, die anschließend über den Bewertungsindex miteinander verglichen werden. Fazit der Arbeit ist, dass das I-Shape für Hallen bis zu einer Größe von 150 Toren und das X-Shape ab einer Größe von 200 Toren am effizientesten sind. Geht es um die potentielle Erweiterung einer Anlage durch das Anfügen weiterer Tore in der Horizontalen, so ist das I-Shape hingegen allen anderen Shapes unterlegen. Dies liegt darin begründet, dass hierbei die durchschnittliche Entfernung eines am Ende der Halle neu eingefügten Tors zu allen anderen Toren stark ansteigt, was bei den anderen Shapes nicht in gleichem Maße der Fall ist. Im Gegenzug sind bei den restlichen Shapes die Anzahl der "Innenecken" und der "Außenecken" wesentlich höher als bei dem I-Shape. Erstere führen zu Überlappungen der Rangierflächen auf dem Hof, letztere zu Überlappungen der Bereitstellflächen in der Halle und somit insgesamt zu nur eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten.

Gudehus beschäftigt sich in seinen Arbeiten ([35], [36]) mit optimalen Auslegungsstrategien für Logistikhallen. Hierunter fallen z.B. Strategien zur Anordnung der Tore in einer Anlage und ihrer vorgelagerten Torbereiche aber auch Strategien zur Anordnung der Funktionsbereiche und -flächen zur Durchführung bestimmter Prozesse, wie etwa dem Kommissionieren, Zwischenlagern oder Puffern von Einheiten. Speziell für eine rechteckige Halle leitet Gudehus neben den Regeln für eine optimale Anordnung der Layoutobjekte zusätzlich Regeln für das noch zu bestimmende Seitenverhältnis (Länge / Breite) der Halle ab. Dabei geht er von verschiedenen Szenarien aus. Beispielsweise kann nur eine Seite oder aber mehrere der Seiten der Halle für die Anordnung der Tore zur Verfügung stehen. Hauptziel ist die Minimierung der Kosten, zu denen Gudehus neben den Handlings- und Betriebskosten auch die Kosten für den Flächenbedarf und somit für die Infrastruktur zählt. Die entstehenden Handlings- und Betriebskosten werden mittels der Indizes Transportleistung und mittlerer Transportweg bewertet. Zusätzlich zu der analytischen Untersuchung gibt Gudehus ein 14 Schritte umfassendes qualitatives Vorgehen zur Auslegung von Logistikanlagen an.

Für die **strategischen und mittelfristigen Planungsaufgaben** die Tore in Eingang und Ausgang einzuteilen sowie die Zuordnungen von Relationen zu Toren vorzunehmen, existieren in der Wissenschaft drei Ansätze:

Gue und Bartholdi ([38]) stellen einen Zusammenhang zwischen dem "Layout einer Stückgutanlage" und den täglich anfallenden Betriebskosten in der Anlage her. In dieser Arbeit verstehen sie allerdings unter dem Layout der Anlage die Lage von Eingangs- und Ausgangstoren in einer bestehenden Halle sowie die Zuordnung der Relationen zu den Ausgangstoren. Die Betriebskosten ergeben sich aus der Vergütung des eingesetzten Umschlagpersonals. Bei der Ermittlung der insgesamt zurückgelegten Wege bzw. Entfernungen findet der Typ des jeweils eingesetzten

⁸ vgl. Gue und Bartholdi ([38]), 1999

Umschlagmittels Berücksichtigung. Über ein dreistufiges Warteschlangenmodell wird die Dauer des Transportes zwischen zwei Toren realitätsnah ermittelt. Die Dauer ist dabei nicht nur linear abhängig von der Geschwindigkeit der Umschlagmittel und der jeweils zu fahrenden Entfernung, sondern es werden hierin auch bestimmte zeitliche Verzögerungen aufgrund von Behinderungen und Staus der Umschlagmittel innerhalb der Anlage eingearbeitet. Die eigentliche Zuordnung der Relationen zu den Toren erfolgt über ein lokales Suchverfahren. Zur Initialisierung des Verfahrens werden die Relationen entsprechend ihrer Sendungsmengen absteigend und die Tore entsprechend ihrer durchschnittlichen Entfernung zu allen anderen Toren aufsteigend sortiert. Anschließend erfolgt eine Zuordnung, beginnend mit der sendungsmengenstärksten Relation auf dem Tor mit der geringsten durchschnittlichen Entfernung. Eine Bewertung der resultierenden Kosten nach Beendigung der Zuordnung aller Relationen geschieht unter Zuhilfenahme des entwickelten dreistufigen Warteschlangenmodells. Eine zulässige Zuordnung wird sukzessive verbessert, indem nach dem bekannten 2-opt-Verfahren⁹ paarweise Tor-Relation-Zuordnungen getauscht werden. Die Arbeit schließt mit Richtlinien für vorteilhafte Layouts in Stückgutanlagen. So sollte etwa direkt gegenüber stark frequentierten Ausgangstoren eine Zone von Eingangstoren liegen. Die Modellierung der Staus aufgrund sich gegenseitig behindernder Umschlagmittelressourcen mittels Warteschlangentheorie ist neuartig und aus Sicht der Praxis ein lohnender Ansatz. Allerdings wird im Modell je Tor nur maximal eine Tour zugelassen, was für Stückgutanlagen als praxisfern zu bezeichnen ist.

Tsui und Chang entwickeln in ihrer Arbeit ([82]) ein mathematisches Modell sowie ein Lösungsverfahren zur optimalen Zuordnung von Touren zu Eingangs- und Ausgangstoren in Stückgutanlagen. Das mathematische Modell entspricht dem klassischen quadratischen Zuordnungsproblem¹⁰. Es existieren zwei Nebenbedingungstypen. Der erste garantiert, dass jedem Eingangstor nur eine Tour und jede ankommende Tour genau einem Eingangstor zugewiesen wird. Der zweite überprüft den gleichen Sachverhalt für die Ausgangstore und die abgehenden Touren. Anstatt dieses Gesamtmodell direkt durch diskrete Verfahren zu lösen, zerlegen sie das Problem in zwei Subprobleme, indem jeweils einer der beiden Nebenbedingungstypen weggelassen wird. So entsteht ein vereinfachtes Problem, welches als untere Schranke für das Gesamtmodell agiert. Anschließend wird ein iteratives Verfahren entwickelt, das unter Ausnutzung der definierten unteren Schranken und dem Branch-and-Bound Prinzip, Torbelegungspläne entwickelt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit dem skizzierten Lösungsansatz nur sehr kleine Testinstanzen gelöst werden konnten und im entwickelten Modell grundlegende logistische Sachverhalte vernachlässigt wurden. Dennoch ist diese Arbeit eine der wenigen, in der mittels diskreter exakter Verfahren versucht wird, bestimmte Teilaspekte des Torbelegungsproblems zu lösen.

Bermúdez und Cole setzen sich in ihrer Arbeit ([11]) das Ziel, das von ihnen definierte Dock-Door-Assignment Problem zu lösen. Hierunter verstehen sie sowohl die Entscheidung darüber, welches der Tore die Funktion des Eingangs oder des Ausgangs erhält als auch die anschließende Zuordnung der Fahrzeuge zu den Toren. Das mathematische Modell, welches sie hierfür zunächst aufbauen, entspricht erneut dem bereits geschilderten klassischen quadratischen Zuordnungsproblem. Bermúdez und Cole entscheiden sich aufgrund der bekannten Schwere dieses

⁹ vgl. Hoos, Stützle ([43]), 2004, S. 372

¹⁰ vgl. Koopmans und Beckmann ([51]), 1957, S. 64-66

Problems¹¹ für einen genetischen Lösungsansatz. Hierbei werden Individuen mittels der folgenden Darstellung repräsentiert:

Individuum 1	13	6	2	4	11	15	9	7	16	8	5	10	1	14	3	12
Individuum 2	3	4	10	14	16	8	2	6	11	13	7	12	1	15	5	9

Abbildung 3.2: Codierung der Individuen

Die Spalten entsprechen den Toren in der Anlage (hier: 16 Stück). Jede Zeile repräsentiert ein eigenständiges Individuum. Der Wert in Zeile i und Spalte j verweist auf das Fahrzeug, das dem jeweiligen Tor j zugewiesen wird (hier: z.B. $(i, j) = (1, 2)$ bedeutet: Fahrzeug 6 an Tor 2). Die Fitness eines solchen Individuum lässt sich als Summe der gewichteten Wege durch Multiplikation der Entfernungen zwischen den Toren und den zwischen ihnen ausgetauschten Sendungen ermitteln. Ein Crossover¹² wird durchgeführt, indem zunächst ein mehrere Spalten umfassendes Swapfenster definiert wird (hier: z.B. Spalte 6 bis 15). Innerhalb dieses Fensters werden sämtliche Fahrzeuge identifiziert, die in beiden der zu kreuzenden Individuen auftreten (hier: z.B. (15, 7, 8, 5, 1) und (8, 7, 1, 15, 5)). Anschließend werden die Sequenzen ausgetauscht, unter Beibehaltung sämtlicher anderen Zuordnungen. Es werden verschiedene Parametereinstellungen für den genetischen Algorithmus untersucht (z.B. Populationsgröße, Selektionsmechanismus¹³) und anhand von Tests Empfehlungen für "gute" Einstellungen zur Lösung des hier untersuchten Dock-Door-Assignment Problems gegeben. In der Arbeit werden erstmalig Methoden der Computational Intelligence zur Lösung des Problems eingesetzt. Erneut sind allerdings nur wenige logistische Sachverhalte im Modell integriert. Getroffene Annahmen, wie z.B., dass pro Tor nur ein Fahrzeug erlaubt ist und das Vernachlässigen des Zeitaspekts, schränken die Lösungen zu stark ein.

In insgesamt sieben wissenschaftlichen Arbeiten werden Lösungen zur **operativen Steuerung** der Prozesse, Ressourcen und Fahrzeuge in Umschlaganlagen im Rahmen eines Verkehrstages entwickelt:

Stickel und Metzelaers beschäftigen sich in ihrem Beitrag ([74]) mit Crossdockingterminals. Ziel ist eine mathematische Modellierung der kompletten Transportkette vom Lieferanten bis hin zur Handelsfiliale. Somit soll das mathematische Modell sowohl die Routenplanung für die Warenanlieferung an das Terminal, die Torbelegungsplanung im Terminal, als auch die Routenplanung für die Distribution entscheiden. In der Arbeit wird hierfür ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem entworfen. Die Kostenfunktion behandelt neben Fixkosten für den Einsatz der Transportfahrzeuge, entstehenden Tourenkosten und Handlingskosten zum Umschlag der Sendungen im Crossdockingterminal auch Strafkosten aufgrund nicht pünktlicher Belieferungen oder Abholungen. Die für die dispositive Ebene wichtige Komponente Zeit wird in die Entscheidungssituation mittels Zeitscheiben integriert. Das resultierende Modell ist bereits aufgrund der vor- und nachgelagerten Tourenplanungsprobleme mit Zeitfenstern als übermäßig schwer zu klassifizieren. Das Gesamtmodell verfügt über eine mathematische Komplexität, die es kaum

¹¹ vgl. Sahni, Gonzalez ([66]), 1972

¹² zur Definition *Crossover* vgl. Dréo et. al. ([31]), 2006, S. 95

¹³ zur Definition *Population*, *Selektion* vgl. Dréo et. al. ([31]), 2006, S. 77

erlaubt, reale Testinstanzen mittels diskreter exakter Verfahren zu optimieren. Dies wird von Stickel und Furmans in [75] dargestellt. In dieser Arbeit wird beispielsweise für eine Testinstanz mit 5 Lieferanten und 5 Handelsfilialen der in CPLEX 8.0 implementierte Branch-and-Cut Algorithmus (siehe Kapitel 3.3) angewandt. Lösungen konnten nach extrem langen Laufzeiten von 8 Tagen ermittelt werden.

Ein Beitrag zur dispositiven Optimierung des Ressourceneinsatzes in Crossdockingterminals wird von Li ([54]) angegeben. Das behandelte Problem ist allerdings rein innerbetrieblich orientiert. Die Optimierung der Schnittstelle bleibt somit unberücksichtigt. Ziel ist es, die in der Import- und in der Exportregion eines Crossdockingterminals arbeitenden Teams, welche für die Dekonsolidierung und Konsolidierung der ankommenden und abgehenden Container verantwortlich sind, derart den bereitstehenden und zu bearbeitenden Containern zuzuordnen, dass die Container rechtzeitig das Terminal verlassen können. Das Problem wird als paralleles Maschinenbelegungsproblem modelliert. Die Autoren wählen aufgrund der Schwere des resultierenden mathematischen Modells als Lösungsansatz einen genetischen Algorithmus. Dieser arbeitet ähnlich wie die weiter unten vorgestellte regelbasierte Schedulingheuristik ([17]). Die wartenden Container werden entsprechend ihrer Dringlichkeit (Priorität der Bearbeitung) in eine Reihenfolge oder Permutation gebracht, durch die für die folgenden Schritte der Genotyp¹⁴ definiert ist. Als Crossoveroperator wird die gängige Zwei-Punkt-Methode¹⁵ angewandt, bei der zwei Permutationen an zwei gleichen Stellen zerlegt und neu zusammengesetzt werden. Für die Selektion wählt der Autor eine Strategie, bei der sowohl aus der Elternpopulation (μ) als auch aus der Kinderpopulation (λ) Individuen gemeinsam die neue Population bilden ($(\mu + \lambda)$ -Strategie, hier mit kleinem λ). Die Bildung des Phänotypen¹⁶, d.h. die Einplanung der Jobs (= Container) auf den Maschinen (= Teams), wird mittels einer einfachen Heuristik geleistet, die sukzessive die freien Teams durchläuft und über Strafkosten ungünstige Einplanungen unterdrückt.

Die folgenden fünf Arbeiten beschäftigen sich ausschließlich mit der Entwicklung optimaler Torbelegungspläne in Umschlaganlagen und hier speziell mit der dispositiven Ausprägung, d.h. dem Scheduling der Touren an den Toren.

Gue liefert einen szenariobasierten Ansatz ([40]), bei dem er die beiden Dispositionsvarianten "Zuweisung wartender Fahrzeuge an Tore nach dem First-come-first-serve Prinzip" und "Zuweisung unter Beachtung der geladenen Sendungen" untersucht. Ein parametrierbares lineares Modell dient dazu, die Materialströme zwischen den ankommenden und den abgehenden Fahrzeugen, im Folgenden Teil der vorliegenden Arbeit auch als Sendungsmix definiert, zu simulieren. Im neutralen Fall ist der Sendungsmix absolut gleich verteilt. Dies kommt der Situation nahe, dass der Disponent keine Informationen über die Ladung eines ankommenden Fahrzeugs und somit keinen Einfluss auf die resultierenden innerbetrieblichen Wege hat. Dagegen steht der Extremfall, dass einzelne Fahrzeuge hohe Anteile an Sendungen für eine bestimmte abgehende Relation haben. Das Wissen hierüber führt dazu, dass der Disponent diese Fahrzeuge zur Entladung in die Nähe derjenigen Tore stellen wird, wo die jeweils sendungsmengenstärksten Fernrelationen abgefertigt werden. Nach Simulation des Sendungsmixes wird bei einer bestehenden Einteilung der Tore der Anlage in Eingangs- und Ausgangstore eine Zuweisung der

¹⁴ zur Definition *Genotyp* vgl. Futuyama ([34]), 1990, S. 50

¹⁵ vgl. Dréo et. al. ([31]), 2006, S. 98

¹⁶ zur Definition *Phänotyp* vgl. Futuyama ([34]), 1990, S. 50

wartenden Fahrzeuge vorgenommen. Hier spielt wiederum die Länge der Schlange der wartenden Fahrzeuge eine erhebliche Rolle. Ist diese auf Eins dimensioniert, kommt als einzig mögliche Strategie "First-come-first-serve" in Frage. Stehen aber beispielsweise mehr als zwanzig Fahrzeuge in der Schlange und ist eines der Entladetore frei, so sucht der Disponent aus den wartenden Fahrzeugen dasjenige heraus, welches bei Belegung des freien Tors zu dem kleinsten Anstieg in den innerbetrieblichen Umschlagkosten führt. Im Anschluss an eine komplette Zuweisung wird die bestehende Anordnung der Eingangs- und Ausgangstore durch das lokale Suchverfahren aus ([38]) sukzessive verbessert. Eine Bewertung der beiden Dispositionsvarianten in den unterschiedlichen Szenarien erfolgt über die Summe der resultierenden innerbetrieblichen Transportwege. Hauptergebnis ihrer Untersuchungen und Szenarienberechnungen ist, dass die Verwendung der zweiten Strategie gegenüber der ersten die innerbetrieblichen Betriebskosten je nach Anlage um bis zu 20% senken kann. Die Arbeit wurde anhand von realen Daten einer Stückgutspedition validiert und dient somit als positives Argument für das Erfordernis einer Scheduling- und Zuordnungsstrategie für die ankommenden und abgehenden Fahrzeuge in Umschlaganlagen. Voraussetzung hierfür ist allerdings das Vorhandensein von Informationen zu den Fahrzeugen und den geladenen Sendungen sowie eines Tools mit Planungsintelligenz, das den Disponenten unterstützt. Es gelten im Modell die gleichen starken Einschränkungen bezüglich des Abbildes der logistischen Realität wie in der bereits beschriebenen Arbeit [38].

Dilling und Reinholz ([27]) entwickeln im Rahmen des SFB 559 "Modellierung großer Netze in der Logistik" an der Universität Dortmund ein Bewertungsmodell zur Optimierung der Rampebelegung und zur Nutzung der Logistikflächen in Stückgutspeditionsanlagen. Das entwickelte Modell besteht aus drei Submodellen: einem Zuordnungsmodell Relationen-Rampen, einem Zuordnungsmodell Logistikflächen-Relationen und einem Modell, welches die beiden Zuordnungen parallel verbessert. Die Bewertung verschiedener Lösungen erfolgt über die so genannte Transportintensitätsmatrix. Diese ergibt sich aus der Multiplikation der Entfernungsmatrix zwischen den in der Anlage existenten Orten (Rampen, Flächen) mit der zu entwickelnden Transportaufkommensmatrix (Zuordnung von Relationen und ihren Mengen zu einzelnen Kanten in der Entfernungsmatrix). Da die Entfernungsmatrix feststeht, kann nur über den Tausch von Relationen in der Transportaufkommensmatrix das Gesamtergebnis minimiert werden. Das hierfür entwickelte Modell gehört erneut zu der Klasse der klassischen quadratischen Optimierungsmodelle. Aufgrund der Schwere des Problems wird von einer diskreten Herangehensweise abgesehen. Stattdessen wird die entwickelte Transportintensitätsmatrix als "Black Box" zur Bewertung unterschiedlicher zulässiger Lösungen verwendet. Die Lösungen können z.B. mittels iterativer / lokaler Suchverfahren oder auch evolutionärer Algorithmen erzeugt werden und anschließend über definierte Schnittstellen an die Black Box zur Bewertung übergeben werden. Ein Visualisierungstool stellt die Stärke der Beanspruchung der einzelnen Rampen und die Transportintensität auf den jeweiligen Verbindungskanten dar.

Stickel beschäftigt sich in ([76]) mit der Bestimmung von Torbelegungsplänen für Crossdockingterminals mittels kombinatorischer Auktionen. Ausgang der Arbeit bildet eine theoretische Untersuchung zum Einfluss der Zeitfenster auf die Effizienz der Tourenbildung eines Logistikdienstleisters anhand der aus der Literatur bekannten Solomon Testinstanzen¹⁷. Es stellt sich heraus,

¹⁷ vgl. Solomon ([73]), 1985, S. 258-259

dass ein starker Zusammenhang zwischen dem Freiheitsgrad mit dem ein Dienstleister die Zeitfenster für die Anlieferung in den unterschiedlichen Crossdockingterminals gestalten kann und den in seiner Tourenbildung resultierenden Kosten vorliegt. Basierend auf dieser Analyse besteht Optimierungspotenzial, wenn die an ein Terminal an einem Verkehrstag liefernden Dienstleister mittels einer kombinatorischen Vickrey Auktion¹⁸ um die Zeitfenster für die Entladung an den Toren der Anlagen bieten können. Ziel für die Dienstleister ist, möglichst diejenigen Zeitfenster zu erhalten, die sich entsprechend ihrer Tourenplanung als günstig erweisen. Es wird ein mathematisches Modell aufgebaut, um den Gewinner der konkurrierenden Bieter zu bestimmen. Das Modell gehört zu der Klasse der ganzzahligen Winner Determination Problem¹⁹ und wird mittels Eingabe in CPLEX gelöst. Die Idee, Auktionen für die Torbelegungsplanung einzusetzen setzt voraus, dass der Betreiber der Anlage keinerlei Präferenzen bezüglich der innerbetrieblichen Materialflüsse und dem Andockverhalten der Fahrzeuge an den Toren seiner Anlage hat. Die Schnittstelle Torbelegung wird derart optimiert, dass nur die Dienstleister eine Nutzenmaximierung erfahren. Innerhalb des aufgestellten Modells sind keinerlei innerbetrieblichen Ressourcen abgebildet. Zudem wird der erforderliche abgestimmte Umschlag zwischen zwei Fahrzeugen nicht integriert.

Ein evolutionärer Ansatz für die dispositive Torbelegungsplanung wird von Bartz-Beielstein et al. in ([10]) geliefert, welche in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des Lehrstuhls Verkehrssysteme und -logistik im Rahmen des Forschungsprojekts S 693 entstanden ist. Neben der Minimierung der innerbetrieblichen Wegstrecken ist aufgrund der Integration des Zeitaspekts auch die Minimierung der Wartezeiten der Fahrzeuge ein Ziel. Zur Lösung dieser multikriteriellen Zielsetzung wird ein evolutionärer Algorithmus mit einer (1+1)-Evolutionstrategie²⁰ angewandt. Ein Individuum der Population wird hier, anders als bei Bermúdez und Cole, in Form von Vektoren $I_i = [G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{im}]$ kodiert, die aus sortierten Listen $G_{ij} = [T_{ij1}, \dots, T_{ijk}]$ bestehen. Die Länge m der Vektoren entspricht der Anzahl an Toren im System. Ein Eintrag T_{ijl} stellt eine Tour an einer zeitlichen Position an diesem Tor dar. Die Fitness eines Individuums wird mittels zweier Funktionen bewertet: Summe der resultierenden innerbetrieblichen gewichteten Wegstrecken und Summe der entstehenden Wartezeiten. Ein Individuum kann aufgrund der beiden Zielkriterien innerhalb eines Paretdiagramms dargestellt werden, auf dessen x-Achse das erste und auf dessen y-Achse das zweite Kriterium abgebildet sind. Ziel ist, Individuen zu finden, welche auf der so genannten Paretofront²¹ liegen. Für sie gilt, dass es keine anderen Individuen gibt, die diese bezogen auf beide Zielkriterien dominieren, d.h. bessere Zielfunktionswerte ermöglichen. Eine Mutation²² der Individuen erfolgt über die zufällige Auswahl einer zeitlich fixierten Tour T_{ijk} , die aus dem bestehenden Plan gelöst und entweder zufällig zu einem Tor oder aber immer zu dem Tor mit dem frühest möglichen Zeitfenster zugewiesen wird. Bei diesem Lösungsansatz handelt es sich um eine reine Optimierung der Schnittstelle. Der innerbetriebliche Fluss der Ladeeinheiten und die Nutzung der Flächen und Ressourcen werden nicht betrachtet.

¹⁸ vgl. Vries und Vohra ([85]), 2003

¹⁹ vgl. Sandholm ([67]), 2002, S. 5-7

²⁰ vgl. Schwefel ([70]), 1995, S. 105-107

²¹ zur Definition *Paretofront* vgl. Schwefel ([70]), 1995

²² zur Definition *Mutation* vgl. Futuyama ([34]), 1990, S. 74

Eine regelbasierte Schedulingheuristik zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne in Umschlaganlagen wird von Wissenschaftlern des Lehrstuhls Verkehrssysteme und -logistik mit dem Unternehmen hafa Docking systems in ([17]) entwickelt (siehe auch Kapitel 3.1). Hierbei wird sich zunutze gemacht, dass das Ergebnis einer Torbelegungsplanung als Gantt-Chart dargestellt werden kann. Anhand dieses Charts lässt sich sowohl die Zulässigkeit einer Torbelegung überprüfen als auch die Güte von verschiedenen Lösungen ablesen. Zu Beginn des Verfahrens ist das Gantt-Chart leer. In einem ersten Schritt werden alle abgehenden Relationen den hierfür erlaubten Ausgangstoren zugeordnet. Diese Zuordnung kann rein zufällig sein, oder aber entsprechend der Initialisierungsphase aus ([38]) erfolgen. Des Weiteren besteht die Option, die Fixierung der Senken für die nachfolgenden Schritte als unveränderlich zu setzen oder aber sie später iterativ nach dem 2-opt-Prinzip zu verändern. Ankommende Touren werden zunächst bezüglich ihrer Schwere in einem Stapel sortiert. Kriterien, die dazu beitragen, dass eine Tour im Stapel weiter nach oben sortiert wird, d.h. besonders schwer einplanbar ist, sind z.B. die Nähe des Abfahrtszeitpunktes der Tour zum aktuellen Zeitpunkt, die Nähe des Bedarfszeitpunktes einer der geladenen Sendungen zum aktuellen Zeitpunkt oder eine hohe künstliche Priorität über die Vergabe von Prioritätskennziffern 1 - 5. Nachfolgend werden die Touren von oben beginnend aus dem Stapel genommen und in das Gantt-Chart eingeplant. Jedes der potentiell zulässigen Tore wird durchlaufen, bis das frühestmögliche Zeitfenster zur Belegung dieses Tors durch die aktuelle Tour ermittelt wird. Darüber hinaus darf die resultierende Beanspruchung der innerbetrieblichen Umschlagmittelressourcen nach einer solchen Zuweisung zu keinem Zeitpunkt die vorgegebene Obergrenze überschreiten. Speziell entwickelte Routinen überprüfen diese Kriterien anhand des gegebenen Gantt-Charts. Insgesamt wird aus allen Toren dasjenige gewählt, das bezüglich der beiden Zielkriterien Wartezeiten und resultierende Wegstrecken zu der geringsten Erhöhung führt. Eine prozentuale Gewichtung der Zielkriterien steuert, welches der beiden Zielkriterien stärker berücksichtigt wird. Abschließend werden die Ergebnisse der Heuristik im Gantt-Chart dargestellt. Die Heuristik ist extrem flexibel und leicht um die Anforderungen eines Anlagenbetreibers erweiterbar, liefert allerdings im Vergleich zu dem evolutionären Ansatz aus [10] wesentlich schlechtere Ergebnisse²³ und berücksichtigt zudem nicht mehrstufige innerbetriebliche Prozesse.

Analyse der bestehenden Lösungsansätze:

Die Arbeiten der verschiedenen Planungsbereiche sind zusammengefasst in folgender Tabelle aufgeführt:

Beitrag	Logistik-anlage	Methodischer Lösungsansatz	Layout der Halle	Logistische Funktion der Tore (E/A)	Tor-Relation-Zuordnung	Scheduling an Toren	Zeitliche Fluss der Sendungen	Zeitliche Nutzung der Ressourcen und Flächen
Gue und Bartholdi	CD	Szenarienrechnung, lokale Suche	x					
Gudehus	LA	Materialflussrechnung	x					
Gue und Bartholdi	SPA	Lokales Suchverfahren		x	x			
Tsui und Chang	SPA	Iterativer Branch-and-Bound			x			
Bermúdez und Cole	SPA - Hub	Genetischer Algorithmus		x	x			
Stickel und Metzelaers	CD	Branch-and-Bound				x	x	
Li	CD	Genetischer Algorithmus					x	x
Gue	SPA	Szenarienrechnung		x	x	x		
Dilling und Reinholz	SPA	Lokales Suchverfahren			x			
Stickel	CD	Kombinatorische Auktion				x		
Bartz-Beielstein et. al.	SPA	Evolutionärer Algorithmus			x	x		
hafa Docking Systems	LA	Schedulingheuristik			x	x	x	x

Tabelle 3.1: Klassifizierung bestehender Arbeiten zur Optimierung in Umschlaganlagen

²³ vgl. Bartz-Beielstein, Chmielewski, Janas, Naujoks, Scheffermann ([10]), 2006, S. 352

In der ersten Spalte ist der Autor und in der zweiten Spalte der jeweils untersuchte logistische Anlagentyp (SPA - Stückgutspeditionsanlage, CD - Crossdockingterminal, LA - allgemeine logistische Anlage) angegeben. Das verwendete methodische Lösungsverfahren wird in der dritten Spalte vermerkt. Die hinteren sechs Spalten beschreiben die verschiedenen Teilbereiche der Torbelegungsplanung, ergänzt um die Layoutplanung. Anhand der Tabelle lässt sich ablesen, welche Teilbereiche der Torbelegungsplanung die Arbeiten jeweils abbilden.

In den vorgestellten Arbeiten wurden sowohl szenarienbasierte als auch heuristische Lösungsansätze, evolutionäre bzw. genetische und diskrete Methoden zur Optimierung entwickelt. Die meisten der Arbeiten verfolgen den exakten, diskreten Lösungsansatz nicht weiter, da bereits in der Modellierungsphase eine extreme Schwere des Problems nachgewiesen werden konnte. Dies liegt darin begründet, dass in ausschließlich allen Arbeiten der klassische Modellierungsansatz als quadratisches Zuordnungsproblem gewählt wurde. Für größere Instanzen der Probleme dieser Klasse stehen derzeit keine effizienten exakten Verfahren zur Verfügung²⁴. Als Folge dessen kann für den Großteil der hier beschriebenen nicht exakten Verfahren nicht nachgewiesen werden, wie "gut" die entwickelten Lösungen tatsächlich sind, d.h. wie nah sie zum theoretischen Optimum liegen.

Zudem beschränken sich die meisten der aufgeführten Arbeiten auf Teilbereiche der Torbelegungsplanung und hier im Besonderen auf die örtliche Zuordnung von Relationen oder Touren zu Toren und die Entscheidung über die Lage von Eingangs- und Ausgangstoren. Andere Entscheidungen, die im Rahmen der Torbelegungsplanung relevant sind, wie etwa das zeitliche Scheduling der Fahrzeuge oder aber der zeitliche Fluss der Sendungen durch die Halle und die Beanspruchung der Ressourcen werden selten integriert. Dies führt unter anderem dazu, dass der Großteil der Arbeiten auf einer stark vereinfachten Modellwelt basiert, in der wichtige logistische Aspekte und Regeln nicht oder nur teilweise integriert sind. Hierzu zählen beispielsweise

- das Vorhandensein mehrerer entkoppelter Hauptprozesse,
- das Vorhandensein unterschiedlicher Ressourcentypen und Leistungsparameter
- die Integration der Komponente Zeit in die Entscheidungssituation,
- die Verwendung von Logistikflächen und deren Kapazitäten,
- die innerbetriebliche Transportentscheidung zwischen den Toren und Flächen und
- die Beachtung des Fahrplans der Touren und Fahrzeuge.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines mathematischen Modells, das zum einen alle Entscheidungsebenen der Torbelegungsplanung - wie in Abbildung 2.11 dargestellt - als auch alle relevanten logistischen Objekte, Regeln und deren Zusammenhänge umfasst und zum anderen den Einsatz von effizienten mathematischen Optimierungsverfahren zulässt.

²⁴ vgl. Anstreicher ([4]), 2003, S. 27

3.3 Mathematische Optimierungsmodelle und ausgewählte Lösungsverfahren

Mathematische Optimierungsmodelle sind das Abbild eines technisch-ökonomischen Systems und verfügen über eine bestimmte Struktur²⁵:

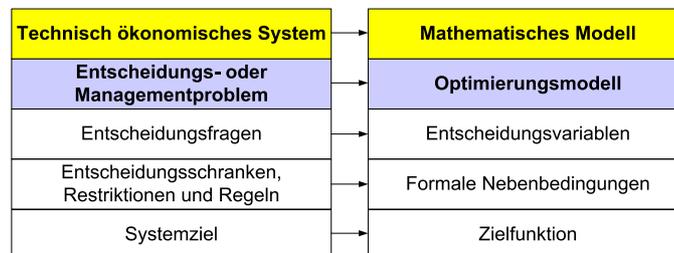


Abbildung 3.3: Struktur von mathematischen Optimierungsmodellen

Die Definition einer **Entscheidungsvariablen** x repräsentiert die im Rahmen des technisch-ökonomischen Systems zu beantwortende Frage (z.B. "Anzahl Touren pro Tag"). Um eine Menge an Entscheidungen darzustellen, kann x auch als Entscheidungsvektor aufgefasst werden. Die Schranken oder Regeln im realen System stellen Anforderungen an die Entscheidungen und müssen eingehalten werden (z.B. "Nur 5 Fahrzeuge zur Verfügung"). Ihre Repräsentation im mathematischen Modell erfolgt durch **Nebenbedingungsfunktionen** $h_i(x)$, die in Abhängigkeit der Entscheidungsvariablen x definiert und in Gleichungen oder Ungleichungen eingebunden sind (z.B. $h_i(x) \leq b_i$ oder $h_i(x) = b_i$). Das Ziel einer Planungsaufgabe, d.h. das Optimierungsziel, wird als **Zielfunktion** $z(x)$ in Abhängigkeit von x formuliert. Diese soll anschließend über dem durch die Nebenbedingungsfunktionen aufgespannten Lösungsraum minimiert oder maximiert werden.

Nach Erstellung eines Optimierungsmodells und der anschließenden Modellanalyse (siehe Abbildung 1.1) kann das Modell i.d.R. einer bestimmten mathematischen Klasse zugeordnet werden. Bekannte Modellklassen sind etwa lineare / nichtlineare Optimierungsmodelle, ganzzahlige bzw. kombinatorische, gemischt-ganzzahlige, stetige oder graphentheoretische Optimierungsmodelle. Für die einzelnen Modellklassen steht eine Menge an Algorithmen zur Verfügung, welche bereits im Rahmen der mathematischen Forschung entwickelt wurden. Ein bekanntes Beispiel ist das Simplexverfahren für stetige lineare Modelle. Diese können auf das entwickelte Optimierungsmodell angewandt werden. Darüber hinaus ist es möglich, die Verfahren unter Zuhilfenahme von speziellem Problemwissen weiter zu entwickeln bzw. zu modifizieren.

Das nachfolgend in Kapitel 4 entwickelte mathematische Modell zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne in Stückgutanlagen gehört zu der Klasse der ganzzahligen linearen Optimierungsmodelle. Das Standardverfahren für Probleme dieser Klasse ist das Branch-and-Bound Verfahren, welches in der vorliegenden Arbeit für Testzwecke angewandt wird. In Kapitel 3.3.1 wird daher auf die Grundlagen des Branch-and-Bound Prinzips sowie auf eine Erweiterung des

²⁵ vgl. Domschke und Drexl ([30]), 2005, S. 4

Verfahrens um Schnittebenen eingegangen. Im Anschluss werden in Kapitel 3.3.2 die mathematischen Grundlagen aus der Theorie der primalen und dualen Optimierung und das hierauf basierende Column Generation Konzept hergeleitet. Motivation hierfür ist, das in der vorliegenden Arbeit für das entwickelte Optimierungsmodell ein spezieller Column Generation Ansatz entworfen wird.

3.3.1 Branch-and-Bound Prinzip

Ein allgemeines lineares Optimierungsmodell²⁶

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x & (3.1) \\ \text{u.d.N.:} \quad & Ax \leq b \\ & x \in \mathbb{Z}_+^p \times \mathbb{R}_+^{n-p} \end{aligned}$$

mit $c \in \mathbb{R}^n$, $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ gehört zu der Klasse der diskreten bzw. ganzzahligen Modelle, falls an alle Entscheidungsvariablen x_1, \dots, x_n die Bedingung gestellt wird, dass diese nur aus der Menge \mathbb{Z}_+ der positiven ganzen Zahlen stammen dürfen ($p = n$). Gilt diese Einschränkung nur für einige der Komponenten x_i ($1 \leq p \leq n - 1$), so wird das lineare Modell gemischt-ganzzahlig genannt (engl.: mixed integer linear programm - MILP). Für den Fall, dass sämtliche Komponenten nur die Werte 0 oder 1 annehmen dürfen, ist ein binäres Optimierungsproblem gegeben.

Die Nebenbedingungsmatrix A schränkt den Lösungsraum ein, aus dem eine zulässige Lösung x stammen soll. Im Folgenden ist dies für ein zweidimensionales Beispiel²⁷ skizziert (linker Teil der Abbildung).

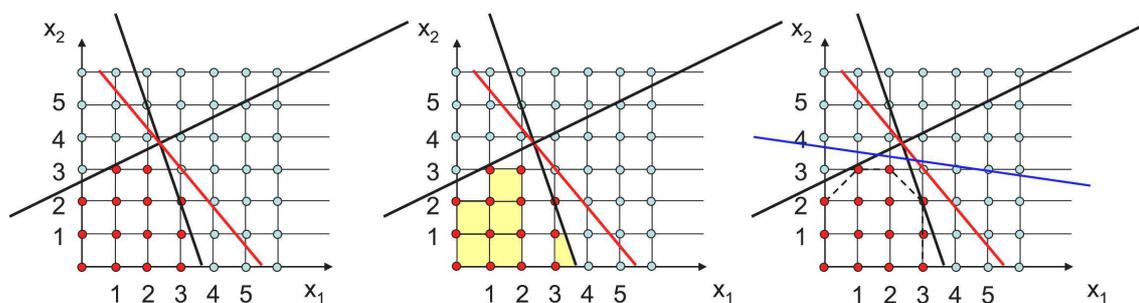


Abbildung 3.4: Lösungsraum eines ganzzahligen Optimierungsmodells

Hierbei existieren zwei Nebenbedingungsfunktionen $h_1(x_1, x_2) \leq 11$ und $h_2(x_1, x_2) \leq 5$ mit $h_1(x_1, x_2) = 3x_1 + x_2$ und $h_2(x_1, x_2) = -x_1 + 2x_2$. Zusammen mit den Bedingungen $x_1 \geq 0$ und $x_2 \geq 0$ spannen diese einen Raum auf. Aufgrund der Ganzzahligkeitsforderung an den Entscheidungsvektor $(x_1, x_2)^T \in \mathbb{Z}_+^2$ kommen innerhalb dieses Raums lediglich die rot eingefärbten ganzen Zahlen als Lösung in Frage. Die Zielfunktion zu diesem Beispiel ist durch die Funktion $z(x_1, x_2) = -6x_1 - 5x_2 \rightarrow \max$ gegeben und für das Zielfunktionsniveau $z = 33$ als rote Gerade beispielhaft eingezeichnet.

²⁶ vgl. Neumann, Morlock ([62]), 1993, S. 531

²⁷ vgl. Mitchell ([59]), 1999, S. 4

Eine Möglichkeit, sich in dieser Situation für eine Lösung zu entscheiden ist die *vollständige Enumeration*. Dies kommt einem "unkritischen Ausprobieren" durch Einsetzen aller möglichen (x_1, x_2) -Kombinationen in die Zielfunktion und der Auswahl der letztendlich besten Lösung gleich. Dieses Verfahren ist bei großen Probleminstanzen absolut ungeeignet, da es zu sehr langen Laufzeiten führt, die auch mit einer hohen Rechnerleistung nicht kompensiert werden können.

Eine andere Herangehensweise ist durch die *implizite Enumeration*²⁸ gegeben. Der Lösungsansatz liegt darin, Teilmengen des Lösungsraums zu identifizieren, von denen bekannt ist, dass die optimale Lösung sich hierin nicht befindet. Folglich können diese Teilmengen ausgeblendet werden, um sich in der Suche auf die verbleibenden Räume zu konzentrieren. Diese Suchmethode wird mittels eines **Suchbaums** gesteuert. Die Knoten des Baums entsprechen den Teilmengen, auf denen das Problem aktuell untersucht wird. In den Knoten müssen Lösungen für die **LP-Relaxierungen** des jeweiligen Problems gefunden werden. Eine LP-Relaxierung eines beliebigen (gemischt-) ganzzahligen Optimierungsmodells entsteht durch Vernachlässigung der Ganzzahligkeitsbedingungen an die Entscheidungsvariablen. Die Bedingungen $x_i \in \mathbb{Z}_+$ werden sämtlich durch $x_i \in \mathbb{R}_+$ ersetzt, was zu einer Reduktion der Problemkomplexität führt. Das Problem wechselt von der Klasse der diskreten Probleme in die der stetigen. Für letztere sind effiziente Algorithmen wie etwa das Simplexverfahren bekannt, die zur Lösung der Relaxierung verwendet werden können. Im ersten Knoten, dem so genannten Root-Knoten, bei dem noch keine vernachlässigbaren Teilmengen identifiziert werden konnten, wird die LP-Relaxierung des Ursprungsmodells gelöst. Für obiges zweidimensionales Beispiel ist diese Lösung durch $x_1 = 17/7$, $x_2 = 26/7$ gegeben und im linken Teil der Abbildung 3.4 als Schnitt der rot eingetragenen Zielfunktion mit dem relaxierten Lösungsraum (= alle Punktepaare (x_1, x_2) innerhalb der begrenzenden Geraden) ablesbar. Diese Lösung ist offensichtlich für das zugrunde liegende ganzzahlige Problem nicht zulässig. Somit wird ein **Branching** durchgeführt. Hierunter wird das "Ausschneiden" von Teilmengen aus dem Lösungsraum, von denen bekannt ist, dass hier die Lösung nicht liegen kann, und das Verzweigen in die verbleibenden Unterräume verstanden. In obigem Beispiel ist der erste Branching-Schritt durch die gelbe Schattierung im mittleren Teil der Abbildung 3.4 angezeigt. Die Einführung zusätzlicher Nebenbedingungen zu dem bestehenden Modell ($x_1 \leq 2$ oder $x_1 \geq 3$) schließt die bisherige optimale aber unzulässige Lösung aus, garantiert aber dennoch, dass keine potentielle ganzzahlige Lösung verlorengeht. Jeder der beiden Unterräume bildet einen neuen Knoten im Suchbaum, für den erneut LP-Relaxierungen gelöst werden. Grundsätzlich ist durch das Hinzufügen von Nebenbedingungen zu einem bestehenden Optimierungsmodell der optimale Zielfunktionswert der besten Lösung über dem so zusätzlich eingeschränkten Lösungsraum maximal gleich oder aber schlechter als der der besten Lösung des ursprünglichen Modells. Dieser Zusammenhang wird als **Bounding** bezeichnet und kann wie folgt ausgenutzt werden. Bei einem Minimierungsproblem beispielsweise wird in einer weiter oben angesiedelten Knotenebene für eines der Teilprobleme eine zulässige Lösung x^* mit dazu gehörendem Zielfunktionswert Z^* gefunden. Im aktuell untersuchten weiter unten liegenden Knoten entsteht für die fraktionale Lösung x_{neu} der Zielfunktionswert Z_{neu} mit $Z_{neu} \geq Z^*$. Hieraus lässt sich folgern, dass die Suche in den diesem Knoten folgenden Ästen des Suchbaums abgebrochen werden kann, um sich auf andere noch nicht besuchte Äste

²⁸ vgl. Neumann und Morlock ([62]), 1993, S. 393

und ihre Knoten zu konzentrieren. Der Zielfunktionswert in einem Knoten dient somit u.a. als untere Schranke. Die Hauptelemente des Branch-and-Bound Prinzips werden im folgenden schematischen Suchbaum zusammengefasst:

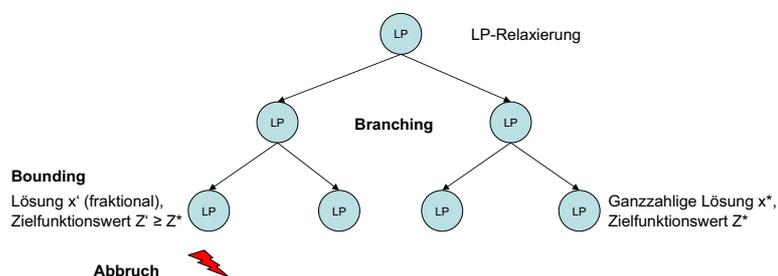


Abbildung 3.5: Ablauf des Branch-and-Bound Verfahrens und Darstellung im Suchbaum

Das **Branch-and-Bound Verfahren** gehört zu der Klasse der exakten Lösungsverfahren. Falls das Verfahren in der Lage ist, für ein gegebenes Problem in endlicher und adäquater Laufzeit eine optimale Lösung zu finden, ist garantiert, dass es keine besseren Lösungen mehr geben kann²⁹.

Es existieren diverse Strategien, wie der Suchprozess im Branch-and-Bound Baum für ein spezielles Problem gesteuert werden kann. Diese beziehen sich beispielsweise auf die Auswahl des nächsten zu untersuchenden Knotens (z.B. Knoten im gleichen Ast oder Knoten mit kleinstem Zielfunktionswert) oder aber auf die Art der Verzweigung in den Variablen (z.B. größte oder kleinste fraktionale Variable)^{30,31}. Die Auswahl der Strategien kann nach dem jeweils gegebenen mathematischen Problem unterschiedlich erfolgen und beeinflusst die Laufzeit des Verfahrens.

Eine Alternative zur Verbesserung der Laufzeit des Branch-and-Bound Verfahrens liegt in der Verwendung von so genannten Schnittebenen oder Cutting Planes in Kombination mit dem Lösungsprinzip des Branch-and-Bound. Die hieraus resultierende Methode wird als **Branch-and-Cut Verfahren** bezeichnet und wird im Folgenden in den Grundzügen dargestellt:

Der durch die Nebenbedingungen aus Problem 3.1 und die nichtnegativen Ganzzahligkeitsbedingungen $x_i \in \mathbb{Z}_+$ mit $i \in \{1, \dots, n\}$ aufgespannte Raum wird im Folgenden durch M bezeichnet. Der Raum, welcher durch die LP-Relaxierung von M entsteht, wird P genannt. Von besonderem Interesse in der diskreten Optimierung ist die *konvexe Hülle* eines Lösungsraums $M \in \mathbb{R}^n$. Die konvexe Hülle $\text{conv}(M)$ ist definiert als kleinste konvexe Menge des \mathbb{R}^n , die M enthält. Anders formuliert ist die konvexe Hülle von M ein konvexes Polyeder, für welches gilt, dass alle ganzzahligen Punkte im Innern liegen. Im rechten Teil der Abbildung 3.4 entspricht die konvexe Hülle der Gesamtheit der gestrichelten Geraden.

²⁹ vgl. Korte, Vygen ([52]), 2006, S. 527

³⁰ vgl. Papadimitriou und Steiglitz ([63]), 1998, S. 437

³¹ vgl. Bussieck ([14]), 1998, S. 34-35

Es gelten folgende Zusammenhänge zwischen den Lösungsräumen: $M \subseteq \text{conv}(M) \subseteq P$. Zudem lässt sich zeigen³², dass eine optimale Lösung des auf der konvexen Hülle definierten stetig linearen Optimierungsproblems

$$\begin{aligned} \min c^T x & \quad (3.2) \\ \text{u.d.N.: } x \in \text{conv}(M) \end{aligned}$$

eine optimale Lösung des dazu gehörenden ganzzahligen Ursprungsproblems $\min \{c^T x \mid x \in M\}$ ist. Durch den Beweis dieses Zusammenhangs kann das Ursprungsproblem äquivalent durch ein Problem der Klasse der stetigen linearen Optimierung ersetzt werden, für welches i.d.R. einfacher Lösungen bestimmt werden können (z.B. mit Hilfe des Simplexverfahrens). Eine Schwierigkeit liegt jedoch in der unter Umständen extrem großen Anzahl an Gleichungen zur Beschreibung der konvexen Hülle. Da das Simplexverfahren entlang der Ecken des Lösungsraums als Schnittpunkte der Gleichungen eine optimale Lösung sucht, kann dies wiederum dazu führen, dass auch der Simplex an Geschwindigkeit verliert. Die klassische Formulierung des Traveling Salesman Problems mit einer Anzahl von nur neun Städten hat beispielsweise bereits über 42 Millionen Seiten³³, die die konvexe Hülle beschreiben. Eine weitere Voraussetzung ist, dass die Gleichungen, welche die konvexe Hülle beschreiben, bekannt sind.

Letzteres ist nicht zwingend erfüllt. Die Idee des klassischen *Schnittebenenverfahrens von Gomory*³⁴ liegt daher darin, schrittweise Nebenbedingungen zu dem relaxierten Lösungsraum P des Ursprungsproblems hinzuzufügen. Diese dürfen einerseits zulässige ganzzahlige Punkte nicht ausschließen und müssen andererseits dafür sorgen, dass P immer stärker der konvexen Hülle $\text{conv}(M)$ angenähert wird. Im rechten Teil der Abbildung 3.5 ist ein Beispiel für eine solche Schnittebene die blau eingezeichnete Gerade. Das relaxierte Problem wird anschließend gelöst. Liegt danach eine ganzzahlige Lösung vor, so ist das Verfahren beendet. Andernfalls werden neue Schnittebenen hinzugefügt.

Das *Branch-and-Cut Verfahren* grenzt sich zu dem reinen Schnittebenenverfahren von Gomory dadurch ab, dass die Schnittebenen während des Suchprozesses im Branch-and-Bound Baum an geeigneter Stelle hinzugefügt werden. Der Ablauf des Verfahrens besteht im Kern darin, dass nach der Lösung der LP-Relaxierung in einem beliebigen Knoten des Branch-and-Bound Baumes entschieden wird, ob direkt in einer der noch fraktionalen Entscheidungsvariablen verzweigt oder aber statt dessen sinnvolle Schnittebenen eingefügt werden. Geschieht letzteres, so wird zunächst die LP-Relaxierung des Modells in dem aktuellen Knoten, erweitert um die von einem Separationsalgorithmus gefundenen Gleichungen, erneut gelöst³⁵. Hierbei besteht die Möglichkeit, verstärkt problemspezifisch zu arbeiten, indem die Schnittebenen unter Verwendung von speziellem Problem- oder Modellwissen entwickelt werden. Branch-and-Cut Algorithmen sind insbesondere für das Traveling-Salesman Problem entwickelt worden.

³² vgl. Neumann und Morlock ([62]), 1993, S. 531

³³ vgl. Mitchell et al ([61]), 1998, S. 39

³⁴ vgl. Papadimitriou und Steiglitz ([63]), 1998, S. 326-330

³⁵ vgl. Mitchell ([60]), 2000, S. 75

3.3.2 Column Generation Konzept

Column Generation (= CG) ist eine Methode, die in der linearen Optimierung häufig eingesetzt wird, wenn das zu lösende Problem aus sehr vielen Entscheidungsvariablen besteht. In diesem Fall schaffen auch leistungsfähige Algorithmen, wie das Simplexverfahren, es nicht mehr, optimale Lösungen in kurzer Laufzeit zu generieren. Die Idee des Column Generation besteht darin, nur mit einer Untermenge an Entscheidungsvariablen, die die Spalten der Nebenbedingungsmatrix bilden, in den Lösungsprozess hineinzugehen. Das Ursprungsproblem wird als **Master Problem** (= MP) bezeichnet und das auf der reduzierten Spaltenmenge definierte Subproblem als **Restricted Master Problem** (= RMP). Mit Hilfe eines weiteren Modells wird anschließend ermittelt, ob eine optimale Lösung des RMP auch das übergeordnete Problem MP optimal löst. Ist dies nicht der Fall, so werden neue Spalten erzeugt und hinzugefügt, um das Subproblem RMP erneut zu lösen. Das Modell zur Bestimmung neuer Spalten bzw. zur Überprüfung der Optimalität bereits gefundener Lösungen heißt in diesem Zusammenhang **Pricing Problem**. Wichtig für den theoretischen Zusammenhang zwischen Pricing Problem und Master Problem sind bestimmte Aspekte der linearen Optimierung, wie z.B. der Begriff der Dualität oder negativer reduzierter Kosten. Diese werden daher im folgenden Abschnitt erläutert, bevor im Anschluss daran das Column Generation Konzept detaillierter vorgestellt wird.

Theorie der linearen Optimierung:

Ein allgemeines lineares Optimierungsmodell in Standardform, im Folgenden als **primales Problem** PP bezeichnet, hat die folgende Gestalt³⁶:

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x & (3.3) \\ \text{u.d.N.:} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

Die Vektoren c und x stammen aus dem \mathbb{R}^n , b aus dem \mathbb{R}^m . A ist eine reellwertige $(m \times n)$ -Matrix. Es ist prinzipiell möglich, jedes lineare Optimierungsproblem durch Einführung von Schlupfvariablen und Äquivalenzumformungen in die hier vorgestellte Standardform zu bringen.

In der Literatur wird das zu PP **duale Problem** DP³⁷ untersucht:

$$\begin{aligned} \max \quad & b^T u & (3.4) \\ \text{u.d.N.:} \quad & A^T u + s = c \\ & s \geq 0 \end{aligned}$$

Die Vektoren b und c sowie die Matrix A stimmen mit denen aus PP überein. Der Vektor u ist aus dem \mathbb{R}^m , s aus dem \mathbb{R}^n . Die Entscheidungsvariablen u und s werden als *Dualvariablen* bezeichnet. Während u im Vorzeichen unbeschränkt ist, muss s nicht-negativ sein.

³⁶ vgl. Papadimitriou und Steiglitz ([63]), 1998, S. 68

³⁷ vgl. Papadimitriou und Steiglitz ([63]), 1998, S. 69

Zwischen den Lösungen des primalen und des dazu gehörenden dualen Problems existieren verschiedene theoretische Zusammenhänge:

Theorem 3.1 (Schwache Dualität)

Es sei der Vektor x zulässig für das primale Problem PP und der Vektor $(u, s)^T$ zulässig für das duale Problem DP . Dann gilt stets: $c^T x \geq b^T u$ ³⁸.

Der zu Theorem 3.1 gehörende Beweis³⁹ liefert: $c^T x - b^T u = s^T x \geq 0$. Der Ausdruck $s^T x$ wird in diesem Zusammenhang *Komplementaritätslücke* oder *Dualitätslücke*⁴⁰ genannt. Ist diese gleich Null, so stimmt der Zielfunktionswert $c^T x$ des primalen Problems mit der seiner unteren Grenze $b^T u$ des dualen Problems überein.

Theorem 3.2 (Komplementärer Schlupf)

Eine zulässige Lösung x^* des primalen Problems PP ist genau dann optimal, wenn eine Lösung $(u^*, s^*)^T$ des dualen Problems DP existiert, die die Komplementär-Schlupf-Bedingung erfüllt⁴¹:

1. $s_i^* \cdot x_i^* = 0, \forall i \in \{1, \dots, n\}$
2. $s_i^* \geq 0, \forall i \in \{1, \dots, n\}$ (siehe Definition des dualen Problems).

Anders formuliert⁴² gilt nach Theorem 3.2, dass eine Komplementaritätslücke $s^T x$, die den Wert Null beträgt, auf eine optimale Lösung x^* des Problems PP und eine optimale Lösung $(u^*, s^*)^T$ des dualen Problems DP hinweist (dementsprechend gilt: $c^T x^* = b^T u^*$).

Definition 3.3 (Reduzierte Kosten)

Die Probleme PP und DP seien lösbar und $(u, s)^T$ eine zulässige Lösung von DP . Durch

$$s_i = c_i - u^T a_i$$

werden die reduzierten Kosten der Entscheidungsvariablen x_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) definiert. Hierbei stellt a_i die i -te Spalte der Nebenbedingungsmatrix A dar⁴³.

Aufgrund der Theoreme 3.1 und 3.2 sowie der Definition 3.3 können folgende Schlussfolgerungen für zulässige, aber nicht optimale Lösungen angestellt werden:

Lemma 3.4 (Negative Reduzierte Kosten)

- a) Eine zulässige Lösung x von PP ist nicht optimal, solange es mindestens eine Variable x_i mit negativen reduzierten Kosten $s_i < 0$ gibt.
- b) In einer optimalen Lösung x^* von PP haben alle Variablen mit positiven reduzierten Kosten $s_i \geq 0$ den Wert Null.⁴⁴

³⁸ vgl. Andersen ([3]), 1998, S. 10

³⁹ vgl. Andersen ([3]), 1998, S. 10

⁴⁰ vgl. Andersen ([3]), 1998, S. 10

⁴¹ vgl. Korte, Vygen ([52]), 2006, S. 58

⁴² vgl. Andersen ([3]), 1998, S. 11

⁴³ vgl. Freling ([33]), 1997, S. 17

⁴⁴ vgl. Huisman ([44]), 2004, S. 17

Column Generation in stetiger Optimierung:

Es ist das primale Problem 3.3 der linearen Optimierung gegeben, welches im folgenden Zusammenhang auch als *Master Problem*⁴⁵ (= MP) bezeichnet wird. Die Menge aller Spalten, d.h. der Entscheidungsvariablen, ist durch $I = \{1, \dots, n\}$ gegeben. Die Nebenbedingungen werden durch die Menge $J = \{1, \dots, m\}$ repräsentiert.

Das zu MP gehörende *Restricted Master Problem*⁴⁶ (= RMP) wird definiert, indem die Spaltenmenge I auf eine Untermenge $I' \subset I$ eingeschränkt wird, für die gesichert ist, dass eine zulässige Lösung des MP existiert:

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x & (3.5) \\ \text{u.d.N.:} \quad & Ax = b \\ & x_i \geq 0, \forall i \in I' \end{aligned}$$

Wird das RMP mit einem gängigen Algorithmus der linearen Optimierung optimal gelöst, so muss nach Theorem 3.2 für die Lösung x_i^* ($i \in I'$) die Komplementär-Schlupf-Bedingung gelten: $s_i^* * x_i^* = 0, \forall i \in I'$ und $s_i^* \geq 0, \forall i \in I'$.

Um Wissen darüber zu erlangen, ob die Lösung x_i^* mit $i \in I'$ auch das übergeordnete MP optimal löst, werden folgende Überlegungen angestellt:

Werden zunächst alle Entscheidungsvariablen x_i mit $i \notin I'$ aus dem MP auf Null gesetzt, so ist die erweiterte Lösung, welche aus der Lösung des RMP x^* ergänzt um die Nullvariablen besteht, zulässig für das MP. Die zusammengesetzte Lösung erfüllt den ersten Teil der Komplementär-Schlupf-Bedingung ($s_i^* * x_i^* = 0$) für das MP, da sie sie bereits für das RMP erfüllte und die hinzugefügten x_i mit $i \notin I'$ alle den Wert Null betragen. Zum Nachweis der Optimalität der zusammengesetzten Lösung für das MP ist auch die Erfüllung des zweiten Teils der Komplementär-Schlupf-Bedingung, d.h. die Forderung $s_i^* \geq 0$, erforderlich. Dies ist für die Spalten mit $i \notin I'$ nicht garantiert. Für eine Überprüfung können die reduzierten Kosten $s_i = c_i - u^T a_i$ herangezogen werden. Sind diese für alle $i \notin I'$ größer oder gleich Null, so ist die Lösung des RMP auch für das MP optimal. Existiert eine Spalte mit $s_i \leq 0$, d.h. für mindestens eine Entscheidungsvariable $i \notin I'$ sind die reduzierten Kosten negativ, so folgt unmittelbar, dass die zusammengesetzte Lösung nicht optimal für das MP ist. Zusammengefasst gilt (in Anlehnung an [33], [9]):

Theorem 3.5 (Column Generation Optimalität)

Es sei ein lineares Optimierungsproblem gegeben. Auf der Menge aller Entscheidungsvariablen I ist das MP und auf der mindestens eine zulässige Lösung enthaltenden Untermenge $I' \subset I$ das RMP definiert. Durch u^ ist die optimale Lösung des zum RMP gehörenden dualen Problem gegeben und durch $s_i = c_i - u^T a_i$ die reduzierten Kosten für alle Entscheidungsvariablen x_i mit $i \notin I'$. Dann ist eine Lösung x_i^* vom RMP mit $i \in I'$ auch optimal für das MP, falls alle reduzierten Kosten größer als Null sind ($s_i \geq 0, \forall i \notin I'$).*

⁴⁵ vgl. Lübbecke ([55]), 2001, S. 39

⁴⁶ vgl. Lübbecke ([55]), 2001, S. 36

Mit Hilfe des Theorems wird ein iterativer Lösungsprozess definiert, wie nachfolgend dargestellt:

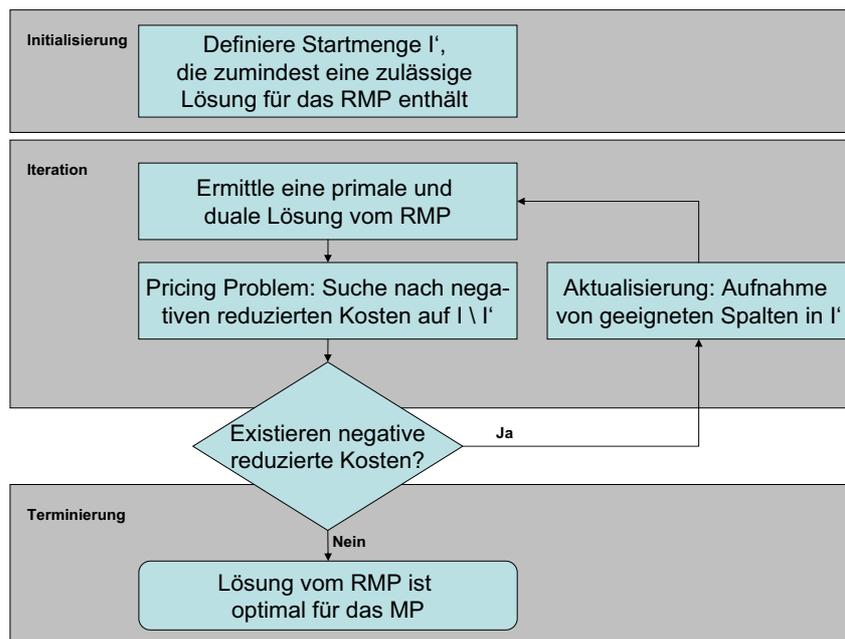


Abbildung 3.6: Ablauf des Column Generation Verfahrens

Beginnend auf einer Untermenge I' , die zumindest eine zulässige Lösung enthält, wird das RMP definiert und optimal gelöst. Existieren im Anschluss daran in der Menge der nicht betrachteten Spalten $I \setminus I'$ noch Spalten mit negativen reduzierten Kosten, so kann die Lösung des MP verbessert werden, indem diese Spalten zu I' hinzugefügt werden und das RMP mit der erweiterten Menge erneut gelöst wird. Das Verfahren bricht ab, sobald in der Menge $I \setminus I'$ keine Spalten mit negativ reduzierten Kosten mehr auffindbar sind. Die Suche nach Spalten mit negativen reduzierten Kosten wird auch als *Pricing Problem*⁴⁷ bezeichnet. Stehen nach Lösen des Pricing Problems mehrere Spalten mit negativen reduzierten Kosten zur Verfügung, so muss entschieden werden, welche bzw. wie viele in die Menge I' aufgenommen werden sollen. Grundsätzlich kann hier in Anlehnung an das Simplexverfahren verfahren werden. Beim Simplexverfahren werden nach einer Iteration diejenigen Nicht-Basisvariablen⁴⁸ zur Aufnahme in die Lösung ausgewählt, die die kleinsten negativen reduzierten Kosten haben, d.h. es wird das Subproblem $\min \{s_i = c_i - u^T a_i \mid i \notin I'\}$ gelöst. Wie viele Spalten jeweils aufgenommen werden, muss beim Column Generation problemspezifisch entschieden werden. Grundsätzlich gilt, dass die Aufnahme vieler neuer Spalten zu großen Verbesserungen im Zielfunktionswert in jeder Iteration führt. Die daraus resultierende große Spaltenmenge I' kann aber auch Laufzeitprobleme bei der Lösung des RMP erzeugen.

Allgemein wird das *explizite* und das *implizite Column Generation*⁴⁹ unterschieden. Im ersten Fall sind sämtliche Spalten vor Beginn des Verfahrens bekannt und in einem Datenpool gespeichert. Ist bereits die Erzeugung aller möglichen Spalten für ein Optimierungsproblem eine zu komplexe Aufgabe, so wird vom impliziten Column Generation gesprochen. In diesem Fall sind nur die

⁴⁷ vgl. Lübbecke ([55]), 2001, S. 46

⁴⁸ vgl. Lübbecke, Desrosiers ([57]), 2005, S. 7

⁴⁹ vgl. Freeling ([33]), 1997, S. 16-17

Spalten des aktuellen RMP bekannt. Das Pricing Problem wird nicht nur zur Auswahl geeigneter Spalten genutzt, sondern es erzeugt auch, sofern vorhanden, in jeder Iteration neue Spalten mit negativen reduzierten Kosten.

Es gibt keine einheitliche Aussage über das beste Pricing Modell oder die beste Strategie zur Spaltenauswahl. Vielmehr sind diese Elemente intelligente, auf das jeweilig zugrunde liegende Problem angepasste Verfahren. Lediglich die Grundstruktur eines Column Generation Verfahrens bleibt entsprechend der Darstellung in Abbildung 3.6 erhalten.

Das Column Generation Verfahren für stetige lineare Probleme gehört zur Klasse der exakten mathematischen Methoden. Können im Pricing Schritt keine Spalten mit negativen reduzierten Kosten mehr gefunden werden, so ist die Lösung des RMP eine optimale Lösung des MP, welche nicht weiter verbessert werden kann.

Column Generation in diskreter Optimierung:

Column Generation wird nicht nur für lineare stetige Probleme verwendet, sondern häufig auch für kombinatorische oder diskrete Probleme. Beispiele sind hier etwa das Crew Scheduling Problem⁵⁰, das Vehicle Routing Problem⁵¹ oder auch ganzzahlige Mehrgüterflussprobleme⁵².

Wie in Kapitel 3.3.1 erläutert, muss in jedem Knoten eines Branch-and-Bound Baumes die LP-Relaxierung eines diskreten oder gemischt-ganzzahligen Problems gelöst werden. Ist die Anzahl der Entscheidungsvariablen des zugrunde liegenden Problems sehr hoch, so kann das im Knoten eingesetzte Verfahren Schwierigkeiten haben, in effizienter Zeit eine Lösung zu entwickeln. Bei der Vielzahl an Knoten, die i. d. R. während des kompletten Suchprozesses im Branch-and-Bound Baum durchlaufen werden müssen, führt dies dazu, dass große Probleme nicht mehr in akzeptabler Laufzeit zu lösen sind. Neben der Einführung von Schnittebenen in einem Knoten, wie beim Branch-and-Cut praktiziert, kann zur Beschleunigung des Lösungsprozesses in den Knoten auch das Column Generation Konzept angewendet werden. Das aus der Kombination von Column Generation und Branch-and-Bound resultierende Verfahren wird als **Branch-and-Price** bezeichnet. Die LP-Relaxierung des aktuellen Knotens an einer beliebigen Stelle im Branch-and-Bound Baum wird folglich nicht basierend auf der kompletten Spaltenmenge durch ein Verfahren der stetigen Optimierung gelöst. Vielmehr wird eine initiale Startmenge an Spalten entwickelt und hierauf das RMP definiert. Über das oben beschriebene Zusammenspiel zwischen dem RMP, dessen Dualvariablen und dem ebenso zuvor definierten Pricing Problem, werden neue Spalten hinzugefügt, bis das Verfahren terminiert. Anschließend wird die Suche im Branch-and-Bound Baum entweder durch Verzweigen in noch fraktionalen Variablen oder durch das Besuchen eines neuen noch nicht untersuchten Knotens fortgeführt. Das Branch-and-Price Verfahren ist ein exaktes Verfahren, bei dessen Anwendung garantiert ist, dass eine gefundene optimale Lösung nicht verbessert werden kann.

Für bestimmte Problemenklassen, wie etwa das Tourenplanungsproblem, konnte durch die Entwicklung von Branch-and-Price Algorithmen die Laufzeit wesentlich verbessert und somit auch große Instanzen optimal gelöst werden. Die Integration des Column Generation Verfahrens in die

⁵⁰ vgl. Huisman ([44]), 2004

⁵¹ vgl. Sol ([72]), 1994

⁵² vgl. Barnhart, Hane, Vance ([8]), 2000

Knoten eines Branch-and-Bound bedeutet aber nicht automatisch für alle schweren kombinatorischen Probleme eine Laufzeitverbesserung. Ein zusätzlicher Nachteil des Verfahrens liegt in dem extrem hohen Aufwand bezüglich des Spaltenmanagements. In der Wissenschaft wird daher häufig eine abgewandelte Variante eingesetzt, mittels der auch für schwere mathematische Probleme schnell gute Lösungen gefunden werden können. Hierbei wird das Column Generation für das relaxierte Problem im Root-Knoten, d.h. im ersten Knoten des Branch-and-Bound Baums, durchgeführt. Die Menge der nach Beendigung des Verfahrens identifizierten Spalten wird für den anschließenden Suchprozess im Baum fixiert und nicht wie beim Branch-and-Price Verfahren in den folgenden Knoten dynamisch ergänzt. Dies bedeutet, dass im Root-Knoten eine Menge an "guten" Spalten gefunden und auf diesen basierend im Anschluss ein klassisches Branch-and-Bound Verfahren durchgeführt wird. Für die nach Abbruch des Verfahrens gefundene Lösung kann nicht mehr garantiert werden, dass diese optimal ist. Der Einsatz für verschiedene Problemklassen hat aber gezeigt, dass es möglich ist, schnell sehr gute Lösungen zu finden. Für Tourenplanungsprobleme mit Zeitfenstern etwa lagen die Ergebnisse im Durchschnitt 1,5 - 12,1% neben dem theoretischen Optimum, welches durch eine untere Schranke ermittelt wurde⁵³.

⁵³ vgl. Huisman ([44]), 2004, S. 18

Kapitel 4

Entwicklung eines mathematischen Optimierungsmodells

Die Torbelegungsplanung ist eine logistische Schnittstellenfunktion bei deren Optimierung die Anforderungen bzw. Vorgaben der angrenzenden Logistiksysteme berücksichtigt werden müssen. Aus dem außerbetrieblichen Logistiksystem ergeben sich beispielsweise Informationen zu den erwarteten Fahrzeugankünften oder den Lademengen der Fahrzeuge. Das innerbetriebliche Logistiksystem gibt z.B. die vorhandenen Umschlagressourcen oder die Flächenkapazitäten vor. Die Analyse bestehender Lösungsansätze hat gezeigt, dass derart reale Rahmenbedingungen bisher kaum in die Optimierungsmodelle integriert wurden. Die entwickelten Lösungen sind für die Praxis nur suboptimal oder gar unzulässig.

Ziel dieses Kapitels ist somit die praxisnahe mathematische Modellierung der Torbelegungsplanung in Stückgutspeditionsanlagen. Diese wird zunächst für den SA hergeleitet (Kapitel 4.1 - 4.3). Eine einfache Übertragbarkeit des Modells auf den SE kann anschließend in Kapitel 4.4 nachgewiesen werden. In Kapitel 4.5 wird das Branch-and-Cut Verfahren zur Lösung des entwickelten mathematischen Optimierungsmodells in der Version des Optimization Solvers CPLEX 10.0 herangezogen. Die Testergebnisse und Beobachtungen zum Lösungsverlauf werden nachfolgend vorgestellt.

4.1 Logistische Systemgrenzen

Prozesse und Ressourcen:

Die Entscheidungen der Torbelegungsplanung betreffen ausschließlich das geschilderte Teilsystem "Umschlag" (siehe Kapitel 2.3.2). Die Systemgrenzen des mathematischen Modells liegen daher aus Prozesssicht bei der Entladung bzw. Beladung der Fahrzeuge und örtlich gesehen an den Rampen bzw. Toren der Umschlaghalle. Informationen und Parameter der angrenzenden Systeme "Ankunft" und "Abfahrt" werden als Vorgaben angenommen, die bei der Optimierung zu beachten sind aber nicht beeinflusst werden.

Im Teilsystem "Umschlag" existiert eine Vielzahl an Prozessen. In der Praxis¹ werden *Hauptprozesse* und *Nebenprozesse* unterschieden. Hauptprozesse beanspruchen einen Großteil des Personals, sind zeitlich sehr intensiv und nehmen starken Einfluss auf die Umschlagseffizienz (z.B. Durchsatz pro Zeiteinheit) einer Anlage. Zu den Hauptprozessen im Stückgutumschlag zählen die Entladung der Sendungen, die innerbetriebliche Verbringung und die Beladung. Nebenprozesse hingegen sind zur Leistungserbringung erforderlich, machen aber einen weitaus geringeren Anteil aus. Typische Nebenprozesse sind das Öffnen eines Tores, die Verplombung von Wechselbrücken, das Suchen einer Sendung oder das Säubern des Arbeitsplatzes. Das Abbild aller Prozesse geht zu Lasten einer hohen Modellkomplexität. Zudem haben die Nebenprozesse wenig Einfluss auf die Effizienz einer Anlage und sind in Dauer und Umfang unabhängig von den Entscheidungen der Torbelegungsplanung. In der vorliegenden Arbeit wird sich daher auf die Abbildung der Hauptprozesse Entladung, Verbringung und Beladung konzentriert.

Automatisierte Umschlagmittel, wie z.B. Unterflurschleppkettenförderer, werden entsprechend Kapitel 2.3.2 in Stückgutspeditionsanlagen selten eingesetzt. Das zu entwickelnde Modell berücksichtigt daher den Transport der LE durch manuelle Umschlagmittel.

Innerbetriebliche Transportentscheidung:

Der Materialfluss in einer Stückgutanlage ist i.d.R. standardisiert von der Wareneingangszone in Richtung der Senken, d.h. der Ausgangstore, gerichtet. Die Ressourcen werden den jeweiligen Hauptprozessen in der innerbetrieblichen Transportkette "Entladung → Verbringung → Beladung" zugeordnet, so dass sich nur selten die Möglichkeit ergibt, eine LE von einem Ort A zu einem Ort B zu transportieren und am Ort B einen neuen Transportauftrag aufzunehmen. Realistischer ist, dass die Ressourcen die LE abstellen und zum Ausgangspunkt A (z.B. Eingangstor, Entladefläche) zurückkehren. Zudem sind in Stückgutspeditionsanlagen Gabelstaplerleitsysteme nur selten anzutreffen. Eine detaillierte Abbildung der innerbetrieblichen Transportbewegungen in Form eines tagesaktuellen Tourenplans kann von der Praxis nicht genutzt werden und bildet die Erfordernisse der realen innerbetrieblichen Transportkette nicht richtig ab. Anstelle einer Tourenplanung erfolgt innerbetrieblich im zu entwickelnden Modell dementsprechend eine Optimierung des Flusses der LE unter Berücksichtigung der Ressourcenkapazitäten. Ergebnis des Optimierungsmodells ist demnach ein zulässiger Regelplan zur Steuerung der Anlage an einem repräsentativen Verkehrstag, der die Ressourcenkapazitäten einhält, ohne einzelnen Ressourcen innerbetriebliche Transportaufträge zuzuordnen.

4.2 Formulierung der Optimierungsaufgabe

Formulierung der Planungsregeln: Tour und Relationen

Bei den im Rahmen der Torbelegung einzuplanenden Objekten handelt es sich eingangsseitig um die *Touren* im System und ausgangsseitig um die *Relationen*². Die Unterscheidung Relation und Tour ist für die Belegung der Tore im SA aus planerischer Sicht relevant, da sich jeweils andere Anforderungen an die zu treffenden Entscheidungen ableiten.

¹ Gespräch mit dem Betriebsleiter der Niederlassung Cordes und Simon in Hagen

² Die beiden Begriffe wurden in Kapitel 2.2 voneinander abgegrenzt.

Eine Relation im SA kann je nach Aufkommen mit mehreren Fahrzeugen gefahren werden. Wird die Relation einem der Tore zugewiesen, so gilt dieses Tor bis zum Zeitpunkt der Abfahrt des letzten Fahrzeugs als dauerhaft durch die Relation belegt. Fahrzeuge anderer Relationen werden nicht über das Tor abgewickelt, selbst wenn es für längere Zeit ungenutzt ist. Bei der Beladung der Relationen muss beachtet werden, dass diese nur nach dem Eintreffen des ersten Fahrzeugs am Tor bzw. vor dem Zeitpunkt der Abfahrt des letzten Fahrzeugs erfolgen kann (Bereitstellzeitpunkte). Dies hat Auswirkungen auf den innerbetrieblichen Fluss der Sendungen durch die Anlage und auf den Entladeprozess der Nahverkehrsfahrzeuge. Das letzte Fahrzeug einer Fernrelationen darf erst vom Tor abdocken, wenn alle Sendungen beladen sind.

Die Nahverkehrstouren kommen zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Stückgutanlage an. Die Anfahrt eines Eingangstores zur Entladung kann nur nach diesem Zeitpunkt erfolgen. Ebenso wird von einem festgelegten Abfahrtszeitpunkt ausgegangen, bis zu dem die Entladung und das Abdocken des Fahrzeugs vom Tor durchgeführt sein muss. Mehrere Nahverkehrstouren können sich an den Toren abwechseln und belegen sie im Gegensatz zu den Relationen nicht dauerhaft. Dies ist erwünscht, damit möglichst wenige Tore für den Eingang einer Anlage genutzt werden müssen. Die Zeit zwischen dem Abdocken einer Tour und dem Andocken einer weiteren Tour an ein und dem gleichen Tor wird im Folgenden als Rangierzeit bezeichnet und erfordert einen minimalen zeitlichen Abstand zwischen den Andockphasen zweier aufeinander folgender Touren³. Sowohl die Fahrzeuge des Nahverkehrs als auch des Fernverkehrs werden an einem Stück, d.h. an einem Tor ohne Unterbrechung durch andere Fahrzeuge an diesem Tor, abgefertigt. Ein Umstellen der Fahrzeuge an den Toren ist in der Praxis nicht erlaubt. Sämtliche Ladeeinheiten einer ankommenden Nahtour müssen entladen und auf die jeweilig gebuchten Fernverkehrsrelationen verbracht werden. Die Aufteilung, welche Sendungen einer Nahtour welche Fernziele haben, wird als "Sendungsmix einer Tour" bezeichnet. Ein Verbleiben der Sendungen in der Halle bis zum nächsten Verkehrstag ist aufgrund des 24 stündigen Leistungsversprechens im Stückgutgeschäft nicht erwünscht. Ausnahmen bilden diejenigen Sendungen, die für das eigene Nahverkehrsgebiet bestimmt sind. Sie werden auf einer ausgewiesenen Pufferfläche bis zur nächsten Verkehrswelle abgestellt. Sendungen internationaler Relationen, die nicht täglich bedient werden, werden vor dem ausgewählten Tor der Relation gepuffert. Diejenigen Sendungen, die aufgrund der Lieferbedingungen erst in den nächsten Tagen verladen werden dürfen, werden auf Lagerflächen abgestellt. Die "äußeren" Quellen bzw. Senken der innerbetrieblichen Transportprozesse sind in der Mehrzahl der Fälle die ankommenden Touren an den Eingangstoren bzw. die abgehenden Fernrelationen an den Ausgangstoren. Es kommen entsprechend der geschilderten Situation als äußere Quellen und Senken aber auch innerbetriebliche Logistikflächen in Frage.

³ Möglich ist auch, die Rangierzeit in die Belegdauer mit ein zurechnen, diese also zu verlängern.

Es ergeben sich die folgenden tour- und relationsbezogenen Regeln, die es bei der Torbelegungsplanung einzuhalten gilt:

	Nahtourbezogene Regeln
NB 1	Beachtung der Fahrpläne: frühest möglicher Andockzeitpunkt und spätest möglicher Abdockzeitpunkt je Nahtour
NB 2	Eine Nahtour darf nur an ein und demselben Tor andocken
NB 3	Eine Nahtour muss an einem Tor andocken
NB 4	Eine Nahtour darf nur am Stück (d.h. ohne Unterbrechung durch andere Touren) an einem der Tore stehen
NB 5	Die komplette Ladung einer Nahtour muss entladen werden
NB 6	LE einer Nahtour können erst nach Andocken der Nahtour umgeschlagen werden
	Fernrelationsbezogene Regeln
NB 7	Beachtung der Fahrpläne: frühest und spätest möglicher Beladezeitpunkt
NB 8	Erhalt der erforderlichen Lademenge je Fernrelation
NB 9	Einhaltung der jeweils geforderten Umschlagmengen zwischen den Nahtouren und den Fernrelationen (Sendungsmix)
NB 10	Eine Fernrelation muss über ein und dasselbe Tor abgewickelt werden
NB 11	Eine Fernrelationen muss über ein Tor abgewickelt werden

Tabelle 4.1: Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil I

Formulierung der Planungsregeln: Tore

Die Tore einer Stückgutanlage werden eingeteilt in reine Eingangstore und reine Ausgangstore. Seltener existieren auch Mischstore, die für beide logistische Funktionen zur Verfügung stehen. Die Zuordnung muss so erfolgen, dass zu entladende Fahrzeuge nur Eingangs- oder Mischstoren und zu beladende Relationen nur Ausgangs- oder Mischstoren zugewiesen werden. Zudem gelten an den Toren maximale Entlade- und Beladekapazitäten, gemessen in Anzahl an Ladeeinheiten je Zeitspanne. Entlädt das Personal beispielsweise mit Handgabelhubwagen und benötigt pro Palette ca. 60 Sekunden, so können in 30 Minuten nur maximal 30 Paletten über ein Tor entladen werden. Gleiches gilt für die Beladeleistung eines Tores. Wird im Rahmen der Torbelegungsplanung entschieden, dass ein Mischtor für den Eingang oder aber den Ausgang genutzt werden soll, so gilt diese Festlegung für die komplette Dauer der Verkehrswelle und kann erst danach wieder umgestellt werden. Eingangsseitig gilt, dass ein Tor nur von einer Tour gleichzeitig belegt werden darf. Für den Ausgangsbereich ist diese Zuordnung für die komplette Verkehrswelle bindend.

Bei der Bestimmung der Torbelegungsplanung müssen diese Vorgaben berücksichtigt werden:

	Torbezogene Regeln
NB 12	Nahtouren dürfen nur an Eingangstoren bzw. Mischstoren andocken
NB 13	Fernrelationen dürfen nur an Misch- bzw. Ausgangstoren andocken
NB 14	Einhaltung der maximalen Entladeleistung je Tor und Zeitspanne
NB 15	Einhaltung der maximalen Beladeleistung je Tor und Zeitspanne
NB 16	Nutzung eines Mischtors entweder als Eingangs- oder als Ausgangstor
NB 17	Bei Nutzung eines Tors durch eine Fernrelationen dürfen keine anderen Fernrelationen hierüber abgewickelt werden
NB 18	Ein Tor kann gleichzeitig nur von einer Tour genutzt werden

Tabelle 4.2: Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil II

Formulierung der Planungsregeln: Prozesse und Ressourcen

Der Hallenmeister teilt das ihm zur Verfügung stehende Personal und die Umschlagmittelressourcen den drei Hauptprozessen zu. Im Gegenzug können pro Zeitspanne den Prozessen maximal so viele Arbeitsaufträge zugewiesen werden, wie die Ressourcen entsprechend ihrer Anzahl und ihrer Leistungseigenschaften (Kapazität und Geschwindigkeit) erarbeiten können. Ähnliches gilt für die vorhandenen Logistikflächen. Im Rahmen der Hauptprozesse werden Entladeflächen, Bereitstellflächen sowie Lager- und Pufferflächen genutzt. Die Flächen dienen als Start- und/oder Zielpunkt von innerbetrieblichen Transportprozessen und verfügen über maximale Kapazitäten, gemessen in Anzahl an Palettenstellplätzen.

Die folgenden Restriktionen müssen für die Prozesse und die Nutzung der daran beteiligten Ressourcen und Flächen bei der Planung beachtet werden:

	Ressourcenbezogene Regeln je Hauptprozess
NB 19	Beachtung der Ressourcenstärke zur Entladung
NB 20	Beachtung der Ressourcenstärke zur innerbetrieblichen Verbringung
NB 21	Beachtung der Ressourcenstärke zur Beladung
	Logistikflächenbezogene Regeln
NB 22	Beachtung der maximalen Kapazitäten der Flächen
NB 23	Nutzung der Flächentypen in dafür vorgesehenen Prozessen (d.h. am Ende eines Entladeprozesses steht eine Entladefläche etc.)

Tabelle 4.3: Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil III

Formulierung der Entscheidungen:

Folgende Entscheidungen sind bei der Torbelegungsplanung im SA zu treffen:

- Von wann bis wann dockt eine Nahtour an welchem Tor an?
- Welchem Tor wird welche Fernrelation zugewiesen?
- Welchen Weg nimmt eine Ladeeinheit durch die Umschlaghalle, d.h. wann fallen welche Transportaufträge (Quell- und Zielorte) an?

Formulierung der Zielsetzungen:

Ein Ziel der Optimierung ist, die Touren und Relationen den Toren derart zuzuordnen, dass unter Einhaltung sämtlicher Regeln die Summe der entstehenden innerbetrieblichen Wege minimiert wird. Die resultierenden Wegstrecken können über die Geschwindigkeit der Umschlagmittel linear in Arbeitsstunden umgerechnet werden. Die Minimierung der Wege führt indirekt zu einer Minimierung des Personals, das die Umschlagmittel führt, und somit zu einer Minimierung der Betriebskosten.

Als zweite Zielsetzung wird eine Minimierung der Wartezeit der ankommenden Touren angestrebt. Hierbei ist die "Wartezeit einer Tour" als die Zeitspanne vom Eintreffen der Tour in der Anlage (Ankunftszeitpunkt laut Fahrplan) bis zum Andocken der Tour an einem der Tore (Entladebeginn) definiert.

4.3 Mathematische Modellierung

Ziel einer mathematischen Modellierung ist die Beschreibung des zulässigen Lösungsraums sowie der Zielsetzung in Form von mathematischen Funktionen, die von vorab definierten Entscheidungsvariablen abhängen. Um die Torbelegungsplanung im SA ebenfalls mit Hilfe dieser mathematischen Algebra beschreiben zu können, werden zunächst Notationen eingeführt. Im Anschluss werden neben den in Kapitel 4.1 getroffenen *logistischen* Systemeinschränkungen zusätzliche *mathematische* Einschränkungen aufgestellt. Die Komplexität des entstehenden Optimierungsmodells soll dadurch möglichst gering gehalten werden, ohne zu starke Vereinfachungen vorzunehmen, die die spätere Qualität der Lösungen für die Praxis beeinträchtigen.

4.3.1 Einführung von Notationen und mathematischen Systemannahmen

Informationen zu den Nahverkehrstouren und Fernrelationen:

Mit $K = \{1, \dots, K'\}$ wird die Menge der Nahverkehrstouren im System angegeben. $K' \in \mathbb{N}$ bezeichnet die dazugehörige Anzahl aller Nahtouren. Für den Fall, dass Sendungen sich bereits auf Lager- oder Pufferflächen in der Umschlaghalle befinden und nicht durch Nahverkehrstouren angeliefert werden, können diese durch die Untermenge K_{lag} als künstliche Nahtouren integriert werden ($K_{lag} \subset K$). Ihr Umschlagprozess startet mit der Aufnahme der LE auf der

entsprechenden Fläche und nicht der Entladung an einem Tor, was in dem später entwickelten Modell abbildbar ist (siehe Aufbau der Knoten- und Kantenmenge in Kapitel 4.3.4). Die Menge der von der Anlage im Sammelgutausgang abgehenden Fernrelationen wird mit $L = \{1, \dots, L'\}$ beschrieben. Die dazugehörige Anzahl ist durch $L' \in \mathbb{N}$ gegeben. Für den Fall, dass internationale Relationen von der betrachteten Stückgutanlage aus bedient werden, können diese als Untermenge L_{int} modelliert werden ($L_{int} \subset L$). Die auf die internationalen Relationen bezogenen Prozesse und Entscheidungen sind strukturell die gleichen wie für nationale Relationen (Auswahl eines Tores und einer Bereitstellfläche, Pufferung und Beladung der Ladeeinheiten). Internationale Relationen werden im Unterschied lediglich nicht zwingend täglich bedient. Weitere potentielle Senken von innerbetrieblichen Transportprozessen sind Lager- oder Pufferflächen. Diese können in einer Untermenge L_{lag} als künstliche Relation integriert werden ($L_{lag} \subset L$). In ihrem Fall endet der Umschlag mit dem Abstellen der LE auf den Flächen, was im später Modell über die Knoten- und Kantenmengen abbildbar ist.

Der *Fahrplan* gibt für eine Nahtour $k \in K$ die erwartete Ankunftszeit auf dem Hof der Anlage sowie den spätesten Abfahrtszeitpunkt vom Gelände an. Für die Fernrelationen $l \in L$ enthält der Fahrplan die gleichen Informationen für deren jeweils erste Tour (= frühester Bereitstellzeitpunkt der Fernrelation) und deren letzte Tour (= spätester Abfahrtszeitpunkt der Relation). Unter Annahme einer durchschnittlichen Fahrt- und Rangierzeit r lassen sich die aus dem Fahrplan gegebene Zeitpunkte der Touren bzw. Relationen in früheste Andockzeitpunkte und späteste Abdockzeitpunkte von den Toren umrechnen. Dass es sich, unabhängig von der Lage des Tores, um die gleiche Zeit r handelt, ist eine vereinfachende Annahme. Die Annahme wirkt sich vor dem Hintergrund, dass das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines optimalen Regelplans für einen repräsentativen Verkehrstag ist, aufgrund des zeitlichen Horizontes nicht zu stark aus.

Ergänzend muss die jeweilige *Lademenge* einer Nahverkehrstour und einer Fernrelation sowie der *Sendungsmix* im System modelliert werden.

Die oben geschilderten Informationen lassen sich wie folgt mathematisch abbilden:

w^k	Anzahl LE, die Nahtour k geladen hat ($w^k \in \mathbb{N}$)
v^l	Anzahl LE, die insgesamt auf die Fernrelation l umgeschlagen werden ($v^l \in \mathbb{N}$)
d_{kl}	Anzahl LE von Nahtour k , die auf Fernrelation l umzuladen sind ($d_{kl} \in \mathbb{N}$)
r	durchschnittliche Rangierzeit vom Pfortner zu einem beliebigen Tor
\bar{a}_k	Ankunftszeitpunkt der Nahtour k auf dem Hof
a_k	frühester Andockzeitpunkt der Nahtour k an einem der Tore ($a_k = \bar{a}_k + r \rightarrow$ Ankunftszeit von k plus durchschnittliche Rangierzeit)
\bar{b}_k	spätester Abfahrtszeitpunkt der Nahtour k vom Hof
b_k	spätest möglicher Abdockzeitpunkt der Nahtour k vom Tor ($b_k = \bar{b}_k - r \rightarrow$ erforderliche Abfahrtszeit minus durchschnittliche Rangierzeit)
\bar{a}_l	frühester Bereitstellzeitpunkt der Fernrelation l
a_l	frühester Beladezeitpunkt der Fernrelation l an einem der Tore ($a_l = \bar{a}_l + r \rightarrow$ Bereitstellzeitpunkt von l plus durchschnittliche Rangierzeit)
\bar{b}_l	spätester Abfahrtszeitpunkt der Relation l vom Hof
b_l	spätester Abdockzeitpunkt der Fernrelation l vom Tor ($b_l = \bar{b}_l - r \rightarrow$ erforderliche Abfahrtszeit minus durchschnittliche Rangierzeit)

Informationen zum Layout der Stückguthalle:

Das Layout der zugrunde liegenden Halle wird in den relevanten Grundzügen erfasst. Es muss in diesem Zusammenhang die Anzahl der Tore sowie deren jeweilige logistische Funktion (Eingang, Ausgang, Multifunktion) gegeben sein. Durch $I = \{1, \dots, I'\}$ wird im Folgenden die Menge der reinen Eingangstore bezeichnet. I' ist die dazugehörige Anzahl. Die Menge der reinen Ausgangstore ist durch $J = \{1, \dots, J'\}$ gegeben. J' stellt die dazugehörige Anzahl dar. Es existieren zusätzlich M' Multifunktionstore. Die entsprechende Menge wird durch $M = \{1, \dots, M'\}$ repräsentiert.

Neben den Toren sind *Logistikflächen* weitere Objekte des Layouts, die für die Hauptprozesse Entladung, Verbringung und Beladung im Umschlag von Relevanz sind. Die Menge der Entladeflächen wird durch $EF = \{1, \dots, EF'\}$ gegeben mit Anzahl EF' . Die Gesamtheit aller Bereitstellflächen wird durch die Menge $BF = \{1, \dots, BF'\}$ beschrieben. BF' stellt die Anzahl aller Bereitstellflächen im System dar. Der typische dreistufige Transportprozess in Stückgutanlagen Entladung - Verbringung - Beladung, dessen Quellen und Senken Tore oder Entlade- bzw. Bereitstellflächen sind, ist somit abbildbar. Sollen zusätzliche Lager- und Pufferflächen als Quellen oder Senken in Betracht kommen, so können diese ähnlich wie im oben geschilderten Fall der Nahverkehrstouren und Relationen als Untermenge künstlicher Entlade- bzw. Bereitstellflächen in die Menge EF bzw. BF integriert werden. Logistikflächen verfügen über maximale Kapazitäten, gemessen in LE, die sie fassen können.

Die *Entfernungen* zwischen den Layoutobjekten einer Halle, die als Start- oder Endorte von innerbetrieblichen Transportprozessen in Frage kommen, wird über die Längen der Verkehrswege für die Umschlagmittel in der Halle erfasst.

Die oben beschriebenen Informationen lassen sich wie folgt modellieren:

d_{ij}	Entfernung (in [km]) zwischen Ort i ($i \in I \cup M \cup EF \cup BF$) und Ort j ($j \in EF \cup BF \cup M \cup J$)
EF_s^{cap}	Anzahl LE, die auf Entladefläche EF_s ($s = 1, \dots, EF'$) maximal zugelassen sind
BF_t^{cap}	Anzahl LE, die auf Bereitstellfläche BF_t ($t = 1, \dots, BF'$) maximal zugelassen sind

Informationen zu den Umschlagmitteln bzw. den Ressourcen in der Halle:

Es werden Ressourcen für die drei Hauptprozesse Entladung, Verbringung und Beladung modelliert. Diese können sich in der Anzahl, der Geschwindigkeit und den Einsatzkosten unterscheiden. Der Standardladungsträger im Stückgutumschlag ist die Palette. Von diesen kann von den aufgeführten Umschlagmitteln zeitgleich nur eine transportiert werden. Die Kapazität liegt daher für alle Umschlagmittel bei einer LE. Es wird angenommen, dass die Entladung einer LE von einem Fahrzeug bis zur Rampe bzw. die Beladung einer LE von der Rampe in das Fahrzeug hinein eine durchschnittliche Zeitspanne von e bzw. b Minuten erfordert. Der Transport von der Rampe bis zur Entladefläche bzw. von der Bereitstellfläche bis zur Rampe wird hingegen in Abhängigkeit des jeweils eingesetzten Transportmittels und der Entfernung im Rahmen des Entlade- bzw. des Beladeprozesses erfasst.

Die Informationen zu den Ressourcen lassen sich wie folgt modellieren:

Entladung:

r_{ent}	Anzahl der Umschlagmittel für die Entladung ($r_{ent} \in \mathbb{N}$)
g_{ent}	Durchschnittsgeschwindigkeit in Kilometern pro Stunde ($g_{ent} \in \mathbb{R}_+$)
c_{ent}	Kosten in Euro pro Stunde ($c_{ent} \in \mathbb{R}_+$)
e	Entladedauer gemessen in Minuten pro LE ($e \in \mathbb{R}_+$)

Verbringung:

r_{ver}	Anzahl der Umschlagmittel für die Verbringung ($r_{ver} \in \mathbb{N}$)
g_{ver}	Durchschnittsgeschwindigkeit in Kilometern pro Stunde ($g_{ver} \in \mathbb{R}_+$)
c_{ver}	Kosten in Euro pro Stunde ($c_{ver} \in \mathbb{R}_+$)

Beladung:

r_{bel}	Anzahl der Umschlagmittel für die Beladung ($r_{bel} \in \mathbb{N}$)
g_{bel}	Durchschnittsgeschwindigkeit in Kilometern pro Stunde ($g_{bel} \in \mathbb{R}_+$)
c_{bel}	Kosten in Euro pro Stunde ($c_{bel} \in \mathbb{R}_+$)
b	Beladedauer gemessen in Minuten pro LE ($b \in \mathbb{R}_+$)

Aus logistischer Sicht ist eine Tourenplanung, d.h. die konkrete Zuordnung der innerbetrieblichen Transportaufträge zu einzelnen Umschlagmitteln, in Stückgutanlagen nicht sinnvoll. Entsprechend Kapitel 4.1 wird in der vorliegenden Arbeit vielmehr der Fluss von Sendungen durch die Halle betrachtet. Als Folge hieraus können für die drei Hauptprozesse unterschiedliche Typen von Umschlagmitteln mit deren Geschwindigkeiten modelliert werden. Innerhalb eines Hauptprozesses steht allerdings nur eine homogene Flotte zur Verfügung. Andernfalls müsste auch eine Zuordnung von Transportaufträgen zu Fahrzeugen und von Fahrzeugen zu Wegen und somit eine Tourenplanung vorgenommen werden.

4.3.2 Einführung diskreter Zeitscheiben

Bei der Torbelegungsplanung muss entschieden u.a. werden, wann die Andockphase eines Fahrzeugs an einem bestimmten Tor beginnt und endet und wann innerbetriebliche Ressourcen beansprucht werden. Eine der zu betrachtenden Entscheidungsebenen im mathematischen Modell ist somit die Komponente *Zeit*. Eine minutengenaue Betrachtung der Zeit führt zu einer zu hohen Komplexität des Entscheidungsmodells. Zusätzlich ist eine minutengenaue Betrachtung zumindest für die innerbetrieblichen Prozesse sowie auch für die Beladung der Fernrelationen, deren Fahrplan üblicherweise im 15 Minuten Takt gesteuert wird, nicht notwendig. In der Mathematik wird anstelle einer minutengenaue Betrachtung häufig mit diskreten Zeitscheiben gearbeitet. Eine Diskretisierung der kontinuierlichen Entscheidungsebene Zeit wird erreicht, indem einzelne Zeitscheiben (= ZS) eingeführt werden. Diese umfassen mindestens mehrere

Minuten und unterteilen den Optimierungszeitraum in äquidistante Zeitintervalle. Anstatt einzelne Zeitpunkte zu betrachten, werden punktgenaue Ereignisse (Andocken, Abdocken etc.) eindeutig einer Zeitscheibe zugeordnet. Zu treffende Entscheidungen werden nur auf die betrachteten Zeitscheiben bezogen gefällt. Dieses Konzept wird aus den genannten Gründen auf das hier vorliegende Problem angewandt.

Der Sammelgutausgang startet je Anlage zu einem bestimmten Zeitpunkt (z.B. 12 Uhr) und endet ebenso zu einem definierten Zeitpunkt (z.B. 20 Uhr). Für die mathematische Optimierung werden die Zeitpunkte einer Verkehrswelle möglichst eng gewählt, um nicht unnötig die Komplexität der Planungsaufgabe, d.h. den Lösungsraum, zu erhöhen. Ein möglicher Startzeitpunkt im Optimierungsmodell kann daher z.B. durch das Eintreffen des ersten Nahverkehrsfahrzeuges definiert sein. Als Endzeitpunkt für den Optimierungszeitraum bietet sich der spätest mögliche Abdockzeitpunkt über alle Relationen des Fernverkehrs an. Der Startzeitpunkt "0" bezeichnet den aus dem realen Start der Verkehrswelle SA transferierten Beginn des Optimierungszeitraums im mathematischen Modell (z.B. "0" = 14:00). Das transferierte Ende ist im Modell durch Z gegeben (z.B. $Z = 19:00$). Die Länge T_L (in Minuten) des Optimierungszeitraums ergibt sich aus der Differenz der beiden Zeitpunkte Z und 0. Ausgehend von einer Zeitscheibenlänge von q Minuten, führt dies zu $T' = \lfloor \frac{T_L}{q} \rfloor$ gleich langen Zeitscheiben, die den Optimierungszeitraum zerteilen. Die Menge der ZS ist durch $T = \{1, \dots, T'\}$ gegeben. Zusätzlich wird eine Funktion d benötigt, die die Zeitpunkte von Aktionen und Entscheidungen in die Zeitscheiben abbildet: $d: [0; Z] \rightarrow T$. Dabei sind die Zeitscheiben $t \in T$ halboffene Intervalle $[t_a, t_e)$. Liegt z.B. der Ankunftszeitpunkt a^k der Nahtour k in der fünften Zeitscheibe, so gilt: $d(a^k) = t_5$.

Die Anzahl der Zeitscheiben T' steuert die Komplexität des Optimierungsproblems bzw. die Größe des Lösungsraums und wird durch die Länge q bestimmt. Jede der im Folgenden definierten Entscheidungsvariablen wird durch die Einführung der Zeitscheiben T' -fach kopiert, um nachzuhalten, wann eine Zuordnung oder ein Fluss statt findet. Je breiter eine Zeitscheibe ist, desto weniger Zeitscheiben ergeben sich für den Optimierungszeitraum, zeitgleich geht der Detaillierungsgrad der Optimierung verloren. Es gilt, mit einer sinnvollen Einstellung der Zeitscheibenlänge q weder die Komplexität unnötig zu erhöhen, noch die Ergebnisse der Optimierung zu stark zu beeinflussen.

Strategische und mittelfristige Entscheidungen der Torbelegungsplanung, wie etwa die Anzahl und Lage von Eingangstoren oder aber die Belegung der Ausgangstore durch Relationen, werden nicht täglich getroffen. Dennoch ist die Bewertung einer Lösung über die resultierenden Wartezeiten und vor allem die innerbetrieblichen Aufwände eine Größe der täglichen Disposition (= Betriebskosten). Der Optimierungszeitraum im Modell wird daher als ein repräsentativer Verkehrstag in der Stückgutanlage modelliert. Es ist hierfür notwendig, die vergangenheitsbezogenen Daten so aufzubereiten, dass ein entsprechender *Modelltag* realitätsnah beschrieben werden kann. Hierauf sowie auf die zu erfassenden Daten und deren Quellen wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Wird das Modell lediglich dafür genutzt, die operative Zuordnung der ankommenden Touren zu den Eingangstoren im Rahmen eines Tages als Regelplan optimal vorzunehmen, so können die an dem jeweiligen Tag vorliegenden Daten, wie etwa Lademenge und Fahrpläne, ohne weitere Aggregation eingelesen werden. Erforderlich ist allerdings, dass die mittelfristigen und strategischen Entscheidungen vorab fixiert wurden.

4.3.3 Vorüberlegungen zum Modelltyp und den Entscheidungsvariablen

Aus mathematischer Sicht bieten sich verschiedene Möglichkeiten, die bei der Torbelegungsplanung zu treffenden Entscheidungen zu modellieren. Es werden im Folgenden verschiedene Varianten untersucht und die am besten geeignete ausgewählt.

Variante 1: Anlehnung an Scheduling- oder Maschinenbelegungsprobleme

Allgemeine Maschinenbelegungsprobleme oder auch Schedulingprobleme beschäftigen sich mit der Einplanung von Jobs oder Aufträgen auf vorhandenen Maschinen. Hierbei muss neben der Zuweisung einer Maschine zu einem Job zusätzlich der Start- und Endzeitpunkt seiner Bearbeitung auf der ausgewählten Maschine festgelegt werden. Verschiedene Varianten der Planungsprobleme sind möglich. So können frühest mögliche Anfangstermine und späteste Fälligkeitstermine für die Bearbeitung integriert, Jobs als unterbrechbar oder nicht unterbrechbar definiert und die Kosten oder aber die Dauer einzelner Jobs minimiert werden⁴.

Wird die Torbelegungsplanung als reine Zuweisung von Touren zu Eingangstoren und von Relationen zu Ausgangstoren aufgefasst, so liegt die Vermutung nahe, dass hier eine Analogie zur Maschinenbelegungsplanung vorliegt. In diesem Fall entsprechen die Maschinen den Toren und die Jobs den Touren / Relationen, wie in folgender Abbildung dargestellt:

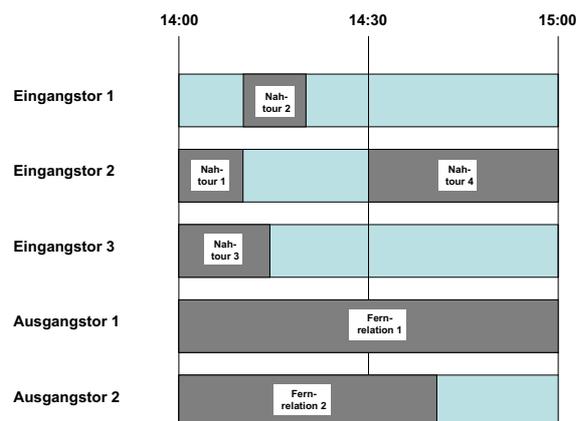


Abbildung 4.1: Formulierung in Anlehnung an Maschinenbelegungsprobleme

Das abgebildete Beispiel umfasst vier Nahtouren, die im Optimierungszeitraum von 14:00 Uhr bis 15:00 Uhr den Eingangstoren 1 - 3 zugewiesen werden. Parallel stehen zwei Fernrelationen zur Aufnahme der Sendungen bereit. Die Optimierung der Situation mittels eines Maschinenbelegungsmodells ermöglicht eine überschneidungsfreie Zuweisung der Touren und Relationen zu Toren und Zeitspannen der Bearbeitung. Ein Fahrplan kann über früheste und späteste Bearbeitungszeitpunkte der Jobs integriert werden.

Eine Modellierung als Maschinenbelegungsproblem führt dazu, dass das innerbetriebliche System als "Black Box" interpretiert und behandelt wird. So bleibt durch obige Formulierung die Nutzung der innerbetrieblichen Ressourcen und Flächen und der Fluss der Ladeeinheiten durch

⁴ vgl. Brucker und Knust ([12]), 2005

die Umschlaghalle unberücksichtigt. Des Weiteren kann durch die Formulierung nicht garantiert werden, dass Sendungen rechtzeitig entladen werden, damit sie früher abgehende Fernrelationen noch erreichen (Bsp.: Nahtour 4 und Fernrelation 2). Aufgrund dieser Zusammenhänge wird von einer Modellierung in Anlehnung an Scheduling- bzw. Maschinenbelegungsprobleme abgesehen, da sie für die Torbelegungsplanung, wie sie in der vorliegenden Arbeit definiert wird, nicht ausreichend ist.

Variante 2: Anlehnung an quadratische Zuordnungsprobleme

Bermúdez modelliert das Torbelegungsproblem als Quadratisches Zuordnungsproblem (Quadratic Assignment Problem = QAP) (siehe Literatur ([11]) in Kapitel 3.2). Dabei trifft er zwei Annahmen für das zu modellierende System. Zum einen betrachtet er nur einen direkten Transport zwischen den Toren ohne Nutzung von Logistikflächen. Zum anderen darf je Eingangstor bzw. Ausgangstor nur maximal eine Tour bzw. Relation zugewiesen werden. Unter diesen Annahmen ist die Modellierung als rein quadratisches Zuordnungsproblem zulässig, wie dem Beispiel in folgender Abbildung zu entnehmen ist:

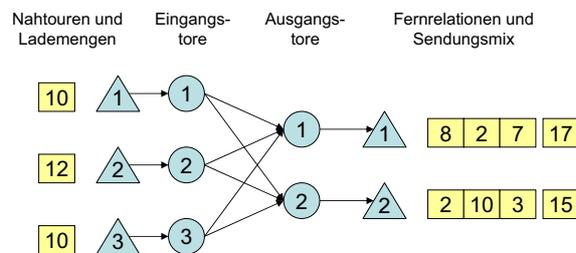


Abbildung 4.2: Formulierung in Anlehnung an quadratische Zuordnungsprobleme

In diesem Beispielsystem existieren drei Nahtouren und zwei Fernrelationen. Die Lademengen (Angebot und Nachfrage) der Touren und Relationen stehen links bzw. rechts neben den die Touren und Relationen darstellenden Dreiecke. Durch die parallele Zuordnung einzelner Nahtouren und Fernrelationen zu Toren (quadratische Zuordnungsentscheidung) gibt es keine Möglichkeit der Verwechslung von LE. Beim Beladen einer Fernrelationen ist eindeutig geklärt, welche Herkunft (Nahtour) eine bestimmte Ladeeinheit hat. Der vorgegebene Sendungsmix d_{kl} kann für alle Fernrelationen und alle Nahtouren überprüft und eingehalten werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel formuliert, innerbetriebliche Logistikflächen sowie den Zeitaspekt der Prozesse in die Modellierung zu integrieren. Das erfordert, dass die innerbetrieblichen Prozesse und die daran beteiligten Orte und Ressourcen detaillierter abgebildet werden, als dies bei Bermúdez der Fall ist. Zudem soll erlaubt sein, eingangsseitig einem Tor mehr als eine Tour am Verkehrstag zuzuweisen. Unter dieser Prämisse ist eine rein quadratische Formulierung nicht mehr ausreichend. Eine Möglichkeit, die Elemente zu integrieren besteht, indem anstelle eines quadratischen Zuordnungsmodells mit einem graphentheoretischen Ansatz gearbeitet wird.

Variante 3: Anlehnung an Flussprobleme

Bei der Erweiterung der klassischen QAP-Formulierung zu einem graphentheoretischen Ansatz, werden zusätzliche Knoten in das Netzwerk integriert, die die innerbetrieblichen Logistikflächen

repräsentieren. Auf diesen Flächen werden Sendungen unterschiedlicher Nahtouren gesammelt und wieder verteilt. Für die Flüsse im Netzwerk bedeutet dies, dass mehrere Kanten in einen Knoten hineingehen und ebenso mehrere Kanten hinausführen. Folgende Abbildung dient zur Visualisierung der Idee:

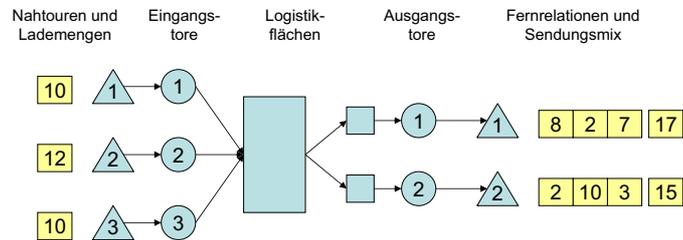


Abbildung 4.3: Formulierung in Anlehnung an graphentheoretische Flussprobleme

Erneut existieren drei Nahtouren, zwei Fernrelationen und fünf Tore im System. Es werden eine gemeinsam genutzte Entladefläche und zwei Bereitstellflächen integriert. Die Information, um welchen "Typ", d.h. Nahtour, es sich beim Weitertransport einer bestimmten Ladeinheit jeweils handelt, geht in den die Flächen darstellenden Knoten verloren. In Summe kann die Anzahl der von einer Fernrelation geforderten Ladeeinheiten eingehalten werden, eine Unterscheidung der jeweiligen Herkunft der Ladeeinheiten ist aber nicht möglich. Ebenso ist die Überprüfung des zeitlich korrekten Flusses der LE durch die Umschlaghalle nicht gegeben.

Zur Kontrolle der Einhaltung des Sendungsmixes ist für jede Kante, über die Mengen fließen, nachzuhalten, um welche Nahtour es sich handelt. Der graphentheoretische Ansatz wird zu einer Mehrgüterflussformulierung erweitert. Hierdurch steigt die Komplexität der Entscheidungssituation und die Anzahl der Entscheidungsvariablen. Dennoch ist der Schritt vor dem Hintergrund einer umfassenden und praxisnahen Modellierung der Optimierungsaufgabe notwendig.

4.3.4 Zeitdiskrete Mehrgüterflussformulierung mit Nebenbedingungen

Aufgrund der Ausführungen im letzten Kapitel wird zur Modellierung der Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung im SA eine Mehrgüterflussformulierung⁵ herangezogen. Im Folgenden wird zunächst erläutert, wie das zugrunde liegende Netzwerk zur Darstellung der Entscheidungssituation aufgebaut wird. Basierend auf dem erstellten Netzwerk werden im Anschluss die Entscheidungsvariablen, die zusätzlich erforderlichen Nebenbedingungsfunktionen sowie die Zielfunktion entwickelt.

Netzwerkaufbau:

Zur Verdeutlichung des Vorgehens beim Netzwerkaufbau werden die wesentlichen Schritte (Definition der Knotenmenge V und Definition der Kantenmenge A) anhand eines übersichtlichen Beispielszenarios erklärt. Der Optimierungszeitraum des Szenarios wird in zwei Zeitscheiben geteilt. Innerhalb dieser müssen zwei Nahtouren und zwei Fernrelationen abgefertigt werden.

⁵ vgl. Ahuja ([1]), 1993, S. 649-650

Hierfür stehen zwei Eingangstore, ein Mischtor und ein Ausgangstor zur Verfügung:

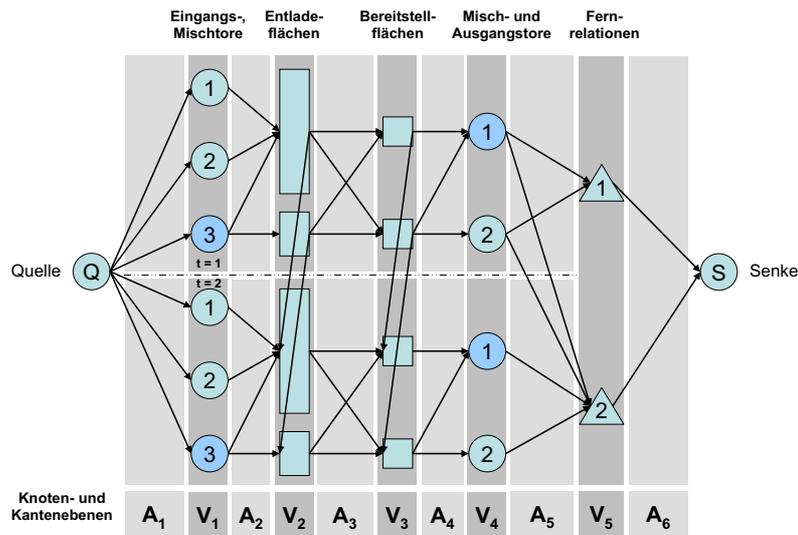


Abbildung 4.4: Entwicklung eines Netzwerks zur Torbelegungsplanung

Definition der Knotenmenge:

Die K' Nahtouren werden als "Güter" aufgefasst, die in einer imaginären *Quelle* Q mit bestimmten Angeboten auftreten.

Die *erste Knotenebene* V_1 stellt die in der Anlage vorhandenen Eingang- und Mischstore $I \cup M$ dar, über die die Güter k in die Halle "hineinfließen" können. Für jede der Zeitscheiben $t \in T$ findet eine Duplikation dieser Knoten statt. Auf diese Art wird der Zeitaspekt der Entscheidung, d.h. wann die Entladung einer LE an einem der Tore durchgeführt wird, berücksichtigt. Eine Duplikation der Knoten je Zeitscheibe erfolgt auch für die folgenden drei Knotenmengen. Hierdurch kann analog der zeitliche Aspekt bei den Transportentscheidungen bzw. Beladeprozessen mit abgebildet werden.

Erstes Ziel nach Aufnahme der Sendungen durch die Entladeressourcen im Fahrzeug am Tor sind i.d.R. Entladeflächen (*zweite Knotenebene* V_2). In der Praxis sind die Tore häufig schon eindeutig den Entladeflächen zugeordnet. D.h. eine an einem Tor i entladene Sendung wird anschließend genau auf eine Entladefläche $EF_s \in EF$ gestellt. Da dies aber nicht zwingend der Fall ist, soll durch das Modell grundsätzlich eine Transportentscheidung ermöglicht werden. Dies ist in obiger Abbildung dadurch angedeutet, dass Tor 3 mit allen existenten Entladeflächen verbunden ist. Im realen Einzelfall müssen einschränkende Annahmen oder bereits feste Zuordnungen, die durch den Betriebsverantwortlichen getroffen wurden, beim Aufbau der Kanten integriert werden.

Die *dritte Knotenebene* V_3 repräsentiert die Bereitstellflächen. Es besteht eine Vollverknüpfung zwischen allen Entladeflächen und Bereitstellflächen, damit die Ladeeinheiten einer Nahtour alle existenten Fernrelationen des Stückgutnetzes erreichen können.

Die *Knoten der vierten Ebene* V_4 stellen die für die Beladung der Fernrelationen zulässigen Misch- und Ausgangstore $M \cup J$ dar. Auch hier gilt, dass i.d.R. jede Bereitstellfläche genau

einem Tor zugeordnet ist, es existieren eindeutige Kanten. In der Praxis ist es aber üblich, dass bei Platzmangel Sendungen zusätzlich an anderer Stelle bereit gestellt werden dürfen. In diesem Fall sollen im Modell erneut Transportentscheidungen getroffen werden, was exemplarisch durch die Verbindung der zweiten Bereitstellfläche mit beiden Toren angedeutet ist.

Die *Knoten der letzten Ebene* V_5 sind die Fernrelationen im System. Diese sind über Kanten mit allen Toren in einer ZS der vorgelagerten Knotenebene verbunden, falls die jeweilige Zeitscheibe für eine Beladung zulässig ist. Die erste Fernrelation im obigen Szenario muss beispielsweise das Gelände laut Fahrplan früher verlassen und darf folglich in der letzten Zeitscheibe keine Güter mehr erhalten. Die entsprechenden Knoten der zweiten ZS aus V_4 sind nicht durch Kanten mit dem die Fernrelation darstellenden Knoten der Menge V_5 verbunden. Eine Unterteilung der Knoten zur Repräsentation der Fernrelationen nach Zeitscheiben ist nicht notwendig. Das Netzwerk schließt mit einer *Senke* S .

Zur Übersicht werden die einzelnen Knotenebenen nochmals in einer Tabelle dargestellt:

Knotenmenge	Abbild	Anzahl
Q	Quelle	1
V_1	Eingangs- und Mischstore je Zeitscheibe	$T' * (I' + M')$
V_2	Entladeflächen je Zeitscheibe	$T' * EF'$
V_3	Bereitstellflächen je Zeitscheibe	$T' * BF'$
V_4	Misch- und Ausgangstore je Zeitscheibe	$T' * (M' + J')$
V_5	Fernrelationen	L'
S	Senke	1

Tabelle 4.4: Aufbau der Knotenmenge für das Netzwerk zur Torbelegungsplanung

Die Menge aller Knoten im Netzwerk ist durch $V = Q \cup \left(\bigcup_{i=1}^5 V_i \right) \cup S$ gegeben und die Anzahl aller Knoten durch $V' = |V|$.

Definition der Kantenmenge:

Zwischen den Knoten der einzelnen Ebenen befinden sich gerichtete Kanten. Der Fluss der Güter k ist hierbei von der Quelle zur Senke, d.h. von links nach rechts gerichtet. Die Kanten lassen sich ähnlich wie die Knoten in verschiedene Ebenen einteilen und sind hierdurch einzeln adressierbar. Das erleichtert die spätere Zuordnung der Transporte zu den Hauptprozessen. Des Weiteren wird jede Kante arc_i durch minimale Kapazitäten (arc_i^{capmin}), maximale Kapazitäten (arc_i^{capmax}) und eine Länge in [km] von arc_i^{laenge} , die auch Null betragen kann, beschrieben.

Die *erste Kantenmenge* A_1 besteht aus den Verbindungen des Quellknotens mit jedem Knoten der ersten Knotenmenge V_1 , d.h. mit jedem Ausgangs- bzw. Mischtor in den Zeitscheiben des Systems. Die Kantenebene ist wie folgt aufgebaut:

$$A_1 = \bigcup_{t=1}^{T'} A_{1t} = \bigcup_{t=1}^{T'} \bigcup_{j=1}^{I'+M'} A_{1t}^j.$$

Die Untermenge A_{1t} bezeichnet alle Kanten, die vom Quellknoten Q zu denjenigen Knoten aus V_1 gehen, die Tore in der t -ten Zeitscheibe repräsentieren. Die einzelnen Tore sind über den Ausdruck A_{1t}^j mit $j \in I \cup M$ adressierbar. Durch eine vorab festgelegte Nummerierung der Tore können somit Prozesse an den einzelnen Toren identifiziert werden. Alle Kanten der ersten Kantenebene verfügen über eine maximale Kapazität, die der maximalen Entladeleistung je Tor und Zeitscheibe entspricht. Diese wird in Anzahl an LE gemessen und errechnet sich durch Division der Zeitscheibenlänge q [min] durch die Entladedauer e in [min/LE] mit anschließender Abrundung auf die nächste ganze Zahl ($\lceil q/e \rceil$ ⁶). Als minimale Kapazität erhalten die Kanten dieser Menge die Null. Die Länge der Kanten ist grundsätzlich gleich Null, da die Kanten keine innerbetrieblichen Umschlagressourcen beanspruchen, sondern Zuordnungsentscheidungen der Touren zu Toren und Zeitscheiben repräsentieren. Für den Fall, dass bestimmte Tore unerwünscht sind, lassen sich für arc_i^{laenge} hohe Werte festlegen, damit diese Lösungen nicht ausgewählt werden.

Die *zweite Kantenmenge* A_2 enthält alle gültigen Transportverbindungen zwischen einem Eingangs- oder Mischtor und einer Entladefläche, dupliziert für jede der Zeitscheiben. $ent(arc)$ wird die Anzahl aller Transportverbindungen zwischen den Toren und den Entladeflächen in einer ZS bezeichnet. Diese Zahl ist problemspezifisch. Im günstigsten Fall gibt es eindeutige Zuordnungen zwischen einem Tor und einer Entladefläche ($ent(arc) = I' + M'$) und im ungünstigsten Fall besteht eine Vollverknüpfung ($ent(arc) = (I' + M') * EF'$). Die Länge der Kanten entspricht der real gemessenen Entfernung vom jeweiligen Tor zu den Entladeflächen. Die minimalen bzw. maximalen Kapazitäten der Kanten betragen Null bzw. $\lceil q/e \rceil$. Der Aufbau der Menge A_2 ist wie folgt:

$$A_2 = \bigcup_{t=1}^{T'} A_{2t} = \bigcup_{t=1}^{T'} \bigcup_{j=1}^{I'+M'} A_{2t}^j.$$

Dabei bezeichnet A_{2t} die Menge aller Verbindungen zwischen den Toren und den Entladeflächen in ZS t mit der Anzahl $ent(arc)$ und A_{2t}^j die Menge aller Transportverbindungen von Tor j zu Entladeflächen in ZS t . Die Anzahl dieser Kanten ist durch $ent^j(arc)$ gegeben und ist im Gegensatz zu A_{1t}^j nicht notwendigerweise eine einelementige Menge.

Die *dritte Kantenmenge* A_3 besteht aus den Verbindungen zwischen den Entladeflächen und den Bereitstellflächen im System. Da die Sendungen jeder Nahtour alle Fernrelationen erreichen sollen, besteht eine Vollverknüpfung zwischen den Knoten der zweiten und der dritten Ebene. Die maximale Kapazität der Verbindungskanten kann auf einen sinnvollen Wert akt gesetzt werden, um den maximalen Verkehr je Verkehrsweg und Zeitscheibe in der Halle zu begrenzen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass LE auf einer Fläche über die Dauer einer Zeitscheibe hinaus stehen bleiben und nicht in der gleichen Zeitscheibe weiter transportiert werden. So können beispielsweise zunächst verstärkt Fahrzeuge entladen oder die Ladeeinheiten innerbetrieblich verbraucht werden. Die Beladung erfolgt aber erst in einer späteren ZS. Zu diesem Zweck existieren zusätzlich Kanten von jeder Entladefläche zu ihrem Duplikat in der nächsten Zeitscheibe. Die Entladeflächen verfügen über Kapazitäten, d.h. eine maximale Anzahl an LE, die auf ihr gleichzeitig stehen können. Anders als bei den Toren ist diese Kapazität nicht *kumulativ*. Über ein Tor können je ZS nicht mehr als eine bestimmte maximale Obermenge an

⁶ Der Ausdruck $\lceil \cdot \rceil$ bezeichnet die Gaußklammer.

LE umgeschlagen werden. Auf einer Fläche können allerdings *zeitgleich* nicht mehr als z.B. 10 LE stehen. D.h. es muss erlaubt sein, dass am Anfang einer ZS bereits 5 LE dort stehen, im Verlaufe der ZS 10 LE hinzukommen und gleichzeitig 7 weiter transportiert werden. Dann sind am Ende nur 8 LE vorhanden. Eine Modellierung über maximale Kantenkapazitäten lässt diesen Fall nicht zu und ist damit nicht geeignet. Daher wird nur für diejenigen Kanten, die das Verbleiben auf einer Fläche bis zur nächsten ZS symbolisieren, eine maximale Kapazität für die Logistikfläche von EF_s^{cap} gesetzt. Der für die Einhaltung der Flächenkapazitäten notwendige "Weitertransport je ZS" wird später über eine zusätzliche Nebenbedingung geregelt. Die minimale Kapazität sowie die Länge für eine der Rückführungskanten zur gleichen Entladefläche in der nächsten Zeitscheibe beträgt Null. Die Länge der verbleibenden Kanten entspricht der tatsächlichen Entfernung zwischen den Entlade- und den Bereitstellflächen in der Halle. Der Aufbau der Menge A_3 ist wie folgt:

$$A_3 = \bigcup_{t=1}^{T'} A_{3t} = \bigcup_{t=1}^{T'} \bigcup_{i=1}^{EF'} A_{3t}^i.$$

Dabei bezeichnet A_{3t}^i die Menge aller Transportverbindungen von Entladefläche i zu allen Bereitstellflächen in ZS t und zu dem Duplikat von EF_i in der darauf folgenden ZS. Die Anzahl an Kanten in der Menge A_{3t} ist aufgrund der Vollverknüpfung durch die Anzahl an Bereitstellflächen im System gegeben. Die Kante zur gleichen Fläche in einer folgenden ZS entfällt für die letzte ZS T' .

Die *vierte Kantenmenge* A_4 umfasst alle Kanten zwischen den Bereitstellflächen und den Ausgangstoren. Ähnlich wie bei der Menge A_2 ist die Anzahl der Kanten problemspezifisch und durch $bel(arc)$ gegeben. Auch die Definition der Kantenkapazitäten und -längen sowie der Aufbau der Menge A_4 ist äquivalent zu A_2 :

$$A_4 = \bigcup_{t=1}^{T'} A_{4t} = \bigcup_{t=1}^{T'} \bigcup_{i=1}^{BF'} A_{4t}^i.$$

Dabei bezeichnet A_{4t}^i die Menge aller Transportverbindungen von Bereitstellfläche i zu Ausgangs- bzw. Mischstoren in ZS t , deren Anzahl durch $bel^i(arc)$ gegeben ist. Um Fehlverladungen zu vermeiden besteht üblicherweise eine eindeutige Zuordnung (d.h. $bel^i(arc) = 1$). Die letzte Kante der Menge A_{4t}^i ist erneut die Rückführungskante für stehen gebliebene LE zur gleichen Bereitstellfläche in der nächsten ZS und entfällt für die letzte ZS T' . Die Regelung maximaler Belademengen je Zeitscheibe und Tor muss später über Nebenbedingungen gesteuert werden. Maximale Kantenkapazitäten reichen hier erneut nicht aus, da mehrere Kanten existieren, die in einen Knoten einmünden und abgehen.

Die *fünfte Kantenmenge* A_5 stellt alle Verbindungen zwischen den Ausgangs- und Mischstoren und den Fernrelationen dar. Muss eine Fernrelation laut Fahrplan das Gelände in der ZS t' verlassen, so ist der entsprechende Knoten der Relation aus der Knotenmenge V_5 nicht mehr über Kanten mit Knoten der Ebene V_4 verbunden, die Tore in späteren ZS darstellen. Die Menge ist wie folgt aufgebaut:

$$A_5 = \bigcup_{l=1}^{L'} A_{5l} = \bigcup_{l=1}^{L'} \bigcup_{j=1}^{M'+J'} A_{5l}^j = \bigcup_{l=1}^{L'} \bigcup_{j=1}^{M'+J'} \{^{t-} A_{5l}^j, \dots, ^{t+} A_{5l}^j\}.$$

Dabei bezeichnet $t^- A_{5l}^j$ die Kante in der frühest möglichen Zeitscheibe (d.h. $t^- = d(a^l)$) vom Tor j zur Fernrelation l und $t^+ A_{5l}^j$ die Kante in der spätest möglichen Zeitscheibe (d.h. $t^+ = d(b^l)$) für eine Beladung von l . Die Untermenge A_{5l} stellt die Menge aller Kanten zur Fernrelation l dar. Die maximale Kapazität einer Kante aus A_5 ist gleich der Beladeleistung je Tor ($[q/b]$). Die minimale Kapazität und Länge der Kanten sind gleich Null. Letzteres liegt erneut darin begründet, dass es sich hier um eine Zuordnungsentscheidung nicht aber um einen realen Transport handelt.

Die *sechste Kantenmenge* A_6 verbindet die Fernrelationen mit der Senke S im System. Die maximale und minimale Kapazität ist demnach gleich der Lademenge v^l der jeweiligen Fernrelation. Die Länge der Kanten beträgt Null.

Zur Übersicht werden die einzelnen Kantenmengen mit ihren Eigenschaften in einer Tabelle dargestellt:

Kantenmenge	Anzahl	$arc_i^{cap_{min}}$	$arc_i^{cap_{max}}$	arc_i^{laenge}
A_1	$T' * (I' + M')$	0	$[q/e]$	0
A_2	$T' * ent(arc)$	0	$[q/e]$	d_{ij}
A_3	$T' * EF' * BF' + (T' - 1) * EF'$	0	$akt \dot{\vee} EF_s^{cap}$	$d_{ij} \dot{\vee} 0$
A_4	$T' * bel(arc) + (T' - 1) * BF'$	0	$[q/b] \dot{\vee} BF_t^{cap}$	$d_{ij} \dot{\vee} 0$
A_5	$\sum_{l=1}^{L'} * A_{5l} $	0	$[q/b]$	0
A_6	L'	v^l	v^l	0

Tabelle 4.5: Aufbau der Kantenmenge für das Netzwerk zur Torbelegungsplanung

Es gilt, dass die Menge aller Kanten im Netzwerk durch $A = \bigcup_{i=1}^6 A_i$ und die Anzahl aller Kanten durch $A' = |A|$ gegeben ist. Basierend auf dem definierten Netzwerk $N = (V, A, c)$ zur Torbelegungsplanung mit Knotenmenge V , Kantenmenge A und Kostenfunktion $c : A \rightarrow \mathbb{R}^+$ mit $c(arc_i) = arc_i^{laenge}$ können weitere Anforderungen der Torbelegungsplanung abgebildet werden.

Nachtrag zu der Kantenmenge A:

Die Kantenmenge A_1 bildet die Zuordnungsentscheidungen "Tour an Tor" und "Tour zu Zeitscheibe" ab. Die Mengen $A_2 - A_4$ stellen die Entlade-, Verbringungs- und Beladeprozesse dar und die Menge A_5 repräsentiert die Zuordnungsentscheidungen "Fernrelation an Tor" sowie zeitliche Belegung. Grundsätzlich ist es möglich, neben dem hier vorgestellten Netzwerkaufbau, der sich an dem klassischen Transportmuster Entladung \rightarrow Verbringung \rightarrow Beladung orientiert, auch andere der in Abbildung 2.8 aufgeführten Ketten innerbetrieblicher Transportprozesse abzubilden oder gar Mischformen zu integrieren. Entfällt in einer speziellen Anlage z.B. die Pufferung auf Entladeflächen komplett, so können die Knoten der zweiten Ebene mit denen der ersten gleichgesetzt oder aber einfach weggelassen werden. In letzterem Fall müssen die Kantenmengen in den folgenden Abschnitten unnummeriert werden. Soll andernfalls das Durchladen erlaubt sein, d.h. die Fernrelationen werden durch direkten Transport ohne Zwischenpufferung beladen, so lässt sich dies durch Einfügen spezieller Kanten zwischen den Knotenmengen V_1

und V_4 abbilden. Dabei muss beachtet werden, dass die Kanten entsprechend der Ressourcen, die sie beanspruchen, der richtigen Kantenmenge zugerechnet werden, damit die im Folgenden entwickelten Nebenbedingungen zur Einhaltung der Ressourcenkapazitäten je Zeitscheibe richtig greifen können.

Befinden sich Sendungen bereits im System (Menge $K_{L/P}$ in Abbildung 4.5), z.B. auf einer ausgewiesenen Lagerfläche, so wird ein künstlicher Knoten für jede ZS in der zweiten und dritten Knotenebene integriert. Über die weiter unten eingeführten binären Variablen lässt sich steuern, dass von der Quelle über dieses künstliche Tor und über diese künstliche Entladefläche nur diejenigen Güter k fließen, die die Mengen an gelagerten LE aus $K_{L/P}$ repräsentieren. Sollen andererseits LE von ankommenden Nahtouren nicht im Fernverkehr die Anlage verlassen sondern gepuffert oder gelagert werden, so müssen in gleicher Art die dafür ausgewiesenen Orte als künstliche Bereitstellflächen und Tore in die Ebenen V_3 und V_4 eingefügt werden (L/P). Über den Aufbau der Kantenmenge wird gesteuert, dass diese allein mit dem Knoten der Knotenmenge V_5 verbunden sind, der die künstliche Relation $L_{L/P}$ darstellt und über bestimmte Bedarfe an LE verfügt. Die folgende Abbildung stellt die Zusammenhänge exemplarisch für eine Zeitscheibe dar:

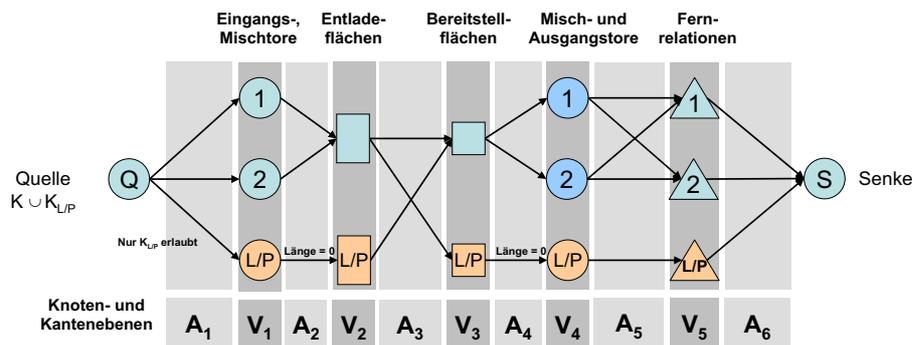


Abbildung 4.5: Erweiterung des Netzwerks um spezielle Quellen und Senken

Prinzipiell ist durch einfache Änderungen im Aufbau der Knoten- und Kantenmengen das Abbild anderer Systeme möglich. Eine notwendige Flexibilität des darauf basierenden und im Folgenden entwickelten mathematischen Modells wird so garantiert.

Entscheidungsvariablen:

Für das Netzwerk N muss für jede Kante arc_i mit $i \in A$ entschieden werden, wie viele LE der einzelnen Güter $k \in K$, d.h. der jeweiligen Nahtouren, über sie fließen. Die Entscheidungsvariablen der Torbelegungsplanung für den SA haben daher folgende Gestalt:

$$x_{arc_i}^k \quad \forall i \in A, \forall k \in K.$$

Bei den Gütern handelt es sich um nicht teilbare LE (z.B. Paletten), deren Entscheidungsvariablen als ganzzahlig definiert werden müssen: $x_{arc_i}^k \in \mathbb{N}$.

Anmerkung zur Modellierung der Entscheidungsvariablen:

Grundsätzlich ist neben den bereits diskutierten Varianten aus Kapitel 4.3.3 eine klassische ganzzahlige Modellierung der Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung ohne Aufbau des oben vorgestellten Netzwerks $N = (V, A, c)$ möglich. In diesem Fall kann die Entscheidung, in welcher Zeitscheibe t wie viele LE eines bestimmten Gutes k zwischen zwei Orten i und j des Systems bewegt werden, durch die Variablen ${}^t x_{ij}^k$ dargestellt werden. Unerwünschte Effekte, wie etwa der Transport von Ausgangstoren zu Entladeflächen, können durch die Einführung entsprechender Nebenbedingungen unterdrückt werden, indem die dazugehörenden Variablen auf Null gesetzt werden. Der Vorteil des vorgestellten Netzwerkaufbaus für die Torbelegungsplanung ist zum einen, dass hierdurch bereits einige der aufgestellten Nebenbedingungen NB 1 - NB 23 aus Kapitel 4.2 abgebildet werden können. So werden z.B. Kanten nur eingeführt, wenn hier Transporte oder Prozesse stattfinden dürfen (Beachtung des Fahrplans bei der Beladung etc.). Dieser Sachverhalt wird weiter unten detaillierter aufgegriffen. Zum anderen fällt die Anzahl der vorhandenen Entscheidungsvariablen durch den Aufbau der Kanten- und Knotenebenen tendenziell geringer aus als dies bei einer klassischen ganzzahligen Modellierung ohne Netzwerkaufbau der Fall ist. Im Beispiel aus Abbildung 4.4 führt die hier vorgestellte Mehrgüterflussformulierung zu 80 Entscheidungsvariablen ($A'=40, K'=2$). Eine Modellierung über einen rein ganzzahligen Ansatz mit Entscheidungsvariablen ${}^t x_{ij}^k$ erzeugt 168 Variablen. Es müssen alle Kombinationen ${}^t x_{ij}^k$ mit $t \in T, k \in K, i \in I \cup M \cup EF \cup BF$ (mögliche Quellen für innerbetrieblichen Transport) und $j \in EF \cup BF \cup M \cup J$ (mögliche Senken für innerbetrieblichen Transport) in Betracht gezogen werden mit $T'=2, K'=2, I' + M'=3, EF'=2, BF'=2, M' + J'=2$.

Das oben definierte Mehrgüterflussnetzwerk reicht nicht aus, um die komplette Entscheidungssituation mit allen erforderlichen Nebenbedingungen der Torbelegungsplanung abzubilden. Eine Reihe spezieller Anforderungen an die Lösung des Systems müssen integriert werden, weswegen im Folgenden neben der Zielfunktion noch weitere Nebenbedingungen formuliert werden, die das Netzwerk ergänzen. Dadurch verliert das Optimierungsmodell seine reine graphentheoretische Natur und entwickelt sich hin zu einem allgemeinen ganzzahligen Problem. Bekannte Algorithmen aus dem Bereich der Graphentheorie bzw. der Mehrgüterflussprobleme sind nicht ohne weiteres anwendbar.

Zielfunktion:

Hauptziel der Torbelegungsplanung aus Sicht eines Anlagenbetreibers ist die Minimierung des innerbetrieblichen Aufwands, d.h. der beim Umschlag der Sendungen entstehenden Wegstrecken. Daneben kann es sinnvoll sein, die Nahverkehrstouren möglichst früh auf freie Tore einzuplanen und zu entladen. So stehen die Fahrzeuge einerseits der Tourenplanung früh wieder zur Verfügung und andererseits können die Tore in späten Zeitspannen für das Andocken zeitkritischer Touren freigehalten werden. Zwischen den beiden Zielsetzungen muss eine sinnvolle Gewichtung gefunden werden, damit das zweitrangige Ziel der frühen Einplanung nicht grundsätzlich über das primäre Ziel der Wegeminimierung gestellt wird - außer dies ist speziell gewünscht.

Die hierfür entwickelte Zielfunktion hat folgende Gestalt:

$$\min \sum_{k=1}^{K^t} \sum_{t=1}^{T^t} \left(\sum_{i \in A_{2t}} B^t * x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c_{ent}}{g_{ent}} \right) + \sum_{i \in A_{3t}} x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c_{ver}}{g_{ver}} \right) + \sum_{i \in A_{4t}} x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c_{bel}}{g_{bel}} \right) \right). \quad (4.1)$$

Hinter dem Ausdruck $x_{arc_i}^k$ mit $i \in A_{2t}$ steht die Anzahl an LE vom Typ k , die über eine der Kanten zwischen den Eingangs- und Mischtoren und den Entladeflächen in der Zeitscheibet fließen. Diese werden mit der Länge der jeweiligen Kante in [km] multipliziert und durch die Geschwindigkeit der Entladeressourcen in [km/h] geteilt. Durch Multiplikation mit den Kosten für den Einsatz einer Ressource des Prozesses Entladung in [Euro/h] werden anschließend die Betriebskosten ermittelt. Die verbleibenden Summenblöcke referenzieren in analoger Weise auf die entstehenden Kosten bei der Verbringung und der Beladung.

Die Konstante $B^t \in [1, \infty)$ im ersten Summanden der inneren Klammer gibt die "Bestrafung" für das späte Einplanen einer Nahtour an. Für die erste ZS nimmt B^t den Wert Eins an und steigt für wachsende Nummern der ZS stetig an. Liegt die Länge einer Kante arc_j zwischen Tor i und Entladefläche EF_s z.B. normalerweise bei 8 Metern, so wird bei einem Wert von $B_t = 1,1$ in der darauffolgenden ZS der gleiche Transport teurer. Er steigt künstlich auf 8,8 Meter.

Durch die Wahl des Faktors B^t lässt sich das Verhältnis zwischen den beiden Zielkriterien steuern. Ist in einem speziellen Fall etwa die frühe Einplanung und Entladung sehr wichtig, so wird dies durch einen hohen Faktor B^t erzwungen und die Minimierung der innerbetrieblichen Wege vernachlässigt. Liegt andererseits der Faktor B^t für alle ZS bei Eins, so findet eine reine Wegeminimierung statt.

Nebenbedingungen:

Einige der verbal formulierten Nebenbedingungen aus Kapitel 4.2 (siehe Tabellen 4.1 - 4.3) werden durch die Definition und den Aufbau des Netzwerks N automatisch eingehalten. Diese werden im Folgenden aufgeführt, da sie bei der Modellierung nicht weiter berücksichtigt werden müssen:

- NB 5: "Die komplette Ladung einer Nahtour muss entladen werden": Die später formulierte bekannte Kirchhoffsche Knotenregel besagt, dass alle LE der verschiedenen Nahtouren den Quellknoten verlassen müssen.
- NB 6: "LE einer Nahtour können erst nach Andocken der Nahtour umgeschlagen werden": Die Kantenmenge A_1 stellt die Zuordnungsentscheidung dar, die Kantenmengen A_2 bzw. A_3 die Entladung bzw. die Beladung. Durch die gerichtete Flussmodellierung ist gewährleistet, dass nur LE entladen bzw. beladen werden, deren Tour bereits einem Tor zugewiesen wurde.

- NB 7: "Beachtung der Fahrpläne": Ist eine Fernrelation in einer Zeitscheibe nicht für die Beladung verfügbar, so wird dies beim Aufbau der Kantenmenge A_5 berücksichtigt. Die Tore in dieser Zeitscheibe werden nicht durch Kanten mit der Fernrelation verbunden.
- NB 8: "Erhalt der erforderlichen Lademenge je Fernrelation": Die minimalen und maximalen Kapazitäten der Kanten der Menge A_6 werden gleich der Lademenge v^l gesetzt. Dadurch ist diese Nebenbedingung gesichert.
- NB 12 und NB 13: "Nahtouren dürfen nur an Eingangstoren bzw. Mischstoren andocken, Fernrelationen nur an Misch- bzw. Ausgangstoren": Die Knotenmenge V_1 besteht nur aus Eingangs- und Mischstoren und die Menge V_4 nur aus Misch- bzw. Ausgangstoren.
- NB 14: "Einhaltung der maximalen Entladeleistung je Tor und Zeitspanne": Die maximalen Kapazitäten der Kanten aus A_1 verhindern einen zu starken Fluss an LE über ein Eingangstor je Zeitscheibe.
- NB 22: "Beachtung der maximalen Kapazitäten der Flächen": Maximale Kantenkapazitäten der Rückführungskanten in A_3 und A_4 zur gleichen Fläche in der nächsten ZS garantieren teilweise die Einhaltung der Flächenkapazitäten. Eine Nebenbedingung zur Überprüfung des benötigten Weiterflusses ist zusätzlich nötig.
- NB 23: "Beachtung des Flächentyps": Der Aufbau des gerichteten Netzwerks garantiert, dass innerbetriebliche Transporte nur an den zugelassenen Typen von Logistikflächen starten und enden.

Nach Einführung der Zeitscheibenstruktur sowie der Netzwerkstruktur sind zusätzliche technische Nebenbedingungen erforderlich:

Nahtourbezogene Regeln	
NB 24	Das Verhältnis zwischen Anwesenheit in der frühest möglichen Andockzeitscheibe bzw. der spätest möglichen Abdockzeitscheibe in Minuten und der Höhe der entladenen LE einer Nahtour in diesen Zeitscheiben muss eingehalten werden
Fernrelationbezogene Regeln	
NB 25	Das Verhältnis zwischen Anwesenheit in der frühest möglichen Andockzeitscheibe bzw. der spätest möglichen Abdockzeitscheibe in Minuten und der Höhe der Belademenge einer Fernrelation in diesen Zeitscheiben muss eingehalten werden
Netzwerkbezogene Regeln	
NB 26	Kirchhoffsche Knotenregel: Alle in einen Knoten hereinfließenden LE einer Nahtour müssen diesen auch wieder verlassen
NB 27	Einhaltung der definierten minimalen und maximalen Kantenkapazitäten

Tabelle 4.6: Verbale Formulierung der Nebenbedingungen - Teil IV (Zusatz)

Liegt der frühest mögliche Andockzeitpunkt für eine Nahtour k mit Lademenge $w^k = 10$ LE bei 14.10 Uhr und umfasst die dazugehörige Zeitscheibe den Zeitraum von 14.00 Uhr bis 14.15 Uhr, so muss beachtet werden, dass bei einer Entladedauer von $e = 1$ Minute, in der

Ankunftszeitscheibe $d(a^k)$ nur maximal 5 LE entladen werden können. Gleiches gilt für die Beladung und die Abfahrtszeitscheibe.

Die verbleibenden Nebenbedingungen aus den Tabellen 4.1 - 4.3 sowie der Tabelle 4.6 werden nun in Form von mathematischen Funktionen in Abhängigkeit der Entscheidungsvariablen $x_{arc_i}^k \forall i \in A, \forall k \in K$ formuliert.

NB 2 und 3: Eine Nahtour darf nur an genau einem Tor andocken

Falls für ein Tor $i' \in I \cup M$ über eine Kante arc_j der einelementigen Mengen $A_{1_1}^{i'} - A_{1_{T'}}^{i'}$ ein positiver Fluss $x_{arc_j}^k$ stattfindet, so bedeutet dies, dass die Nahtour k dem Tor i' zugeordnet wurde. Sämtliche Entscheidungsvariablen der anderen Kantenmengen $A_{1_1}^i \cup \dots \cup A_{1_{T'}}^i$ mit $i \neq i'$ müssen in diesem Fall gleich Null sein. Hierfür wird eine binäre Entscheidungsvariable δ_k^i eingeführt, die überprüft, ob ein positiver Fluss vorliegt ($\delta_k^i = 1$). Falls ja, werden die verbleibenden Flussvariablen auf den Wert Null gezwungen:

$$w^k * \delta_k^{i'} \geq \sum_{j \in \bigcup_{t=1}^{T'} A_{1_t}^{i'}} x_{arc_j}^k, \quad \forall k \in K, \forall i' \in I \cup M \quad (4.2)$$

$$w^k * (1 - \delta_k^{i'}) \geq \sum_{i, i \neq i'} \sum_{j \in \bigcup_{t=1}^{T'} A_{1_t}^i} x_{arc_j}^k, \quad \forall k \in K, \forall i' \in I \cup M. \quad (4.3)$$

Jede Nahtour muss einem Tor zugewiesen werden. Daher gilt zusätzlich, dass die binären Entscheidungsvariablen δ_k^i für eine Nahtour k genau einmal gleich Eins sein müssen:

$$\sum_{i=1}^{I'+M'} \delta_k^i = 1, \quad \forall k \in K. \quad (4.4)$$

NB 10 und 11: Eine Fernrelation darf nur über genau ein Tor abgewickelt werden

Gleicher Sachverhalt gilt für die Fernrelationen. Hierfür werden binäre Variablen θ_l^j sowie die folgende Nebenbedingungen eingeführt:

$$v^l * \theta_l^{j'} \geq \sum_{k \in K} \sum_{i \in A_{5_l}^{j'}} x_{arc_i}^k, \quad \forall l \in L, \forall j' \in M \cup J \quad (4.5)$$

$$v^l * (1 - \theta_l^{j'}) \geq \sum_{k \in K} \sum_{j, j \neq j'} \sum_{i \in A_{5_l}^j} x_{arc_i}^k, \quad \forall l \in L, \forall j' \in M \cup J \quad (4.6)$$

$$\sum_{j=1}^{M'+J'} \theta_l^j = 1, \quad \forall l \in L. \quad (4.7)$$

NB 16: Nutzung eines Mischtors entweder als Eingangs- oder als Ausgangstor

Wird ein Mischtor $j \in M$ als Ausgangstor verwendet, d.h. ist für eine Fernrelation l die Variable $\theta_l^j = 1$, so kann für das gleiche j keine der Variablen δ_k^j den Wert 1 betragen. Es gilt somit:

$$\sum_{l=1}^{L'} \theta_l^j = 1 \Rightarrow \sum_{k=1}^{K'} \delta_k^j = 0 \Leftrightarrow$$

$$K' * (1 - \sum_{l=1}^{L'} \theta_l^j) \geq \sum_{k=1}^{K'} \delta_k^j, \quad \forall j \in \{1, \dots, M'\} \quad (4.8)$$

mit $i = (I' + j) \in \{I' + 1, \dots, I' + M'\}$.

Letztere Gleichung hält unter Verwendung der Annahme, dass über ein Ausgangstor nur maximal eine Fernrelation abgefertigt werden darf. Dies wird durch die folgende Nebenbedingung formuliert.

NB 17: Bei Nutzung eines Tores durch eine Fernrelation dürfen keine anderen Fernrelationen hierüber abgewickelt werden

Ist für eine Relation l und ein Tor j die Variable $\theta_l^j = 1$, so kann für das gleiche j keine der anderen Variablen θ_l^j den Wert 1 betragen:

$$\sum_{l=1}^{L'} \theta_l^j \leq 1, \quad \forall j \in M \cup J. \quad (4.9)$$

NB 4: Eine Nahtour darf nur am Stück an einem der Tore stehen

Um zu überprüfen, wann eine Nahverkehrstour k andockt, d.h. ein positiver Fluss über eine der Kanten aus A_1 innerhalb einer ZS t' fließt, wird eine neue binäre Variable $\gamma_{t'}^k$ eingeführt:

$$\sum_{i \in A_{1t'}} x_{arc_i}^k \leq w^k * \gamma_{t'}^k, \quad \forall k \in K, \forall t' \in T \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in A_{1t'}} x_{arc_i}^k \geq \gamma_{t'}^k, \quad \forall k \in K, \forall t' \in T. \quad (4.11)$$

Es soll verhindert werden, dass eine Nahtour k in einer ZS t' und in einer der späteren ZS $t' + j$ mit $j = 2, \dots, T' - t'$ an einem Tor i andockt und in den dazwischen liegenden ZS nicht. Folgende Muster innerhalb des γ -Vektors sollen folglich ausgeschlossen werden: 1|0|1, 1|0|0|1, 1|0|0|0|1 etc. Wie viele Muster unterschiedlicher Länge überprüft werden müssen, hängt von der Anzahl der ZS T' im System ab. Bei $T' = 5$ gibt es beispielsweise drei Muster des Typs 1|0|1, zwei Muster des Typs 1|0|0|1 und nur ein Muster des Typs 1|0|0|0|1. Unabhängig von der Länge des betrachteten Musters gilt insgesamt, dass die Summe aus den beiden äußeren Elementen, verringert um die addierten inneren Elemente immer kleiner oder maximal gleich 1 sein muss. Bei dem Muster 1|0|0|1, welches nicht erlaubt ist, führt diese Rechnung z.B. zu dem Wert 2. Das regelkonforme Muster 1|1|1|1 hingegen ergibt eine Null. Des Weiteren sind auch Muster wie z.B. 1|0|1|0|0|1 nicht erlaubt. Diese werden durch obige Summenregel nicht erfasst. Allerdings handelt es sich hierbei um zwei zusammengesetzte Muster (1|0|1 und

1|0|0|1), die beide schon einzeln unterdrückt werden. Zusammengesetzte Muster können somit vernachlässigt werden und es gilt:

$$\gamma_t^k + \gamma_{t+i}^k - \sum_{j=t+1}^{t+i-1} \gamma_j^k \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad (4.12)$$

$$\forall i \in \{2, \dots, T' - 1\}, \forall t \in \{1, \dots, T' - i\}.$$

Es wird durch obige Funktion nicht verhindert, dass eine Nahtour k in den ZS t , $t + 1$ und $t + 2$ an einem Tor i andockt und der γ -Vektor einer anderen Nahtour k' für die gleichen ZS positive Einträge $\gamma_t^{k'}$, $\gamma_{t+1}^{k'}$ und $\gamma_{t+2}^{k'}$ sowie gleichzeitig für das gleiche Tor eine positive Variable $\delta_{k'}^i$ hat. Ist eine ZS sehr lang, z.B. $q = 30$ Minuten, so beeinflusst ein solches Verbot das Optimierungsergebnis zu stark. In den ganzen 30 Minuten kann in diesem Fall nur eine Nahtour an einem Tor entladen werden. Daher wird diese Option hier nicht gewählt.

Da Fernrelationen jeweils getrennt über ein eigenes Tor beladen werden, müssen ähnliche Gleichungen hier nicht aufgestellt werden. Eine entsprechende Modellierung entfällt.

NB 1: Beachtung der Fahrpläne

Durch $d(a^k)$ wird diejenige ZS bezeichnet, in der der transferierte frühest mögliche Andockzeitpunkt a^k von Nahtour k liegt. Eine Nahtour k darf nicht in einer Zeitscheibe t andocken, die kleiner als $d(a^k)$ ist. Gleiches gilt für die spätest mögliche Abdockzeit b^k . In einer ZS nach $d(b^k)$ darf kein positiver Fluss von k über eine der Kanten in Menge A_{1_t} statt finden.

$$\sum_{t=1}^{d(a^k)-1} \gamma_t^k = 0, \quad \forall k \in K \quad (4.13)$$

$$\sum_{t=d(b^k)+1}^{T'} \gamma_t^k = 0, \quad \forall k \in K. \quad (4.14)$$

NB 24 und 25: Einhaltung des Verhältnisses "Anwesenheit in einer ZS" und "Entlade- bzw. Belademenge je Nahtour bzw. Fernrelation"

Es muss darauf geachtet werden, dass ein bestimmtes Verhältnis zwischen der in der Ankunftszeitscheibe $d(a^k)$ zur Verfügung stehenden Anwesenheitszeit einer Nahtour und der in dieser ZS über ein Tor in das System eintretenden LE der Nahtour eingehalten wird. Gleiches muss für die Abfahrtszeitscheibe und die Fernrelationen gelten. Insgesamt ergibt sich:

$$\sum_{i \in A_{1_{d(a^k)}}} x_{arc_i}^k \leq \left\lfloor \frac{p^{a^k}}{e} \right\rfloor, \quad \forall k \in K \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in A_{1_{d(b^k)}}} x_{arc_i}^k \leq \left\lfloor \frac{p^{b^k}}{e} \right\rfloor, \quad \forall k \in K \quad (4.16)$$

$$\sum_{k=1}^{K'} \sum_{j=1}^{M'+J'} x_{arc_{d(a^l)} A_{5_l}^j}^k \leq \left\lfloor \frac{p^{a^l}}{b} \right\rfloor, \quad \forall l \in L \quad (4.17)$$

$$\sum_{k=1}^{K'} \sum_{j=1}^{M'+J'} x_{arc_{d(b^l)} A_{5_l}^j}^k \leq \left\lfloor \frac{p^{b^l}}{b} \right\rfloor, \quad \forall l \in L. \quad (4.18)$$

Dabei ist z.B. p^{a^k} die Anzahl an Minuten, die Nahtour k in der Ankunftszeitscheibe $d(a^k)$ anwesend ist und e weist auf die Entladedauer je LE in Minuten hin.

NB 9: Einhaltung des Sendungsmix

Eine Fernrelation l soll im Optimierungszeitraum in Summe genau die im Sendungsmix angegebene Anzahl an LE der Nahtour k erhalten (d_{kl}):

$$x_{arc_l}^k = d_{kl}, \forall l \in L, \forall k \in K \text{ mit } arc_l \in A_6. \quad (4.19)$$

Gehen von einer Nahtour k insgesamt d_{kl} LE an die Fernrelation l , so wird im Modell automatisch entschieden, dass die Tour einem Eingangstor in einer ZS aus $\{d(a^k), \dots, \min\{d(b^k), d(b^l)\}\}$ zugewiesen wird. Liegt $d(a^k)$ nach $d(b^l)$, ist das Modell unlösbar, es existiert keine zulässige Lösung.

NB 19 - 21: Beachtung der Ressourcenstärke zur Entladung, Verbringung und Beladung

Die Aktivitäten zur Entladung, Verbringung und Beladung lassen sich anhand der Kantenmengen A_2 , A_3 und A_4 getrennt voneinander betrachten. Hierfür wurden einzelne Ressourcentypen mit den Eigenschaften Anzahl, Geschwindigkeit und Kosten modelliert. Es muss bei der Zuordnung beachtet werden, dass für die Dauer einer ZS bei keinem der drei Prozesse mehr Arbeitsaufwand entsteht, als dies aufgrund der Anzahl und der Leistungseigenschaften der Ressourcen maximal möglich ist. Dies wird durch die folgenden drei Nebenbedingungen garantiert:

$$\sum_{i \in A_{2t}} \sum_{k=1}^{K'} \alpha * x_{arc_i}^k * \frac{arc_i^{laenge} * 60}{g_{ent}} \leq q * r_{ent}, \forall t \in T \quad (4.20)$$

$$\sum_{i \in A_{3t}} \sum_{k=1}^{K'} \alpha * x_{arc_i}^k * \frac{arc_i^{laenge} * 60}{g_{ver}} \leq q * r_{ver}, \forall t \in T \quad (4.21)$$

$$\sum_{i \in A_{4t}} \sum_{k=1}^{K'} \alpha * x_{arc_i}^k * \frac{arc_i^{laenge} * 60}{g_{bel}} \leq q * r_{bel}, \forall t \in T. \quad (4.22)$$

Auf der rechten Seite der Gleichungen steht jeweils die Anzahl an Arbeitsminuten, die je ZS maximal zur Verfügung stehen, wenn 100% der Ressourcen arbeiten. Existieren $r_{ent} = 5$ Handgabelhubwagen für die Entladung und beträgt die Länge der ZS $q = 30$ Minuten, so sind es maximal 150 Minuten, die für Entladetätigkeiten genutzt werden können. Auf der linken Seite der Gleichungen stehen die je Prozess und ZS (Untermengen A_{2t} , A_{3t} oder A_{4t}) in Summe geflossenen LE, multipliziert mit der jeweiligen Entfernung und über die Geschwindigkeit der eingesetzten Umschlagmittelressourcen umgerechnet in Minuten. Der Faktor $\alpha \in \mathbb{R}$, $1 \leq \alpha \leq 2$, dient der Berücksichtigung von "Leerfahrten". Im ungünstigsten Fall werden so genannte Einzelspiele gefahren. D.h. ein Gabelstapler fährt zu einem Tor j , entlädt eine LE, bringt sie auf die dem Tor zugewiesene Fläche i , fährt zurück zum gleichen Tor, nimmt die nächste LE auf und verfährt so weiter, bis das Fahrzeug entladen ist. In diesem Fall wird jeder Transportauftrag "Sendung von Tor j zu Entladefläche i " verdoppelt, α ist also gleich 2 zu setzen. Im

günstigsten Fall wird ein Gabelstapler derart durch die Halle gesteuert, dass am Ort, wo er eine LE abstellt, schon der nächste Auftrag wartet. Für diesen idealisierten Fall ist $\alpha = 1$. Dies ist unwahrscheinlich, da die Ressourcen getrennten Prozessen zugeordnet sind und eine Entladeressource üblicherweise nicht nach der Entladung einer LE für die Verbringung eingesetzt wird. Es ist schwer, vorab den Faktor α zu schätzen. Eine optimale Tourenplanung für die innerbetrieblichen Umschlagmittelressourcen ist laut der logistischen Systemannahmen nicht Planungsaufgabe der Torbelegungsplanung. Im eigentlichen Sinne ist der Faktor α das Resultat einer solchen Aufgabe. Eine Vernachlässigung des Faktors bedeutet aber, dass nur jede mit einer LE gefahrene Strecke von dem Konto der zur Verfügung stehenden Arbeitsminuten abgezogen wird. Dies ist eine zu schwache Annahme. Daher wird der Faktor α eingeführt und auf eine reelle Zahl zwischen 1 und 2 dimensioniert. Im Einzelfall muss der Faktor in Zusammenarbeit mit dem Betreiber und einer eingehenden Analyse der Praxis festgelegt werden.

NB 22: Beachtung der maximalen Kapazitäten der Flächen

Es soll verhindert werden, dass sich zeitgleich mehr als EF_s^{cap} bzw. BF_t^{cap} LE auf einer Fläche befinden. Durch die Diskretisierung der Zeit wird eine Überprüfung dieses Sachverhaltes erschwert. Es ist möglich für eine einzelne Logistikfläche nachzuhalten, wie viele LE innerhalb einer ZS über diese Fläche fließen und wie viele LE bis zur nächsten ZS auf ihr verbleiben. Für Letzteres wurde die Einhaltung der Flächenkapazität bereits durch die maximale Kapazität der Rückführungskanten gesichert. Die Mengen, die durch den eine Fläche darstellenden Knoten hindurch fließen, können prinzipiell unbegrenzt sein, solange genügend Ressourcen zum sofortigen Weitertransport zur Verfügung stehen. Es gilt aber aus technischer Sicht, dass nur eine bestimmte Obergrenze an möglichen Ablade- und Aufnahmeaktivitäten je Fläche und ZS zugelassen werden sollen. Dies wird durch folgende Nebenbedingung geregelt:

$$\sum_{i \in P(j)} x_{arc_i}^k \leq f \quad \forall j \in V_2 \cup V_3. \quad (4.23)$$

Hierbei wird durch $P(j)$ die Menge aller in den Knoten j einmündenden Kanten bezeichnet. Es wird überprüft, wieviele LE je ZS an einer Fläche angeliefert werden und diese Anzahl darf eine bestimmte Schwelle f nicht überschreiten.

NB 15: Einhaltung der maximale Beladeleistung je Tor und Zeitspanne

Die Tore im Beladebereich in Knotenmenge V_4 sind auf der einen Seite durch mehrere Kanten mit den Fernrelationsknoten aus V_5 verbunden (ausgehende Kanten) und auf der anderen Seite eventuell auch mit mehreren Kanten von Bereitstellflächen (eingehende Kanten). Somit kann die maximale Beladeaktivität nicht wie im Fall der Entladung über Kantenkapazitäten gewährleistet werden. Hierfür wird zusätzlich folgende Nebenbedingung aufgestellt:

$$\sum_{l \in L'} x_{arc_{t_{A_5}^j}}^k \leq q/b, \quad \forall j \in M \cup J, \forall t \in T. \quad (4.24)$$

Die Belademenge pro Zeitscheibe mit Länge q ist aufgrund der Beladedauer von b [Minuten/LE] nach oben beschränkt.

NB 26: Kirchhoffsche Knotenregel

Alle LE, die in einen Knoten hineinfließen, müssen diesen auch wieder verlassen. Hierfür wird folgende Nebenbedingung aufgestellt:

$$\sum_{i \in P(j)} x_{arc_i}^k - \sum_{i \in S(j)} x_{arc_i}^k = 0, \quad \forall j \in V \setminus \{Q, S\}, \forall k \in K. \quad (4.25)$$

$S(j)$ bezeichnet dabei alle von einem Knoten j abgehenden Kanten.

NB 27: Einhaltung der minimalen und maximalen Kantenkapazitäten

Für alle Kanten wurden minimale und maximale Kapazitäten gesetzt. Diese müssen eingehalten werden:

$$arc_i^{cap_{min}} \leq \sum_{k=1}^{K'} x_{arc_i}^k \leq arc_i^{cap_{max}}, \quad \forall i \in A. \quad (4.26)$$

Aufgrund der definierten Entscheidungsvariablen sowie der aufgestellten Zielfunktion und Nebenbedingungen lässt sich noch keine Aussage über die "Schwere" des mathematischen Optimierungsmodells ableiten. Dies wird Ziel des folgenden Kapitels sein.

4.3.5 Modellanalyse

Die Entscheidungsvariablen zur Steuerung der örtlichen und zeitlichen Zuordnungen δ_k^i, θ_l^j und γ_t^k sind binär. Die Entscheidungsvariablen $x_{arc_i}^k$, die den Fluss der Ladeeinheiten durch das Netzwerk repräsentieren, sind ganzzahlig. Als erste Aussage lässt sich somit festhalten, dass das vorgestellte Modell ein Vertreter der ganzzahligen Optimierungsprobleme ist.

Zudem weist das Modell Analogien zu zwei mathematischen Modellklassen auf, die in sich geschlossen bereits jeweils schwere Probleme darstellen. Hierbei handelt es sich um quadratische Zuordnungsprobleme und um ganzzahlige Mehrgüterflussprobleme.

Das allgemeine *quadratische Zuordnungsproblem* (= QAP) in einer binären Formulierung hat die folgende Gestalt⁷:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n c_{kl} * d_{ij} * x_{ik} * x_{jl} & (4.27) \\ \text{u.d.N.:} & \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 & \forall i \in \{1, \dots, n\} \\ & \sum_{l=1}^n x_{jl} = 1 & \forall j \in \{1, \dots, n\} \\ & x_{ik}, x_{jl} \in \{0, 1\}, & \forall i, j, k, l \in \{1, \dots, n\} \end{aligned}$$

Elemente einer Menge $I = \{1, \dots, n\}$ werden Elementen einer Menge $K = \{1, \dots, n\}$ zugeordnet und parallel Elemente einer Menge $J = \{1, \dots, n\}$ denen einer Menge $L = \{1, \dots, n\}$. Die Mengen K und L können z.B. potentielle Orte für das Aufstellen von Maschinen sein, während die Mengen I und J die Maschinen repräsentieren. Dabei ist bekannt, dass zwei Maschinen

⁷ vgl. Koopmans und Beckmann ([51]), 1957, S. 64-67

i und j im Laufe des Produktionsprozesses bestimmte Einheiten austauschen müssen. Diese werden durch d_{ij} angegeben. Nur wenn i dem Element k und j dem Element l zugeordnet werden (d.h. $x_{ik} = x_{jl} = 1$), kann zwischen den beiden Orten k und l die festgelegte Menge an Gütern fließen. Die Kosten für den Fluss einer Einheit z.B. als Entfernung zwischen k und l betragen c_{kl} . Die Nebenbedingungen garantieren, dass jedes der Objekte i und j genau einem Ort zugewiesen wird.

Quadratische Zuordnungsprobleme gehören zu der Klasse der \mathcal{NP} -harten Probleme⁸. In der Komplexitätstheorie werden die Mengen \mathcal{P} und \mathcal{NP} unterschieden. Erstere umfasst sämtliche Optimierungsprobleme, für die Algorithmen mit polynomiell beschränkter Worst-Case-Rechenzeit bekannt sind. Für Probleme, die zur Menge \mathcal{NP} zählen, existieren nur Algorithmen mit exponentiell beschränkter Worst-Case-Rechenzeit. Darüber hinaus gibt es \mathcal{NP} -harte oder -schwere Probleme, die mindestens mit exponentiell beschränkter Rechenzeit gelöst werden können und die nicht notwendigerweise der Menge \mathcal{NP} entstammen. Gehört das Problem zu \mathcal{NP} , so wird es als \mathcal{NP} -vollständig bezeichnet⁹. Klassische Vertreter von \mathcal{NP} -harten Problemen sind das Set Partitioning Problem oder das Traveling Salesman Problem^{10,11}.

Das Problem der Torbelegungsplanung wird in der vorliegenden Arbeit als zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen formuliert. Dennoch ist es in seinen Grundzügen ein quadratisches Zuordnungsproblem. Dies liegt in der Einführung der binären Variablen δ_k^i und θ_l^j sowie der Nebenbedingungen 4.2 - 4.7 begründet. Diese steuern den eingangsseitigen und ausgangsseitigen Fluss der Nahtouren durch die Tore. Falls eine Zuordnung Tour k bzw. Relation l an Eingangstore i bzw. Ausgangstore j statt gefunden hat, so werden die Sendungen d_{kl} zwischen der Tour und der Relation und somit zwischen den Toren transportiert. Der Fluss einer Nahtour bzw. einer Relation ist auf Teilmengen der Knotenmengen V_1 und V_4 nicht teilbar, da die Zuordnung der Touren bzw. Relationen zu genau einem Tor i bzw. j erfolgen muss. Unteilbare Flüsse durch ein Netzwerk werden auch als "unsplittable flows" bezeichnet und werden in der neueren mathematischen Wissenschaft untersucht^{12,13}. Die Arbeiten sind auf das vorliegende Problem nicht übertragbar.

Das Grundmodell eines allgemeinen *Mehrgüterflussproblems* bei gegebenem Netzwerk $N = (V, A, c)$ mit maximalen Kantenkapazitäten d_{arc_i} hat folgende Gestalt¹⁴:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{k=1}^{K'} \sum_{i=1}^{A'} c_{arc_i}^k * x_{arc_i}^k & (4.28) \\ & \sum_{k=1}^{K'} x_{arc_i}^k \leq d_{arc_i}, \quad \forall i \in A \\ & \sum_{i \in S(j)} x_{arc_i}^k - \sum_{i \in P(j)} x_{arc_i}^k = b_k^j, \quad \forall k \in K, \forall j \in V \\ & x_{arc_i}^k \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in A, \forall k \in K \end{aligned}$$

⁸ vgl. Sahni, Gonzalez ([66]), 1972

⁹ zur Definition \mathcal{P} , \mathcal{NP} und \mathcal{NP} -schwere bzw. -vollständige Probleme siehe Wegener ([87]), 2003.

¹⁰ vgl. Huisman ([44]), 2004

¹¹ vgl. Korte, Vygen ([52]), 2006, S. 370

¹² vgl. Baier, Köhler, Skutella ([6]), 2002

¹³ vgl. Skutella ([71]), 2001

¹⁴ vgl. Ahuja ([1]), 1993, S. 649-650

Dabei repräsentieren die Mengen $P(j)$ bzw. $S(j)$ die in den Knoten $j \in V$ eingehenden bzw. ausgehenden Kanten. Ist der Knoten j ungleich dem Quellknoten s_k des Gutes k und ungleich dem Zielknoten t_k , so beträgt b_k^j Null, um den Durchfluss aller Einheiten zu garantieren. Handelt es sich allerdings um den Zielknoten, so gilt $b_k^j = -b_k$ (Angebot), und für den Fall eines Quellknotens ist $b_k^j = b_k$ (Bedarf). Die Ungleichungen des ersten Typs beschreiben die Einhaltung der Kantenkapazitäten und die des zweiten Typs die Einhaltung der Flussbedingungen nach Kirchhoff bzw. des Bedarfs an den Gütern in den Zielknoten.

Auch ganzzahlige Mehrgüterflussprobleme sind in der Wissenschaft als \mathcal{NP} -hart klassifiziert worden¹⁵. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell hat aufgrund des entworfenen Netzwerks und der Definition der Entscheidungsvariablen $x_{arc_i}^k \in \mathbb{N}$ eine große Ähnlichkeit zu ganzzahligen Mehrgüterflussproblemen.

Aufgrund der Verwandtschaft des aufgestellten zeitdiskreten Mehrgüterflussproblems mit Nebenbedingungen zu QAP-Problemen bzw. zu ganzzahligen Mehrgüterflussproblemen, ist zu vermuten, dass die Optimierungsaufgabe der Torbelegungsplanung ein \mathcal{NP} -hartes Problem ist.

Im Folgenden wird für die Testanwendungen eine einschränkende Annahme getroffen, die die Ganzzahligkeit der Flussvariablen aufhebt.

Überführung des ganzzahligen Problems in ein gemischt-ganzzahliges Problem:

Im Rahmen der Testläufe im folgenden Kapitel wird das entwickelte zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen an das Lösungsverfahren Branch-and-Cut übergeben. Aufgrund der Tatsache, dass eine innerbetriebliche Tourenplanung nicht die realen Gegebenheiten widerspiegelt, liegt die Aufgabe des Modells in der Darstellung von innerbetrieblichen Flüsse der LE durch die Umschlaghalle und nicht von tatsächlichen Fahrten der Umschlagmittelressourcen. Unter diesem Aspekt und um Lösungen für realistische Szenarien entwickeln zu können, wird in der Implementierung die Ganzzahligkeitsbedingung an die Variablen $x_{arc_i}^k$ vernachlässigt. Das verbleibende Optimierungsproblem gehört hiernach zu der Klasse der gemischt-ganzzahligen Modelle. Bei Analyse der Ergebnisse der Testanwendungen hat sich gezeigt, dass die Entscheidungsvariablen dennoch bei allen Testinstanzen ganzzahlig war.

Aufgrund der weiterhin bestehenden Ähnlichkeit des Modells zum QAP ist bei Eingabe sehr großer Testinstanzen nicht mehr mit mathematisch exakten Lösungen zu rechnen. Testinstanzen für das reine QAP konnten für die geringe Größe von $n = 36$ beispielsweise erst in letzter Zeit optimal gelöst werden¹⁶.

4.4 Übertragung auf den Sammelguteingang

Das mathematische Modell aus Kapitel 4.3 wurde für den Fall des Sammelguteausgangs, d.h. den Umschlag der Sendungen von ankommenden Nahverkehrstouren auf abgehende Fernrelationen, entwickelt. Im Folgenden soll untersucht werden, inwieweit sich dieses Modell auch für die zweite Verkehrswelle, den Sammelguteingang, eignet oder nach einer Anpassung übertragen lässt.

¹⁵ vgl. Huisman ([44]), 2004, S. 11

¹⁶ vgl. Anstreicher ([4]), 2003, S. 27

Im Sammelguteingang kommen zwischen ca. 00:00 Uhr und 6:00 Uhr die beladenen Fernverkehrsfahrzeuge von den Partneranlagen des Stückgutnetzes in der Anlage an. Die Sendungen werden auf Nahverkehrsrelationen sortiert. Die Nahverkehrsrelationen unterteilen das der Anlage zugeordnete Nahverkehrsgebiet in Regionen oder so genannte Rahmengebiete. Die Bedienung dieser Relationen wird je nach Lademenge anschließend von einem oder mehreren Fahrzeugen durchgeführt.

Somit stehen erneut ankommende Touren abgehenden Relationen gegenüber. Letztere werden in der Praxis den Toren der Anlage dauerhaft zugewiesen, um die innerbetrieblichen Verteil- und Sortierprozesse standardisiert durchführen zu können und Fehlverladungen zu vermeiden. Ziel ist es, sämtliche Ladeeinheiten der verschiedenen Fernverkehrstouren, die für eine Nahverkehrsrelation bestimmt sind, auf der Bereitstellfläche vor bzw. in der Nähe des Tores zu bündeln, wo diese abgefertigt wird. In der Praxis gestaltet sich dies wie im Fall des SA derart, dass über den Toren Karten angebracht sind, auf denen die Nummer der jeweiligen Nahverkehrsrelation vermerkt ist. Ein Ausgangstor ist dementsprechend durch zwei Karten markiert: eine für die zugewiesene Fernrelation im SA und eine für die zugewiesene Nahverkehrsrelation im SE. Die zu treffenden Entscheidungen im SA und im SE sind identisch.

Aufgrund der bei der Transportnetzplanung entwickelten Fahrpläne für die Hauptläufe verfügen die Fernverkehrstouren über prognostizierte Ankunftszeitfenster. Ebenso wurden durch die Disposition für die Nahverkehrsrelationen sinnvolle Abfahrtszeitfenster von der Anlage errechnet, um die ihnen zugewiesenen endgültigen Empfänger rechtzeitig für die Entladung anfahren zu können. Die zeitlichen Planungsbedingungen entsprechen denen des SA (NB 1, 7, 24, 25). Auch der Fluss der Sendungen durch die Anlage sowie die Nutzung der Logistikflächen und der Ressourcen unterliegt den gleichen Regeln wie im SA (NB 14, 15, 19-23). Sämtliche technische Regeln zum Andockverhalten der Touren und Relationen (NB 2-4, 6, 10-13, 16, 18) und zu den geforderten Umschlagmengen (NB 5, 8, 9) bleiben ebenso erhalten. Eine Übertragung der Modellierung des SA auf den SE ist hier unkritisch, es wechseln lediglich die Begriffe Fernrelation und Nahverkehrsrelation bzw. Nahverkehrstour und Fernverkehrstour. Das resultierende Netzwerk kann nach den gleichen Regeln aufgebaut werden. Es gelten die Restriktionen NB 26 und 27.

Die NB 17 ist für den SE anzupassen. Ein möglicher Unterschied zwischen dem Sammelguteingang und dem -ausgang ist, dass i.d.R. mehr Nahverkehrsrelationen im System existieren als Ausgangstore in der Umschlaghalle. Die Forderung, dass je Ausgangstor nur maximal eine Nahverkehrsrelation zugewiesen werden darf, kann dementsprechend nicht aufrecht erhalten werden. Die Nebenbedingung ist in diesem Fall einfach zu deaktivieren oder aber auf eine sinnvolle Zahl, z.B. maximal 2 Relationen je Ausgangstor, zu beschränken.

Die Zielsetzung der Wegeminimierung bzw. der kombinierten Wege- und Wartezeitenminimierung hat auch für den SE Bestand. Bei gleichen Inputdaten ist das Modell aus Kapitel 4.3 daher bis auf eine Ausnahme komplett übertragbar.

4.5 Anwendung des Branch-and-Cut Verfahrens

Die *mathematische Größe einer Problem Instanz* wird bei Optimierungsaufgaben durch die Anzahl der Entscheidungsvariablen und der Nebenbedingungen bestimmt. Im vorliegenden Fall ist die Anzahl der Entscheidungsvariablen $x_{arc_i}^k$ an die Menge der vorhandenen Nahtouren sowie an die Größe der Kantenmenge des zugrunde liegenden Netzwerkes gekoppelt. Die Anzahl der Kanten wiederum wird direkt durch die *logistische Größe der Problem Instanz* definiert. Die logistische Größe einer Instanz wird bei der vorliegenden Optimierungsaufgabe neben der Anzahl an Nahtouren im Wesentlichen durch die Anzahl der Tore in der Umschlaghalle (Knotenmenge V_1 und V_4), der Fernrelationen (Knotenmenge V_5) und der Zeitscheiben (Duplikation des Netzes für jede ZS) beschrieben. Die Anzahl der Nebenbedingungen wird durch die Größe des resultierenden Netzwerkes sowie der betrachteten Touren, Relationen und Zeitscheiben im System bestimmt.

Das entwickelte Modell zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne gehört zu der Klasse der gemischt-ganzzahligen Modelle. Zur exakten Lösung von Modellen dieser Kategorie eignen sich Branch-and-Bound Techniken. Eine effiziente Implementierung des Branch-and-Bound Verfahrens mit Integration von leistungsfähigen Schnittebenen ist in dem Optimization Solver CPLEX¹⁷ zu finden. Nach Herleitung der Komplexität des vorgestellten Modells ist zu erwarten, dass die Anwendung eines exakten diskreten Optimierungsverfahrens auf größere Problem Instanzen hohe Laufzeiten erfordert oder nur wenige bzw. eventuell sogar gar keine zulässigen Lösungen gefunden werden können. Dennoch wird im Folgenden das mathematische Modell für zehn künstliche Testinstanzen mit unterschiedlich großen logistischen wie auch mathematischen Dimensionen erzeugt und zur optimalen Lösung an CPLEX 10.0 übergeben¹⁸. Ziel ist neben der Beobachtung des Lösungsverlaufs und des Lösungsverhaltens die Überprüfung der Ergebnisse für die logistische Praxis, um beurteilen zu können, inwieweit das mathematische Modell die Optimierungsaufgabe geeignet repräsentiert.

Der Aufbau des mathematischen Modells und des instanzabhängigen Netzwerkes sowie die Kommunikation mit CPLEX werden unter Verwendung der Programmier- und Modellierungssprache GAMS¹⁹ geleistet. Die vollständige Auflistung aller für die zehn Testszenarien benötigten Informationen (Layout der Halle, Fahrplan, Sendungsmix, Entfernungen zwischen Toren und Flächen etc.) beansprucht zu viel Platz. Daher wird sich auf eine kurze verbale Beschreibung der Systemlast und der Strukturinformationen sowie der resultierenden logistischen (Tabelle 4.7) und mathematischen Größe (Tabelle 4.8) beschränkt. Für eine komplette Darstellung der Inputdaten der zehn Szenarien sei auf den Anhang verwiesen (Kapitel A.1). Die wesentlichen Beobachtungen zum Lösungsverlauf, inklusive Lösungszeit und Lösungsgüte sowie zum Verhalten des von CPLEX verwendeten Branch-and-Cut Verfahrens, werden dargestellt und interpretiert (Tabelle 4.9). Alle Szenarien beziehen sich auf die Verkehrswelle Sammelgutausgang, d.h. es findet ein Umschlag von Nahtouren auf Fernrelationen statt.

¹⁷ Für Informationen zu CPLEX siehe www.ilog.com.

¹⁸ Informationen zum Rechnersystem: Betriebssystem: Microsoft Windows XP Professional - Service Pack 2, Prozessor: Intel Pentium 4, 1,7 GHz, Hauptspeicher: 768 MB RAM

¹⁹ Für Informationen zu GAMS siehe www.gams.com.

Vorstellung der Testszenarien:

Fünf verschiedene Hallenlayouts mit unterschiedlichen Toranzahlen, Größen und Entfernungen werden untersucht (14, 25, 42, 64, 100 Tore). Für jedes Hallenlayout werden zwei Szenarien bearbeitet (I, II - 14; III, IV - 25; V, VI - 42; VII, VIII - 64; IX, X - 80, 100). Diese unterscheiden sich jeweils durch die Anzahl der Fernrelationen, der Nahtouren, der Zeitscheiben und der Einteilung der zur Verfügung stehenden Tore in Eingangs- und Ausgangstore.

Szenario	Logistiksystem							
	Zeit-scheiben	Eingangs-tore	Ausgangs-tore	Tore-gesamt	Entlade-flächen	Bereitstell-flächen	Fern-relationen	Nahtouren
I	6	8	6	14	1	6	6	6
II	6	4	10	14	1	10	6	12
III	10	11	14	25	1	14	10	20
IV	6	15	10	25	1	10	10	40
V	6	17	25	42	2	25	20	40
VI	8	22	20	42	2	20	20	50
VII	6	25	39	64	2	39	25	40
VIII	8	10	54	64	1	54	20	40
IX	4	40	60	100	2	60	30	30
X	6	20	60	80	2	60	40	80

Tabelle 4.7: Logistische Größe der Testszenarien

Im Rahmen der Testläufe wurde festgestellt, dass die Nebenbedingung NB 16 (Nutzung eines Mischtors entweder als Eingang oder als Ausgang) zu erheblichen Problemen führt. Bereits bei Szenarien mit 6 Toren sind kaum noch Lösungen zu ermitteln, wenn alle oder ein Großteil der Tore Mischstore sind. Deswegen wird eine Einteilung der Tore in Eingang und Ausgang vorab vorgenommen. Hierdurch geht einerseits Optimierungspotenzial verloren. Andererseits werden Lösungen, bei denen sich Eingangs- und Ausgangstore beliebig im Layout abwechseln, unterdrückt. Solche Lösungen sind aus Sicht der Praxis vor dem Hintergrund eines gerichteten Materialflusses eher unerwünscht. In der Praxis wird häufig mit einer gebündelten Wareneingangszone und somit mit nur einer Entladefläche gearbeitet. In den Szenarien V - VII und IX bzw. X werden zwei Wareneingangszonen mit Entladeflächen angelegt, die an verschiedenen Stellen innerhalb der Halle positioniert sind. Alle Ausgangstore verfügen über eine eigene Bereitstellfläche.

Die Szenarien V - X basieren auf realistischen Layouts. Hallen mit 40 - 50 Toren existieren vor allem im klein und mittelständischen Bereich. Stückgutanlagen mit 60 - 100 Toren zählen in Deutschland zu großen Anlagen. Im Szenario IX wird im gleichen Layout wie im Szenario X bei reduzierter Toranzahl und unter Beibehaltung der Entfernungen gearbeitet. In den Szenarien IV - VIII und X werden realistische Anzahlen an Nahtouren und in den Szenarien IX und X an Fernrelationen verwendet.

Nach Eingabe der Daten in GAMS werden die mathematischen Dimensionen erzeugt. Die Anzahl an resultierenden Kanten und Knoten sowie der stetigen und binären Entscheidungsvariablen und der Nebenbedingungen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Szenario	Netzwerk		Mathematisches Modell		
	Kanten	Knoten	Kantenbezogenen Entscheidungsvariablen	Binäre Entscheidungsvariablen	Nebenbedingungen
I	713	176	4.278	120	1.761
II	785	176	9.420	180	2.600
III	3.536	512	70.720	560	14.020
IV	1.876	312	75.040	940	15.514
V	6.135	526	245.400	1.420	26.415
VI	7.547	694	377.350	1.900	42.535
VII	12.580	795	503.200	2.215	41.633
VIII	14.021	1.046	560.840	1.800	50.462
IX	17.691	832	530.730	3.120	38.920
X	22.641	1.002	1.811.280	4.480	94.961

Tabelle 4.8: Mathematische Größe der Testszenarien

Es ist zu erkennen, dass die mathematische Komplexität kontinuierlich steigt. Des Weiteren ist sie stark an die Anzahl der Zeitscheiben und der Fernrelationen im System gekoppelt. Dies lässt sich auch anhand der weiter unten folgenden Abbildung 4.8 ablesen. Durch die Verbindung aller Ausgangstore mit den die Fernrelationen darstellenden Knoten, ist die fünfte Kantenmenge sehr groß. Zusätzlich muss das Netz bei der Einführung weiterer Zeitscheiben in Teilen entsprechend häufig dupliziert werden. Mit 250.000 und mehr Entscheidungsvariablen, die den Fluss der Ladeeinheiten durch das Netzwerk modellieren, werden ab Szenario V interessante mathematische Problemgrößen erreicht.

Für jedes der Szenarien werden drei Unterszenarien (A, B, C) betrachtet. Unterszenario A zeichnet sich durch eine reine Wegminimierung aus. Der Faktor B^t der Zielfunktion wird für alle Zeitscheiben gleich Eins gesetzt. Die zeitlich frühe Einplanung der Fahrzeuge spielt somit keine Rolle. Im Gegensatz hierzu sind die Kosten in den Unterszenarien B und C lediglich in der ersten Zeitscheibe entsprechend der ursprünglichen Entfernungen im Layout der Halle gewählt. Beim Szenario B werden für steigende Zeitscheiben die Entfernungen mit dem Faktor $B^t = 1 + (t - 1) * 0,1$ bestraft. Dies bedeutet, dass mit steigenden Zeitscheibenummern die ursprünglichen Entfernungen einen Aufschlag von 10, 20, 30 % etc. erhalten. Durch diesen moderaten Anstieg soll eine Gleichgewichtung zwischen Wegminimierung und Wartezeitenminimierung erzielt werden. Im Szenario C dagegen liegt der prozentuale Aufschlag je steigender Zeitscheibennummer bei 50, 100, 150 % etc. ($B^t = 1 + (t - 1) * 0,5$). Hier steht die frühe Einplanung im Vordergrund, eine Entladung in späten Zeitscheiben soll vermieden werden. Es ergeben sich insgesamt 30 Szenarien mit 10 verschiedenen logistischen Szenarien, die im Folgenden durch Verwendung des Branch-and-Cut Verfahrens gelöst werden.

Vorstellung des Lösungsverlaufs und der Ergebnisse:

Die folgende Tabelle stellt den Lösungsverlauf und die Lösungsgüte des eingesetzten Branch-and-Cut Verfahrens dar.

Szenario und Variante		Laufzeit in Sekunden			Lösungsqualität				Gap [%]: letzte Lösung
Szenario	Zeitscheiben- bestrafung	Erste zulässige Lösung	Lösung innerhalb eines 5%-igen Zielfunktionswertniveaus	Letzte Lösung	Erste zulässige Lösung	5%-iges Niveau der letzten Lösung	Letzte Lösung	Untere Schranke	
I	A	0,8	1	206	0,346500	0,274050	0,261000	0,258755	0,86
I	B	0,73	2	92	0,338350	0,278145	0,264900	0,264529	0,14
I	C	0,92	4	110	0,336000	0,283500	0,270000	0,269838	0,06
II	A	1,3	9	3600	0,617500	0,535500	0,510000	0,480012	5,88
II	B	1,27	5	890	0,704300	0,605115	0,576300	0,576127	0,03
II	C	1,26	5	648	1,023250	0,883575	0,841500	0,840490	0,12
III	A	259	2175	3600	6,181450	5,500845	5,238900	3,581836	31,63
III	B	299	836	3600	9,167395	6,482280	6,173600	3,914062	36,60
III	C	184	750	3600	7,223325	6,934515	6,604300	4,527908	31,44
IV	A	404	616	3600	6,801600	6,370455	6,067100	4,655893	23,26
IV	B	407	879	3600	10,138050	7,850955	7,477100	5,411177	27,63
IV	C	515	2246	3600	14,011750	11,121915	10,592300	7,793814	26,42
V	A	673	673	3600	11,772000	11,772000	11,772000	7,647091	35,04
V	B	445	1649	3600	14,211550	14,186905	13,511338	8,024384	40,61
V	C	328	3018	3600	18,698242	16,033159	15,269675	8,706769	42,98
VI	A	2986	2986	3600	13,006930	13,006930	13,006930	7,666285	41,06
VI	B	929	929	3600	15,535475	15,535475	15,002668	8,309978	44,61
VI	C	460	3053	3600	22,783958	20,578748	19,598808	9,969914	49,13
VII	A	-	-	3600	-	-	-	6,135700	-
VII	B	1715	3120	3600	24,542600	12,264509	11,680485	6,689414	42,73
VII	C	3200	3200	3600	35,404355	35,404355	35,404355	7,441995	78,98
VIII	A	-	-	3600	-	-	-	5,353900	-
VIII	B	-	-	3600	-	-	-	6,331000	-
VIII	C	-	-	3600	-	-	-	8,319300	-
IX	A	740	740	3600	9,233000	9,233000	9,233000	2,372881	74,30
IX	B	1400	1997	3600	11,785200	9,001512	8,572869	2,508421	70,74
IX	C	-	-	3600	-	-	-	2,672300	-
X	A	-	-	3600	-	-	-	-	-
X	B	-	-	3600	-	-	-	-	-
X	C	-	-	3600	-	-	-	-	-

Tabelle 4.9: Testsznarien: Lösungsverlauf und Lösungsgüte des Branch-and-Cut Verfahren

Es sind zeilenweise die Testsznarien und ihre Ausprägungen A, B und C eingetragen. Spaltenweise sind zunächst drei Informationen zur Laufzeit und anschließend fünf Informationen zur Lösungsqualität aufgeführt. Bezüglich der Laufzeit wird die Zeit bis zum Erreichen der ersten zulässigen Lösung und der letzten Lösung notiert (die Rechenzeit ist maximal auf 1 Stunde= 3600 Sekunden reguliert). Des Weiteren wird festgehalten, wann eine Lösung gefunden werden kann, deren Zielfunktionsniveau innerhalb eines 5%-Intervalls zum Wert der letzten Lösung liegt.

Grundsätzlich gilt, dass das Branch-and-Cut Verfahren von Cplex beendet wird, wenn die *MIP-Gap* auf eine hinreichend kleine Toleranz gesenkt werden konnte. Als *MIP-Gap* wird die Differenz zwischen dem Zielfunktionswert der besten bekannten zulässigen Lösung und dem Wert des besten derzeit bekannten aber noch nicht weiter untersuchten Knotens des Branch-and-Bound Baums bezeichnet. Letzterer bildet die untere Schranke des Problems und muss nicht zulässig sein. Aufgrund der Theorie des Branch-and-Bound Prinzips kann diese untere Schranke nur gleich bleiben oder aber steigen (bei Vorliegen eines Minimierungsproblems). Knoten, die auf einer tieferen Ebene im Baum liegen, können maximal das gleiche Zielfunktionsniveau haben, nicht aber besser, d.h. kleiner, als die untere Schranke werden. Der Wert der ersten unteren Schranke wird bei Lösung der LP-Relaxierung im Root-Knoten des Branch-and-Bound Baums erzeugt. Dies kann eine stark unzulässige Lösung sein, wodurch die untere Schranke für das Problem unrealistisch bzw. sehr "schlecht" ist. In den ersten drei Spalten zur Lösungsqualität

sind die Zielfunktionswerte zu den jeweils notierten drei Lösungen eingetragen. In der vierten Spalte des Blocks Lösungsqualität wird der von CPLEX ausgegebene Zielfunktionswert, welcher als untere Schranke dient, notiert. In der letzten Spalte steht die dazu gehörende MIP-Gap bei Abbruch des Verfahrens.

Analyse des Lösungsverlaufs:

Für die untersuchten Szenarien wird festgelegt, dass der Algorithmus entweder nach Auffinden des theoretischen Optimums abbricht oder aber die Berechnungen nach 60 Minuten beendet werden. Anhand Tabelle 4.9 ist ersichtlich, dass das Branch-and-Cut Verfahren für die vorliegende Optimierungsaufgabe nur bei kleinen Testinstanzen (I, II) nachweisbar optimale Lösungen, welche in einer kleinen Umgebung des theoretischen Optimums mit einer MIP-Gap von 0 % liegen, findet. Lediglich für das Szenario II-A ist es nicht möglich, die MIP-Gap nach einer Stunde Laufzeit auf unter 5 % zu senken, was aus logistischer Sicht immer noch sehr gut ist. Für die verbleibenden Szenarien sind Lücken von 30 - 40 % nach einer Stunde Laufzeit des angewandten Branch-and-Cut Verfahrens üblich.

Auffällig für die Szenarien I und II ist, dass eine "gute" Lösung, d.h. eine Lösung, die innerhalb eines 5%-igen Intervalls um den Zielfunktionswert der optimalen Lösung liegt, bereits sehr früh ermittelt wird. Im Szenario I-A beispielsweise, konnte eine derartige Lösung bereits nach einer Sekunde gefunden werden. Die Zeit, die allerdings darauf verwendet wird, die MIP-Gap komplett zu schließen und das absolute Optimum zu bestimmen, beträgt 206 Sekunden. Ähnliches lässt sich in Relation auch für die größeren Szenarien (III-IX) feststellen.

Dieser Sachverhalt wird zusätzlich anhand der folgenden Abbildung erläutert:

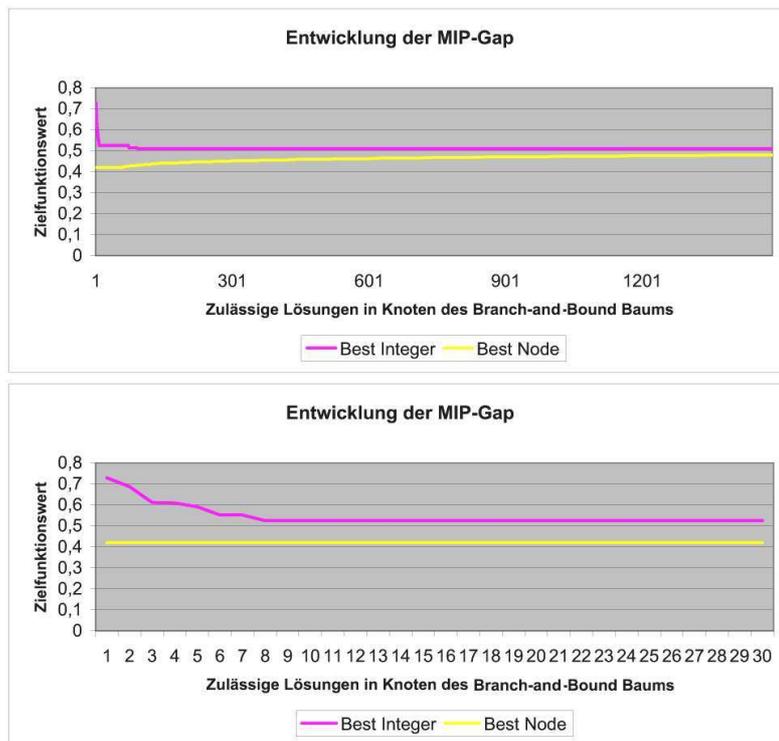


Abbildung 4.6: Entwicklung der MIP-Gap

Die Abbildung bezieht sich auf den Lösungsverlauf des Szenarios II-B. Auf der y-Achse ist der Zielfunktionswert eingetragen. Die x-Achse stellt die Iterationen des Branch-and-Cut Verfahrens, d.h. den Fortschritt im Branch-and-Bound Baum, dar. Die gelbe Linie repräsentiert die untere Schranke, die pinkfarbene Linie den Wert der Zielfunktion der in der aktuellen Iteration gefundenen ganzzahligen Lösungen. Die untere Abbildung ist ein Ausschnitt aus der oberen, bei der nur die ersten 30 Iterationen vergrößert dargestellt werden. Die untere Abbildung zeigt, dass CPLEX schnell gute Verbesserungen entwickelt. Die pinkfarbene Linie fällt stark innerhalb der ersten Iterationen. Dann entwickelt sie sich aber nicht weiter, sondern bleibt auf einem Niveau stehen. Dieser Verlauf ist typisch für kleinere Szenarien, für die noch optimale Lösungen entwickelt werden können. In der oberen Abbildung bleibt die untere Schranke zunächst konstant und steigt erst in den hinteren Iterationen an, bis die MIP-Gap geschlossen wird. Dieses Verhalten weist darauf hin, dass das Branch-and-Cut Verfahren nach einiger Zeit keine besseren zulässigen Lösungen mehr entwickeln kann. Während der fortschreitenden Suche im Lösungsbaum werden nach und nach Äste abgeschnitten, wodurch die untere Schranke steigt. Dies ist ein Indiz dafür, dass die untere Schranke, die mittels LP-Relaxierung des gemischt-ganzzahligen Modells entsteht, für die vorliegende Problemklasse ungeeignet ist. Viel Zeit wird auf das Durchsuchen des Lösungsbaums verwendet, die beste ganzzahlige Lösung ist aber längst gefunden worden.

Bei den größeren Szenarien sind die Probleminstanzen derart groß, dass die Lösung der Relaxierungen in den Knoten des Baums bereits sehr viel Zeit beansprucht. Dadurch kann der Baum nur langsam durchlaufen werden und das Phänomen der steigenden unteren Schranke tritt nicht auf. So erklären sich die hohen Werte der MIP-Gap von 30 - 40 % ab Szenario III. Für den Fall, dass die MIP-Gap nicht auf einen hinreichend kleinen Wert gesenkt werden kann, ist nicht klar, wie nah die zuletzt gefundene zulässige Lösung bereits an das tatsächliche Optimum heranreicht. Der Nachweis der Optimalität bleibt aus. Es ist aber möglich, dass die zuletzt gefundene Lösung bereits eine sehr gute Lösung ist.

Eine weitere Beobachtung aus den Testläufen ist, dass die Ausprägungen B und C häufig zu einer Beschleunigung des Verfahrens führen. So ist die erste zulässige Lösung in den Szenarien III-C, V-C und VI-C wesentlich schneller berechnet im Vergleich zu der Ausprägung A der gleichen Szenarien. Dies liegt in den Zeitscheibenbestrafungen begründet. In der Ausprägung A sind die Kanten derjenigen Netzabschnitte, die durch die Duplikation entstanden sind, jeweils gleich "teuer". Dies kann dazu führen, dass die Suche im Branch-and-Bound Baum länger dauert. Äste innerhalb des Baums sind sich sehr ähnlich, wodurch ein Bounding nur selten möglich ist.

Für diejenigen Szenarien, die durch einen Strich gekennzeichnet sind, wurden keine Ergebnisse bis zum Ablauf der einstündigen Laufzeit ermittelt.

Vorstellung und Interpretation der Optimierungsergebnisse anhand eines Beispiels:

Exemplarisch werden im Folgenden die Ergebnisse der mathematischen Optimierung und ihre Rückinterpretation für das zugrunde liegende logistische System anhand des Szenarios IV (A und C) vorgestellt.

Es handelt sich um eine Halle mit 25 Toren, von denen 10 (blau eingefärbt) für den Ausgang und 15 (grün eingefärbt) für den Eingang reserviert sind.

Das zu diesem Szenario gehörende Layout hat die folgende Gestalt:

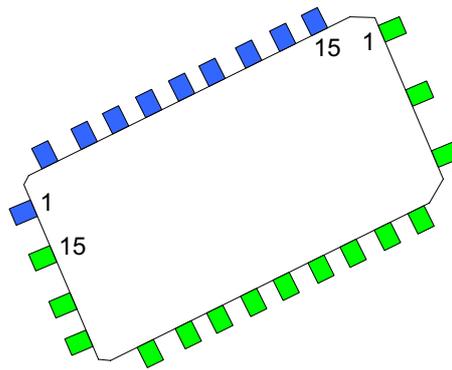


Abbildung 4.7: Testszenario IV: Layout der Stückgutspeditionsanlage

Im Rahmen eines Verkehrstages müssen 40 Nahtouren den Toren zugeordnet und zeitlich eingeplant werden. Ebenso müssen 10 Fernrelationen an Tore angewiesen werden.

Das zeitdiskrete Mehrgüterflussnetzwerk, auf dem das mathematische Modell basiert, hat folgende Gestalt:

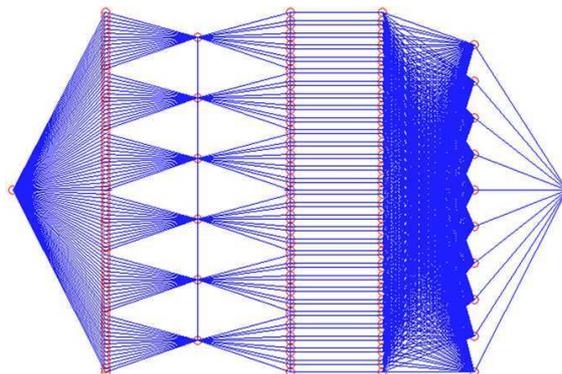


Abbildung 4.8: Testszenario IV: Mathematisches Netzwerk

Alle Eingangstore einer Zeitscheibe sind mit der gemeinsam genutzten Entladefläche verbunden. Die senkrechten Linien repräsentieren das Stehenbleiben von Sendungen über die Dauer einer Zeitscheibe hinweg. Die Ausgangstore verfügen über eigene Bereitstellflächen mit eindeutigen Transportverbindungen. Die fünfte Kantenmenge, in der die Ausgangstore mit den Fernrelationen verbunden sind, um die Zuordnungsentscheidung darzustellen, ist die größte Menge und trägt wesentlich zur Komplexität des Problems bei.

Das Ergebnis der mathematischen Optimierung ist die Belegung der Kanten mit den Flüssen der jeweiligen Nahtouren, d.h. die Bestimmung der Mehrgüterflussvariablen $x_{arc_i}^k$. Als logistisches Ergebnis folgt aus diesen Flussvariablen ein Torbelegungsplan sowie die innerbetriebliche Transportentscheidung und der Gesamtfluss der Sendungen durch die Umschlaghalle für den Optimierungszeitraum.

Diese Ergebnisse werden im Folgenden auf drei Arten dargestellt. Zunächst wird das Andockverhalten der Touren und Relationen in Form eines Gantt-Charts für den modellierten Verkehrstag

visualisiert (Abbildung 4.9). Hieraus ist die Zuordnungsentscheidung Fahrzeug-Tor, der jeweilige Andock- und Abdockzeitpunkt sowie die genaue Belegdauer ablesbar. Grundsätzlich ist im vorliegenden mathematischen Modell die Andockdauer eines Fahrzeugs proportional zur seiner Lademenge. Dennoch kann aus der Anzahl der Fahrzeuge je Tor und der jeweiligen Belegdauer nicht absolut abgelesen werden, wie stark die Beanspruchung der Tore und somit der nachgelagerten innerbetrieblichen Flächen durch die umgeschlagenen Mengen an dem Modelltag ist. Hierfür wird die Abbildung 4.10 aufgeführt. Eine Darstellung in Form eines Sankey Diagramms ist bei der Vielzahl an Verkehrswegen an dieser Stelle zu unübersichtlich. Daher wird hier die Stärke der Beanspruchung eines Tores durch eine entsprechende Einfärbung dargestellt, die auf häufig frequentierte Layoutobjekte hinweist. Anschließend werden die resultierenden Wartezeiten der Fahrzeuge in Form von Balkendiagrammen (Abbildung 4.11) miteinander verglichen.

Gantt-Chart:

Das linke Gantt-Chart in Abbildung 4.9 bezieht sich auf die Situation A - reine Wegeminimierung und das rechte Chart auf die Situation C - starke Wartezeitenminimierung.

Die ersten zehn Tore (hier: FTore = Tore für den Fernverkehr) stehen ausschließlich den Fernrelationen zur Verfügung und werden für sie dauerhaft reserviert. Innerhalb des 3 Stunden dauernden Optimierungszeitraums (15:00 Uhr - 18:00 Uhr) werden die Nahtouren den verbleibenden 15 Eingangstoren (hier: NTore = Tore für den Nahverkehr) zugewiesen. Es ist zu erkennen, dass bei der reinen Wegeminimierung die Zuordnung derart vorgenommen wird, dass die Eingangstore NTor 1, 2, 7, 8, 14 und 15 stark frequentiert werden. Dies sind diejenigen Tore, die entweder direkt neben den Ausgangstoren FTor 1 - FTor 10 liegen oder aber ihnen gegenüber und somit ebenfalls kurze Distanzen aufweisen (siehe Abbildung 4.7).

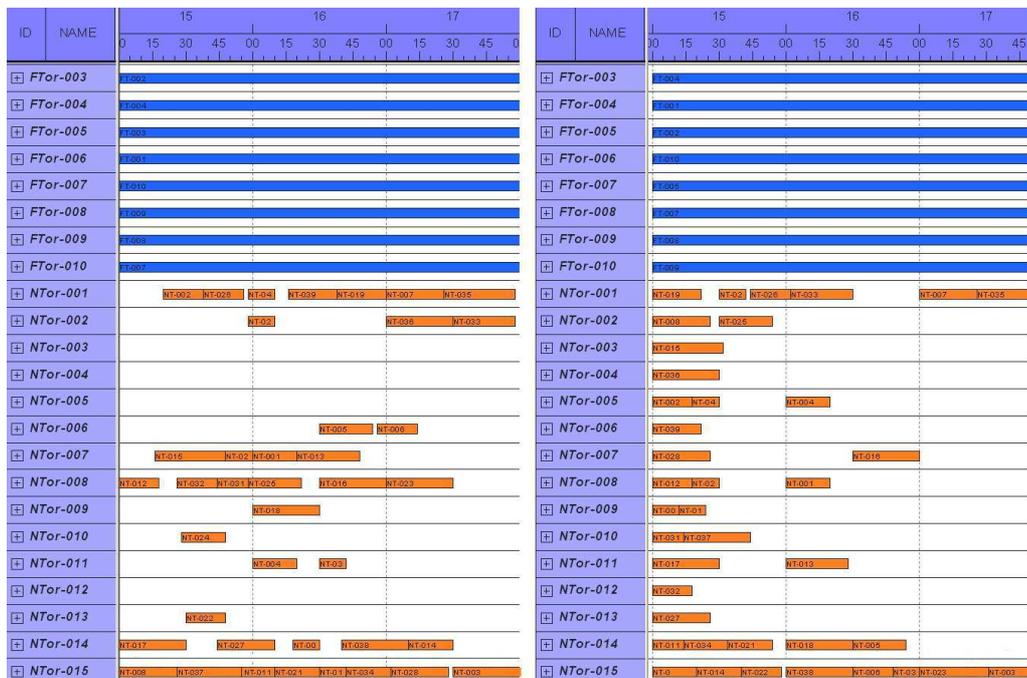


Abbildung 4.9: Testszenario IV: Gantt-Chart im Szenario A und C

Im rechten Gantt-Chart stellt sich die Situation anders dar. Hier werden alle Tore genutzt, da der Algorithmus versucht, die Touren so früh wie möglich einzuplanen. Lediglich diejenigen Touren, die über späte Ankunftszeiten verfügen (z.B. Nahtour 4 auf NTor 5: 16.00 Uhr) können nicht früher an Toren andocken. Die entstehenden Wege spielen dennoch eine Rolle, was daran zu erkennen ist, dass die äußeren Tore erneut stärker beansprucht werden.

Beanspruchung der Tore:

Die Darstellung der Optimierungsergebnisse in Form eines Gantt-Charts gibt Hinweise darauf, wie stark die Aktivitäten an den einzelnen Toren sind. In Abbildung 4.9 beispielsweise ist in beiden Teilen erkennbar, dass das Eingangstor NTor 15 durch viele Touren belegt ist. Da im mathematischen Modell die Belegdauer einer Tour an einem Tor grundsätzlich proportional zu deren Lademenge ist, ist für NTor 15 eine starke Umschlagleistung zu erwarten. Dennoch ist es in der Praxis möglich, dass eine Tour lange an einem Tor steht, ohne dass hier be- oder entladen wird. Um die Transparenz zu steigern, wird in folgender Abbildung 4.10 für die beiden Unterszenarien A und C des Szenarios IV die Anzahl an Paletten visualisiert, die über ein Eingangstor entladen bzw. über ein Ausgangstor beladen werden. Dabei gilt, dass für jedes Tor die Länge des Balkens proportional zur Summe der LE, der hierüber abgefertigten Touren bzw. Relationen, wächst.

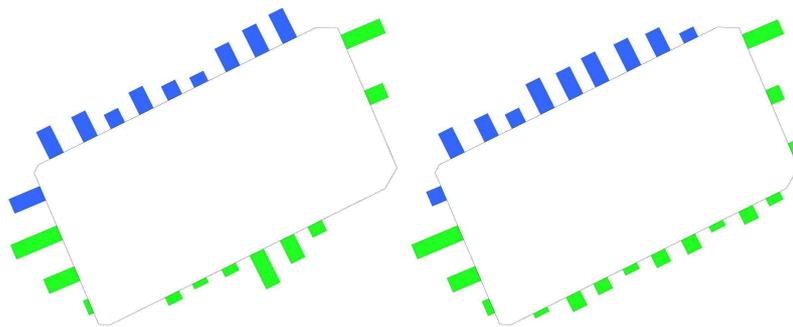


Abbildung 4.10: Testszenario IV: Beanspruchung der Tore im Szenario A und C

Erneut ist erkennbar, dass bei der reinen Wegeminimierung (Szenario A im linken Teil der Abbildung) die Tore, welche direkt neben den Ausgangstoren oder ihnen gegenüber liegen, stark beansprucht werden. Tore, die sich in der Nähe der unteren Ecken befinden, welche in diesem Szenario am weitesten von den Ausgangstoren entfernt sind, werden kaum oder gar nicht benutzt (NTore 3, 4, 5 und 12). Die Fernrelationen mit hohen Lademengen sind den äußeren Toren der zusammenhängenden Ausgangszone zugewiesen worden. Bei der Wartezeitminimierung (Szenario C im rechten Teil der Abbildung) verhält sich die Beanspruchung der Eingangstore wesentlich ausgeglichener. Hier werden die äußeren Tore erneut stärker beansprucht, es werden aber auch über "ungünstigere" Tore Mengen umgeschlagen, um die Fahrzeuge frühzeitig wieder frei zu geben.

Wartezeiten:

In Abbildung 4.11 sind die Wartezeiten der einzelnen Touren für die Optimierungsergebnisse der Szenarien A - reine Wegeminimierung - und C - Wartezeitenminimierung - dargestellt. Auf der x-Achse sind die Nahtouren ihren Nummern entsprechend aufsteigend aufgeführt. Auf der y-Achse sind die jeweils entstandenen Wartezeiten in Minuten abzulesen. Die Integration der Zeitscheibenbestrafung hat einen großen Einfluss auf das Optimierungsergebnis. Im Szenario A (linker Teil) entstehen Wartezeiten von maximal 120 Minuten. I.d.R. bewegen sie sich im Bereich von 20 - 60 Minuten.

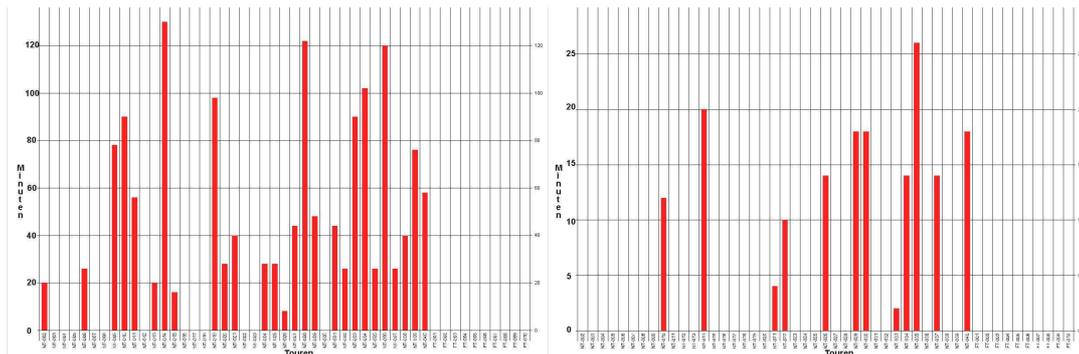


Abbildung 4.11: Testszenario IV: Wartezeiten im Szenario A und C

In der Ausprägung C (rechter Teil) hingegen, entstehen nur maximale Wartezeiten von 25 Minuten. Viele Nahtouren verfügen sogar über gar keine Wartezeiten. Die Modellierung des Ziels Wartezeitenminimierung über Zeitscheibenbestrafungen führt zu den gewünschten Ergebnissen.

Fazit der Testanwendung:

Die Durchführung der Testläufe und die Analyse der Ergebnisse haben gezeigt, dass das *zeitdiskrete Mehrgüterflussmodell mit Nebenbedingungen* zur Repräsentation der Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung geeignet ist. Es werden Lösungen erzeugt, die je nach Wahl des Parameters B^t zu einer Ressourcenminimierung, einer Wartezeitenminimierung oder einer simultanen Verfolgung beider Ziele führen. Anhand der Lösungen des mathematischen Optimierungsmodells lassen sich die wichtigen Entscheidungen der Torbelegungsplanung, d.h. die Zuordnung der Touren und Relationen zu Toren, deren zeitliche Belegdauer und der innerbetriebliche Materialfluss unter Nutzung der Ressourcen und Logistikflächen ablesen. Zudem sind die Lösungen für das zugrunde liegende logistische System richtig, es werden keine der aus technischer Sicht erforderlichen Rahmenbedingungen verletzt.

Das *Branch-and-Cut Verfahren* als Vertreter der exakten Methoden ist aufgrund der Schwere des Problems jedoch nicht in der Lage, für realistische Problemgrößen in adäquater Zeit und Qualität Lösungen zu generieren. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die LP-Relaxierung für diese Problemklasse eine schlechte Methode zur Bestimmung der unteren Schranke ist. Lösungen werden zwar früh gefunden, verändern sich nach einigen Verbesserungen aber nicht mehr grundlegend. Dennoch bricht das Verfahren nicht ab, weil das Schließen der MIP-Gap viel Zeit beansprucht. Bei großen Problemen kann zum anderen die Lösung der Relaxierungen in den Knoten des Lösungsbaums kaum noch effizient erfolgen. So wurden bei den Szenarien VII

- IX beispielsweise insgesamt in einer Stunde nur 3 - 5 zulässige Lösungen entwickelt. Szenario X hat eine derart hohe Komplexität, dass gar keine Lösung gefunden werden konnte. Auch lässt sich beobachten, dass das Verfahren auf die Eingabe von Szenarien mit knapp kalkulierten Ressourcen und engen Zeitfenstern negativ reagiert. Die Laufzeit erhöht sich unter Beibehaltung aller anderen Parameter. Das verwendete Branch-and-Cut Verfahren ist daher insgesamt als Lösungsverfahren ungeeignet.

Aufgrund der oben genannten positiven Einschätzung zur Eignung des entwickelten mathematischen Optimierungsmodells wird dieses im Folgenden beibehalten. Das Standardverfahren für gemischt-ganzzahlige Modelle, das Branch-and-Cut Verfahren, wird wegen seiner Nichteignung für die Problematik im folgenden Kapitel durch ein für die Torbelegungsplanung speziell entwickeltes Lösungsverfahren abgelöst.

Kapitel 5

Entwicklung eines Dekomposition und Column Generation Ansatzes

Die Methode Dekomposition dient zur Reduktion der Komplexität eines Problems. Sie wurde in der Mathematik bereits für verschiedene Problemstellungen (z.B. Tourenplanung¹, Scheduling²) angewandt. Die Idee wird zunächst in Kapitel 5.1 allgemein vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 5.2 ein neuartiger Dekompositionsansatz für die Torbelegungsplanung entwickelt. Die Dekomposition ermöglicht die Übertragung des Column Generation Konzeptes auf die Aufgabe der Bestimmung optimaler Torbelegungspläne (Kapitel 5.3 und 5.4). In Kapitel 5.5 wird das neu entwickelte Verfahren auf die gleichen Testszenarien wie das Branch-and-Cut Verfahren angewandt. Der Lösungsverlauf wird hinsichtlich Lösungszeit und Lösungsgüte dokumentiert und analysiert.

5.1 Vorstellung der Dekompositionsmethode

Das Konzept des Column Generation entstammt der stetigen linearen Optimierung und benötigt einen Lösungsraum, der eine Teilmenge des \mathbb{R}^n darstellt. Modelle der diskreten linearen Optimierung sind für die Anwendung des Column Generation ungeeignet. Dennoch sind es gerade die ganzzahligen oder gemischt-ganzzahligen Modelle, welche über eine hohe Komplexität verfügen. Klassische Verfahren der diskreten Optimierung, wie etwa das Branch-and-Bound oder der Branch-and-Cut, versagen bei großen Probleminstanzen.

Es wird daher in der mathematischen Forschung versucht, die Vorteile, die in einer sukzessiven Erzeugung von Spalten während der Laufzeit eines Lösungsverfahrens liegen, auf diskrete Optimierungsmodelle zu übertragen. Dies kann in Verbindung mit einem Branch-and-Bound Ansatz geschehen, was zu einem Branch-and-Price Verfahren führt. Die absolute Exaktheit einer optimalen Lösung wird weiterhin garantiert, die Laufzeit kann eventuell immer noch sehr hoch sein. Eine Alternative zum Branch-and-Price liegt in der Durchführung des Column Generation im

¹ vgl. Danna, Le Pape ([24]), 2005, S. 105-108

² vgl. Akker, Hoogeveen, Velde([2]), 2005, S. 305-313

ersten Knoten eines Branch-and-Bound Baums, um eine Menge an "guten" Spalten zu identifizieren. Diese werden anschließend an ein klassisches Branch-and-Bound Verfahren übergeben, das auf dieser wesentlich kleineren Spaltenmenge i.d.R. schnell eine Lösung findet. Die Lösung ist am Ende nicht mehr garantiert optimal, liegt aber häufig nahe dem Optimum³. Oft ist das Column Generation Konzept auch Bestandteil einer anders gearteten, für das jeweilige Problem speziell entwickelten Heuristik.

Der erste Schritt zur Anwendung eines Column Generation Ansatzes ist die Definition eines Master Problems MP, eines Restricted Master Problems RMP und eines Pricing Problems. Dies kann im Rahmen der diskreten Optimierung unter Verwendung von Dekompositionsmodellen geschehen. Sie ermöglichen zusätzlich eine sinnvolle Reduktion der Komplexität des Ursprungsproblems. Die Idee der *Dekomposition* wurde erstmals von Dantzig-Wolfe publiziert⁴. Im Folgenden wird die Idee anhand eines Beispiels aus der optimalen Produktionsplanung (in Anlehnung an Huisman ([45]), 2005, S. 250-251) beschrieben, um sie später auf das Problem der optimalen Torbelegungsplanung anzuwenden.

Allgemeine Idee der Dekomposition:

Es werden in einem System n Produkte auf einer Maschine in m Perioden erzeugt. Die Nachfrage in Periode $t \in T = \{1, \dots, m\}$ nach Produkt $i \in P = \{1, \dots, n\}$ ist durch d_{it} beschrieben. Drei Typen von Entscheidungsvariablen werden eingeführt. Die Variable x_{it} stellt die in Periode t produzierte Menge von Produkt i dar. Die binäre Variable y_{it} gibt an, ob die Produktion von i in t durch das vorherige produktspezifische Umrüsten der Maschine möglich ist. Die Menge an eingelagerten Einheiten von i in Periode t wird durch s_{it} repräsentiert. Je Periode entstehen Produktionskosten in Höhe von vc_{it} , Lagerkosten hc_{it} und Kosten für das Umrüsten der Maschine von sc_{it} . Zusätzlich existiert eine Kapazität cap_t für die maximale Beanspruchung der Maschine je Periode sowie ein Faktor vt_i , der angibt, wieviel davon ein Produkt i verbraucht. Insgesamt entsteht das folgende Optimierungsmodell:

$$\min \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} (sc_i y_{it} + vc_i x_{it} + hc_i s_{it}) \quad (5.1)$$

$$\text{u.d.N.:} \quad s_{i,t-1} + x_{it} = d_{it} + s_{it} \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$x_{it} \leq M y_{it} \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in P} vt_i x_{it} \leq cap_t \quad \forall t \in T \quad (5.4)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\}, x_{it}, s_{it} \geq 0, s_{i0} = 0 \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (5.5)$$

Die erste Nebenbedingung koordiniert Zu- und Ablauf des Lagers mit der Nachfrage. Die zweite Nebenbedingung überprüft, dass Produkt i nur produziert werden kann, wenn die Maschine umgerüstet wurde. Die dritte Bedingung garantiert die Einhaltung der Maschinenkapazität. In Nebenbedingung 5.4 werden die einzelnen Produkte erstmalig in einer Regel - nämlich der korrekten Nutzung der Maschine je Periode - zusammengeführt. Wird diese in obigem Modell weggelassen, so zerlegt sich das Problem in n separate Teilprobleme mit dem Lösungsraum $S_i = \{(y_{it}, x_{it}, s_{it}) \mid 5.2, 5.3, 5.5\}$ und $i \in P$.

³ vgl. Huisman ([44]), 2004, S. 18

⁴ vgl. Dantzig und Wolfe ([25]), 1960

Dies wird sich zunutze gemacht, indem separate und zulässige Produktionspläne für jedes der Produkte i über dem kompletten Zeitraum T berechnet werden. Die Menge aller zulässigen Pläne für ein Produkt i wird durch Q_i beschrieben. Weiter nimmt die binäre Variable z_{ij} den Wert Eins an, wenn für Produkt i der Produktionsplan $j \in Q_i$ ausgewählt wird.

Anstelle mit obigem Optimierungsmodell kann unter Verwendung der Dekompositionsidee mit folgendem Modell gearbeitet werden:

$$\min \sum_{i \in P} \sum_{j \in Q_i} c_{ij} z_{ij} \quad (5.6)$$

$$\text{u.d.N.: } \sum_{i \in P} \sum_{j \in Q_i} r_{ijt} z_{ij} \leq \text{cap}_t \quad \forall t \in T \quad (5.7)$$

$$\sum_{j \in Q_i} z_{ij} = 1 \quad \forall i \in P \quad (5.8)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad (5.9)$$

Die Erzeugung zulässiger Produktionspläne j für die einzelnen Produkte i entsprechend der Regeln 5.2 - 5.5 wird in einem anderen Schritt geleistet. An dieser Stelle wird aus der Menge aller bekannten Produktionspläne Q_i kostenoptimal und der gemeinsamen Kapazitätsregel (Nebenbedingung 5.7) entsprechend für jedes Produkt i genau einer (Nebenbedingung 5.8) ausgewählt. Der Faktor c_{ij} steht für die addierten Kosten für Produktion, Umrüsten und Lagern aus dem ersten Modell. Der Ausdruck r_{ijt} gibt den entsprechenden Verbrauch der Ressource durch den j -ten Produktionsplan des Produktes i in der Periode t an.

Wird mit dem Ziel, ein Column Generation Verfahren zu entwickeln, vorab nicht die komplette Menge aller zulässigen Pläne Q_i sondern nur eine Teilmenge \tilde{Q}_i erzeugt und parallel die Ganzzahligkeitsbedingung $z_{ij} \geq 0$ relaxiert, so stellt das zweite Modell ein RMP dar. Die Dualvariablen zu den Kapazitätsbedingungen 5.7 bzw. den Auswahlbedingungen 5.8 seien durch μ_t und π_i gegeben. Dann können entsprechend der Theorie der linearen Optimierung aus Kapitel 3.3.2 mittels der folgenden Optimierungsprobleme neue und zulässige Produktionspläne für die Produkte i (= Spalten des RMP) identifiziert werden:

$$\min_{(x,y,s) \in S_i} \sum_{t \in T} (s c_i y_{it} + v c_i x_{it} + h c_i s_{it}) + \sum_{t \in T} (v t_i x_{it} \mu_t) - \pi_i. \quad (5.10)$$

Die n Subprobleme gelten als *Pricing Probleme*. Führt deren Minimierung zu Lösungen mit negativen reduzierten Kosten, so können die entsprechenden Pläne in die Menge der bekannten Produktionspläne \tilde{Q}_i integriert werden. Daraufhin werden durch Lösen des RMP neue Dualvariablen und durch Lösen der Pricing Modelle neue reduzierte Kosten erzeugt. Ein Column Generation Prozess hat eingesetzt.

Der Vorteil der Dekomposition des Ursprungsproblems liegt darin, dass die entstehenden Subprobleme nur für einzelne Produkte definiert sind. Die Komplexität dieser Modelle ist wesentlich geringer und es können i.d.R. schneller Lösungen identifiziert werden. Ein geschicktes Column Management kann dazu beitragen, dass die Gesamtlaufzeit des Verfahrens bis zum Auffinden einer guten Lösung erheblich geringer ist, als bei einem klassischen Verfahren der diskreten Optimierung. Die Kombination von Column Generation und Dekompositionstechniken wurde für diskrete Modelle bereits in der Dienstplanung⁵ und der Tourenplanung⁶ erfolgreich umgesetzt.

⁵ vgl. Huisman ([45]), 2004

⁶ vgl. Sol ([72]), 1994

Im Folgenden wird die Aufspaltung des zeitdiskreten Mehrgüterflussproblems mit Nebenbedingungen aus Kapitel 4.3.4 (im Folgenden als Ursprungsmodell bezeichnet) in Anlehnung an die hier beschriebene Dekompositionsmethode in ein Master Problem und K' Pricing Probleme vorgenommen. Hierdurch wird ermöglicht, im Anschluss einen Column Generation Ansatz zu entwickeln und auf das Problem der Torbelegung anzuwenden.

5.2 Dekompositionsansatz zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne

Im Optimierungsmodell aus Kapitel 4.3.4 müssen K' Nahtouren vom gemeinsamen Quellknoten Q des Netzwerks $N = (V, A, c)$ über die die Fernrelationen darstellenden Knoten aus der Knotenebene V_5 zur Senke S geroutet werden. Bevor im Folgenden für diese Aufgabe ein Dekompositionsansatz entwickelt wird müssen zunächst noch einige erforderliche Definitionen und Notationen getroffen werden:

Definition 5.1 (Zielknoten)

Als Zielknoten wird ein Knoten t_l der Ebene V_5 des Netzwerks N bezeichnet. Dieser repräsentiert die Fernrelation $l \in L$ und hat einen Bedarf von d_{kl} LE der Nahtour $k \in K$.

Durch den strukturierten Aufbau der Knotenmengen V_1 und V_4 können Knoten unterschiedlicher Zeitscheiben, die das gleiche Eingangstor $i \in I \cup M$ oder das gleiche Ausgangstor $j \in M \cup J$ darstellen, identifiziert und in Mengen zusammengefasst werden:

Definition 5.2 (Knotenmengen gleicher Eingangs- oder Ausgangstore)

Es sei $i \in I \cup M$ ein Eingangstor. Die Menge aller Knoten aus der Knotenebene V_1 , die i in unterschiedlichen Zeitscheiben repräsentiert, ist wie folgt gegeben:

$$J_e^i = \bigcup_{t=1}^{T'} \{v_{(1+i+(t-1)*(I'+M'))}\} \subset V_1.$$

Es sei $j \in M \cup J$ ein Ausgangstor. Die Menge aller Knoten aus der Knotenebene V_4 , die auf j in unterschiedlichen Zeitscheiben t verweist, ist wie folgt gegeben:

$$J_a^j = \bigcup_{t=1}^{T'} \{v_{(1+V'_1+V'_2+V'_3+j+(t-1)*(M'+J'))}\} \subset V_4.$$

Definition 5.3 (Knoteninzidenz)

Liegt ein Knoten $v \in V$ auf der Kante $arc_i = (a, b)$, so ist die Kante mit dem Knoten inzident:

$$b_{arc_i}^v := \begin{cases} 1, & \text{falls } \{a, b\} \cap \{v\} \neq \emptyset \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Definition 5.4 (Ausgangstor-Fernrelation-Inzidenz)

Liegt ein Knoten $v \in J_a^j$ und ein Zielknoten $t_l \in V_5$ auf der Kante $arc_i = (a, b) \in A_5$, so ist die Kante mit dem Ausgangstor $j \in M \cup J$ und der Fernrelation $l \in L$ inzident:

$$m_{arc_i}^{j,l} := \begin{cases} 1, & \text{falls } \{a\} \cap \{v\} \neq \emptyset \wedge \{b\} \cap \{t_l\} \neq \emptyset \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Definition 5.5 (Flussstärke und Kosten)

Die Stärke des Flusses (in Ladeeinheiten), der über eine Kante $arc_i \in A$ geschickt wird, ist durch x_{arc_i} gegeben. Die Kosten für die Nutzung der Kante pro Ladeeinheit betragen c_{arc_i} und entsprechen den Kantenkosten des Netzwerks N^7 .

Definition 5.6 (Zulässiger Pfad durch das Netzwerk N)

Unter einem Pfad p durch das Netzwerk N wird eine Folge von Kanten $(arc_1, arc_2, \dots, arc_n)$ verstanden, für die die folgenden Eigenschaften gelten:

- Für je zwei aufeinander folgende Kanten $arc_i = (a_i, b_i)$ und $arc_j = (a_j, b_j)$ aus dem Pfad p ist $a_j = b_i$.
- Der Startknoten a_1 ist gleich der Quelle Q , der Endknoten b_n gleich der Senke S .
- Es sei $j \in M$ ein Mischtor. Dann ist für den Pfad p folgende Aussage wahr:

$$\left(\bigcup_{i=1}^n \{a_i, b_i\} \cap J_e^j \right) = \emptyset \vee \left(\bigcup_{i=1}^n \{a_i, b_i\} \cap J_a^j \right) = \emptyset.$$

Letztere Eigenschaft führt dazu, dass ein Pfad p nicht durch Knoten aus V_1 und aus V_4 laufen darf, die auf das gleiche Mischtor j verweisen (siehe NB 16).

Durch die Struktur des Netzwerks N ergibt sich, dass ein Pfad aus mindestens sechs Kanten besteht. Nach Integration der Rückführungskanten in A_3 und A_4 , die das "Stehenbleiben auf einer Logistikfläche" über die Dauer einer Zeitscheibe hinweg angeben, ist allerdings möglich, dass der Pfad mehr als sechs Kanten umfasst. Sämtliche der Kanten arc_i des Netzwerks N sind gerichtete Kanten. Hierdurch ist gewährleistet, dass innerhalb eines Pfads keine Kreisläufe auftreten können.

Definition 5.7 (Zulässiger Pfad für eine Nahtour k)

Ein zulässiger Pfad $p_k = (arc_1, \dots, arc_n)$ für eine Nahtour k durch das Netzwerk N ist wie folgt definiert:

- Der Pfad p_k ist ein zulässiger Pfad auf N nach Definition 5.6.
- Ist die erste Kante arc_1 des Pfads p_k mit dem Knoten $v = v_{(1+i+(t-1)*(I'+M'))} \in J_e^i$ inzident, so gilt:

- $d(a^k) \leq t \leq d(b^k)$ (NB 1).
- $x_{arc_1} \leq \left\lceil \frac{p^{a^k}}{e} \right\rceil$ bzw. $x_{arc_1} \leq \left\lfloor \frac{p^{b^k}}{e} \right\rfloor$, falls $t = d(a^k)$ bzw. $t = d(b^k)$ (NB 24).

⁷ Diese Kosten sind unabhängig vom Gut k definiert worden.

⁸ zur Definition *Kreise in Graphen* vgl. Domschke ([29]), 1990, S. 3

Definition 5.8 (Zulässiges Routing für eine Nahtourk)

Die nichtleere Menge $R_k = \{(arc_1, x_{arc_1}, c_{arc_1}), \dots, (arc_m, x_{arc_m}, c_{arc_m})\}$, bestehend aus Kanten, Flüssen und Kosten, ist ein zulässiges Routing für die Nahtourk, falls die m Kanten in U Pfaden organisiert sind, die nach Definition 5.7 für die Nahtourk zulässig sind ($U \geq L'$). Zusätzlich müssen in Anlehnung an Kapitel 4.2 die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

1. Für jeden Zielknoten $t_l \in V_5$ gilt: $\sum_{i=1}^m b_{arc_i}^{t_l} * x_{arc_i} = \frac{d_{kl}}{2}$.
(Für jeden Zielknoten muss es mindestens eine Kante geben, welche mitt_l inzident ist und die addierten Flussstärken der zu dem Zielknoten t_l inzidenten Kanten entsprechen dem Sendungsmix.)
2. Es existiert genau ein $i \in I \cup M$, so dass für alle Kanten $arc_j = (Q, b_j)$ gilt: $b_j \in J_e^i$.
(Alle Kanten der ersten Ebene A_1 sind mit Knoten aus der Menge V_1 inzident, die ein und das gleiche Eingangstor $i \in I \cup M$ darstellen.)
3. Für je zwei Kanten arc_i und arc_k aus A_5 mit den Ausgangstor-Fernrelation-Inzidenzen $m_{arc_i}^{j_i, l_i} = m_{arc_k}^{j_k, l_k} = 1$ gilt: $(j_i = j_k) \Leftrightarrow (l_i = l_k)$.
(Bei zwei beliebigen Kanten aus A_5 im Routing darf eine Relation nur dem gleichen Ausgangstor zugeordnet werden. Des Weiteren ist pro Tor maximal eine Relation erlaubt.)
4. Alle Kanten der Ebene A_1 müssen zu Knoten aus V_1 inzident sein, die die Durchgängigkeit der Andockphase gewährleisten (NB 5).
5. Für alle Tupel (arc_i, x_{arc_i}) gilt: $arc_i^{cap_{min}} \leq x_{arc_i} \leq arc_i^{cap_{max}}$.
(Einhaltung der minimalen bzw. maximalen Kapazitäten der Kanten.)
6. Für alle Tupel (arc_i, x_{arc_i}) mit $arc_i \in A_{2t}$ gilt: $\frac{\alpha * x_{arc_i} * arc_i^{laenge} * 60}{gent} \leq q * r_{ent}$.
(Die Flussstärke aller Kanten, die zur Menge A_{2t} (Entladung in Zeitscheibe t) gehören, muss die vorgegebenen Ressourcenkapazitäten für diese Menge einhalten⁹.)

Wird das Netzwerk aus Abbildung 4.4 beispielhaft zugrunde gelegt, so ist ein zulässiges Routing R_2 für die zweite Nahtour wie folgt gegeben:

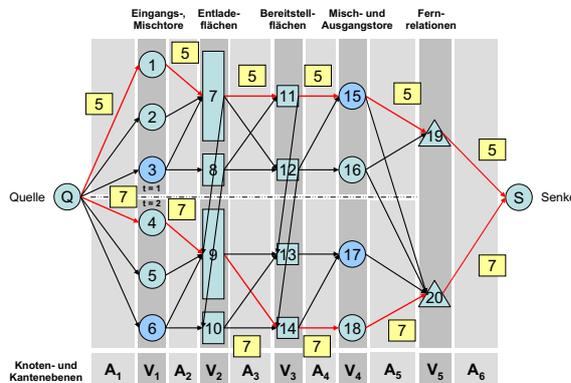


Abbildung 5.1: Beispiel eines zulässigen Routings

⁹ Gleiches gilt für die Kapazitäten der Prozesse Verbringung und Beladung und deren Kantenmengen A_{3t} und A_{4t} , was aus Platzgründen nicht aufgeführt wird.

Hierbei wurde angenommen, dass die Nahtour insgesamt 12 LE umfasst, von denen 5 zur Fernrelation 1 und 7 zur Fernrelation 2 umgeschlagen werden sollen. Falls vereinfachend die Kosten c_{arc_i} aller Kanten Eins betragen, wird das Routing R_2 durch die folgende Menge gebildet:
 $R_2 = \{((Q, 1), 5, 1), ((Q, 4), 7, 1), ((1, 7), 5, 1), ((4, 9), 7, 1), ((7, 11), 5, 1), ((9, 14), 7, 1), ((11, 15), 5, 1), ((14, 18), 7, 1), ((15, 19), 5, 1), ((18, 20), 7, 1), ((19, S), 5, 1), ((20, S), 7, 1)\}$

Anmerkung zum Begriff Pfad:

Die Begriffe *zulässiger Pfad durch das Netzwerk* und *zulässiger Pfad für eine Nahtour* wurden eingeführt, um bestimmte strukturelle Anforderungen an die Kanten, die ein Routing bilden, zu erfüllen. Sie erleichtern und kürzen somit den Abschnitt in diesem Kapitel zu den erforderlichen Definitionen. Zusätzlich helfen sie beim (visuellen) Verständnis des Begriffs *zulässiges Routing einer Nahtour*. Es wird in den folgenden Modellen aber nicht weiter mit dem Begriff Pfad gearbeitet, sondern mit der Menge an Kanten arc_1, \dots, arc_m sowie deren Flussstärken und Kosten, die ein Routing R_k bilden.

Definition 5.9 (Routingkosten)

Für ein Routing R_k seien die Routingkosten c_{R_k} wie folgt gegeben: $c_{R_k} := \sum_{i=1}^m c_{arc_i} * x_{arc_i}$.

Definition 5.10 (Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnung)

Existiert eine Kante $arc_i \in R_k$ mit $m_{arc_i}^{j,l} = 1$, so hat das Routing insgesamt die Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnung $m_{R_k}^{j,l}$:

$$m_{R_k}^{j,l} := \begin{cases} 1, & \text{falls } \sum_{i=1}^m m_{arc_i}^{j,l} \geq 1 \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Definition 5.11 (Menge zulässiger Routings für eine Nahtour)

Für jede Nahtour k wird durch $\Omega_k = \{1, \dots, \Omega'_k\}$ die Menge aller zulässigen Routings bezeichnet. Die Anzahl aller zulässigen Routings für eine Nahtour k ist durch Ω'_k gegeben. Der Ausdruck R_k^i referenziert auf das i -te Routing der Nahtour k in der Menge Ω_k ($i \in \Omega_k$).

Anmerkung zu den Nebenbedingungen:

Einige der Nebenbedingungen der Torbelegungsplanung (NB 1 - NB 27 in Kapitel 4.2) werden durch die hier aufgestellten Definitionen, die Einführung des Begriffs Routing und durch das zugrunde liegende Netzwerk bereits erfüllt:

Durch die gegebene Netzwerkstruktur werden automatisch die Nebenbedingungen NB 6, 7, 12 - 14 und 23 eingehalten. Durch die Bedingung 1 der Definition 5.8 eines zulässigen Routings für eine Nahtour k wird die Einhaltung des Sendungsmixes und daher in Summe der Entlademengen der Nahtouren sowie der Belademengen der Fernrelationen garantiert (NB 5, 8, 9). Bedingung 2 der Definition sowie die Voraussetzung, dass eine Routingmenge nicht leer sein darf, führen dazu, dass die Regeln zur Abwicklung einer Nahtour an genau einem Tor zutreffen (NB 2 und 3). Bedingung 4 in Kombination mit Definition 5.7 eines zulässigen Pfads für eine Nahtour k gewährleisten die Auswahl von Kanten und Flüssen, die die Zeitrestriktionen NB 1, 4, 24 (Einhaltung der Fahrpläne, durchgängige Entladung etc.) beachten. Bereits bei Definition 5.6

eines zulässigen Pfads durch das Netzwerk N wurde die Bedingung, dass ein Mischtor nicht gleichzeitig als Eingang und als Ausgang genutzt werden darf (NB 16), berücksichtigt. Die Kirchhoffsche Knotenregel (NB 26) wird hinfällig, nachdem an die Kanten eines Routings die Bedingung gestellt wurde, dass sie in Pfaden organisiert sind.

Sämtliche Kapazitätsrestriktionen (NB 15, 19 - 22, 25 und 27) werden durch die Definition eines zulässigen Routings bei der Auswahl der Kanten für die Ladeeinheiten *einer* Nahtour berücksichtigt. Werden aber die Routings aller Nahtouren übereinander gelegt, so sind die Nebenbedingungen in Summe nicht mehr garantiert, es bedarf hier einer weiteren Überprüfung. Gleiches gilt für die Restriktionen, dass ein Ausgangstor nur durch maximal eine Fernrelation belegt wird bzw. eine Fernrelation über genau ein Tor abgefertigt werden darf (NB 10, 11 und 17). Bedingung 3 der obigen Definition sorgt lediglich dafür, dass diese Forderungen für die Flüsse der Ladeeinheiten einer einzelnen Nahtour k zutreffen.

Vorstellung des Lösungsansatzes:

Die Schwierigkeit bei der Lösung des zeitdiskreten Mehrgüterflussproblems mit Nebenbedingungen (Ursprungsmodell) mittels Standardverfahren wie dem Branch-and-Bound oder dem Branch-and-Cut liegt in der hohen Komplexität des Problems. Herkömmliche Verfahren können bei größeren Probleminstanzen nur noch wenige Lösungen mit sukzessive sinkenden Zielfunktionswerten ermitteln. Ein Nachweis der Optimalität durch das Schließen der MIP-Gap auf eine akzeptable Toleranz ist nicht mehr möglich. Dies liegt u.a. in der hohen Anzahl an Entscheidungsvariablen und Nebenbedingungen begründet, die bei großen Probleminstanzen das Optimierungsmodell charakterisieren.

Die Einführung der Definition *zulässiges Routing einer Nahtour* bringt folgende Vorteile:

- Beim Aufbau der Routings werden bereits einige der Restriktionen eingehalten, die das Problem schwer machen. Vor allem die Bündelung aller Flüsse einer Nahtour k im gleichen Eingangstor i fällt hierunter.
- Das Ursprungsproblem zerfällt in mehrere Teilprobleme (Dekomposition), die in sich geschlossen einfacher zu lösen sind und die Anwendung des Column Generation ermöglichen.

Die Idee liegt nun darin, in einem ersten Schritt zulässige Routings für sämtliche Nahtouren zu erzeugen. Aus diesen wird anschließend für jede Nahtour kostenoptimal genau eines ausgewählt. Dabei müssen bestimmte verbleibende Restriktionen eingehalten werden (Kapazitätsrestriktionen und ausgangsseitige Zuordnungsrestriktionen). Wird anschließend festgestellt, dass sich noch weitere Routings erzeugen lassen, die zu besseren Ergebnissen führen, so werden diese zu der Routingmenge hinzugefügt und ein neuer Auswahlprozess angestoßen (Column Generation Konzept). Es kann folglich in zwei getrennten Modellen (Modell zur Erzeugung von Routings, Modell zur Auswahl von Routings) gearbeitet werden.

Das Modell zur Auswahl kostenoptimaler Routings wird im Folgenden vorgestellt. Die Definition der Entscheidungsvariablen lautet:

$$\psi_{R_k^i} := \begin{cases} 1, & \text{falls das } i\text{-te Routing } (i \in \Omega_k) \text{ für Nahtour } k \text{ ausgewählt wird} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Um unterscheiden zu können, zu welchem Routing R_k^i eine Kante arc_j bzw. ein Fluss x_{arc_j} gehört, erhalten die Elemente aus Definition 5.8 zusätzlich einen hoch gestellten Index R_k^i .

Modell zur optimalen Auswahl von Routings für die Torbelegungsplanung^{10,11}:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} c_{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \quad (5.11)$$

u.d.N.

$$\sum_{i \in \Omega_k} \psi_{R_k^i} = 1, \forall k \in K \quad (5.12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} x_{arc_j}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq arc_j^{capmax}, \forall arc_j \in A \quad (5.13)$$

$$\sum_{s \in A_{2t}} \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} ent_{arc_s} * x_{arc_s}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq q * r_{ent}, \forall t \in T \quad (5.14)$$

$$\sum_{s \in A_{3t}} \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} ver_{arc_s} * x_{arc_s}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq q * r_{ver}, \forall t \in T \quad (5.15)$$

$$\sum_{s \in A_{4t}} \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} bel_{arc_s} * x_{arc_s}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq q * r_{bel}, \forall t \in T \quad (5.16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} x_{arc_{A_{1t}^j}}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq q/e, \forall j \in I \cup M, \forall t \in T \quad (5.17)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{s \in A_{5l}^j} \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} x_{arc_s}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq q/b, \forall j \in M \cup J, \forall t \in T \quad (5.18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} \sum_{s \in P(j)} x_{arc_{sj}}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq f, \forall j \in V_2 \cup V_3 \quad (5.19)$$

$$\sum_{j \in M \cup J} \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} x_{arc_{d(a^l)A_{5l}^j}}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq \left[\frac{p^{a^l}}{b} \right], \forall l \in L \quad (5.20)$$

$$\sum_{j \in M \cup J} \sum_{k \in K} \sum_{i \in \Omega_k} x_{arc_{d(b^l)A_{5l}^j}}^{R_k^i} * \psi_{R_k^i} \leq \left[\frac{p^{b^l}}{b} \right], \forall l \in L \quad (5.21)$$

$$(K' - 1) * \left(1 - \sum_{i \in \Omega_{k'}} m_{R_{k'}^i}^{j,l'} * \psi_{R_{k'}^i} \right) \geq \sum_{\substack{k \in K, \\ k \neq k'}} \sum_{\substack{j \in M \cup J, \\ j \neq j'}} \sum_{i \in \Omega_k} m_{R_k^i}^{j,l'} * \psi_{R_k^i} \quad (5.22)$$

$$\forall k' \in K, \forall l' \in L, \forall j' \in M \cup J$$

$$(K' - 1) * \left(1 - \sum_{i \in \Omega_{k'}} m_{R_{k'}^i}^{j,l'} * \psi_{R_{k'}^i} \right) \geq \sum_{\substack{k \in K, \\ k \neq k'}} \sum_{l \in L} \sum_{i \in \Omega_k} m_{R_k^i}^{j,l'} * \psi_{R_k^i} \quad (5.23)$$

$$\forall k' \in K, \forall l' \in L, \forall j' \in M \cup J$$

$$\psi_{R_k^i} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall i \in \Omega_k \quad (5.24)$$

In der Zielfunktion werden die Gesamtkosten der ausgewählten bzw. aktiven Routings minimiert.

Der erste Nebenbedingungstyp 5.12 garantiert, dass für jede Nahtour k genau ein Routing R_k^i aus der Menge aller für k zulässigen Routings Ω_k ausgewählt wird.

¹⁰ Abkürzende Schreibweise im Folgenden: MOAR

¹¹ Es gilt zu beachten, dass $x_{arc_i}^{R_k^i}$ innerhalb von MOAR keine Entscheidungsvariable ist, da ihre Werte bereits vorab für die Routings erzeugt wurden.

Die Aufgabe des zweiten Nebenbedingungstyps 5.13 liegt darin, den maximalen Fluss, der in Summe über eine Kante aus A nach Auswahl aller Routings fließt, unterhalb der jeweils vorgegebenen Kantenkapazität zu halten. Ist eine Kante arc_j nicht in einem Routing R_k^i enthalten, so nimmt der Ausdruck $x_{arc_j}^{R_k^i}$ den Wert Null an und ist somit nicht bindend.

Die Nebenbedingungstypen 5.14- 5.16 dienen der Einhaltung der maximalen Ressourcenbeanspruchung je Hauptprozess und Zeitscheibe. Hierbei wird für alle aktiven Routings überprüft, ob deren Kanten zu den Kantenmengen A_{2_t} (Entladung), A_{3_t} (Verbringung) und A_{4_t} (Beladung) einer Zeitscheibe t gehören. Ist dies der Fall, so müssen die Flusstärken den vorgeschriebenen maximalen Mengen entsprechen. Im Modell wird die abkürzende Schreibweise $ent_{arc_j} = \alpha * \frac{arc_j^{laenge} * 60}{g_{ent}}$, $ver_{arc_j} = \alpha * \frac{arc_j^{laenge} * 60}{g_{ver}}$, $bel_{arc_j} = \alpha * \frac{arc_j^{laenge} * 60}{g_{bel}}$ verwendet.

Die Nebenbedingungen 5.17 und 5.18 garantieren, dass bei Überdeckung der Routings aller Nahtouren in einer optimalen Lösung nicht die maximalen Entlade- bzw. Beladepkapazitäten je Tor und Zeitscheiben überschritten werden. Die Kante $arc_{A_{1_t}^j}$ entspricht der Kante der Menge A_{1_t} , die vom Quellknoten zum Tor $j \in I \cup M$ in Zeitscheibe t geht. Im Fall der Beladepkapazität, müssen mehrere Kanten untersucht werden. Dies geschieht über die Mengen ${}^t A_{5_1^j} - {}^t A_{5_{L'}^j}$, die alle von einem Ausgangstor $j \in M \cup J$ in einer Zeitscheibe t abgehenden Kanten umfassen.

Durch die Nebenbedingungen des Typs 5.19 wird die Aktivität in den die Entladeflächen und die Bereitstellflächen darstellenden Knoten der Ebenen V_2 und V_3 gesteuert. Sind die Kanten der aktiven Routings mit einem Knoten j dieser Mengen inzident, so werden die Flusstärken aufaddiert und müssen unterhalb der definierten Schwelle von f Einheiten liegen.

Die Ungleichungen vom Typ 5.20 und 5.21 garantieren die Einhaltung der Belademengen der abgehenden Relationen in deren Ankunfts- bzw. Abfahrtszeitscheibe (${}^{d(a^l)} A_{5_l^j}$ und ${}^{d(b^l)} A_{5_l^j}$).

Bisher ist noch nicht gewährleistet, dass bei einer Überdeckung sämtlicher K' aktiven Routings für jede Fernrelation l und jedes Ausgangstor j die technischen Zuordnungsrestriktionen eingehalten werden. Dies wurde durch die Definition 5.8 nur für die einzelnen Routings k gefordert (Bedingung 3). Es ist somit für zwei Nahtouren k_1 und k_2 , die beide die Fernrelation l bedienen, möglich, dass im Routing $R_{k_1}^{i_1}$ diese Relation über das Tor j_1 abgewickelt wird und im Routing $R_{k_2}^{i_2}$ über das Tor j_2 . Um solche Lösungen zu unterdrücken, wird die Nebenbedingung 5.22 eingeführt. In dieser wird zunächst eine Nahtour k' , eine Fernrelation l' und ein Ausgangstor j' festgehalten. Anschließend wird für die Routings $R_{k'}^i$ durch die Multiplikation der Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnungen zu dem Tor j' und der Fernrelation l' überprüft, ob hier eine Zuordnung stattgefunden hat (d.h. $\sum_{i \in \Omega_{k'}} m_{R_{k'}^i}^{j',l'} * \psi_{R_{k'}^i} = 1$). Ist dies der Fall, so muss für alle anderen Nahtouren $k \neq k'$ gelten, dass keine Routings ausgewählt werden dürfen, die die Fernrelation l' einem anderen Tor $j \neq j'$ zuweisen. Insgesamt ergibt sich:

$$\forall k' \in K, \forall l' \in L, \forall j' \in M \cup J: \sum_{i \in \Omega_{k'}} m_{R_{k'}^i}^{j',l'} * \psi_{R_{k'}^i} = 1 \Rightarrow$$

$$\sum_{\substack{k \in K, \\ k \neq k'}} \sum_{\substack{j \in M \cup J, \\ j \neq j'}} \sum_{i \in \Omega_k} m_{R_k^i}^{j,l'} * \psi_{R_k^i} = 0. \quad (5.25)$$

Routings, welche zu anderen Konstellationen führen, können nicht ausgewählt werden. Bedient eine Nahtour k' eine Relation l' , so kann nach Definition 5.8 und 5.10 in einem zulässigen

Routing die Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnung $m_{R_k^i}^{j,l'}$ für nur ein j' den Wert Eins annehmen. Somit lässt sich die Bedingung 5.25 in die in 5.22 stehende Form äquivalent umformulieren.

Zuletzt muss noch überprüft werden, dass je Ausgangstor j maximal eine Fernrelation l zugeordnet ist, was nach der Überdeckung der Routings einzelner Nahtouren nicht mehr gewährleistet werden kann. Hierfür steht die Nebenbedingung 5.23, welche nach einem ähnlichen Muster wie 5.22 hergeleitet wird.

Das hier vorgestellte Modell zur Auswahl optimaler Routings für die Nahtouren in einem Umschlagssystem kann im Rahmen eines Column Generation Verfahrens als Master Problem (MP) agieren.

Definition 5.12 (Master Problem der Torbelegungsplanung)

Gegeben ist das auf dem Dekompositionsansatz basierende Modell zur Auswahl optimaler Routings (MOAR). Nach Relaxierung der Entscheidungsvariablen ($0 \leq \psi_{R_k^i} \leq 1$) wird das resultierende Modell im Folgenden als Master Problem (= MP) der Torbelegungsplanung bezeichnet.

Es ist zu beachten, dass das MP nicht mehr diskret sondern stetig ist.

Die verbleibenden Bausteine des CG Konzeptes, d.h. das Restricted Masterproblem (RMP), dessen Dualvariablen, das Pricing Problem sowie das Design des eigentlichen Lösungsverfahrens werden in den folgenden beiden Kapiteln entwickelt.

5.3 Restricted Master Problem, Pricing Problem und Dualvariablen

Die Anzahl der Entscheidungsvariablen bzw. der Spalten im MP für die Torbelegungsplanung ist von der Anzahl der Nahtouren K' sowie der Anzahl an zulässigen Routings je Nahtour Ω_k' abhängig. Die Menge der zulässigen Routings einer Nahtour kann unter Umständen sehr groß werden. Wird sie komplett im Entscheidungsprozess berücksichtigt, so entwickelt sich die Auswahl eines optimalen Routings für jede Nahtour erneut zu einem komplexen mathematischen Problem. Aufgrund dieses Zusammenhangs wird das MP für die Torbelegungsplanung aus Kapitel 5.2 vereinfacht, indem es nur über Teilmengen an zulässigen Routings $\omega_k \subset \Omega_k$ definiert wird. Die Anzahl der Elemente der Teilmengen ist mit ω_k' gegeben. Das so entstehende vereinfachte Problem bildet im folgenden Lösungsverfahren das Restricted Master Problem.

Definition 5.13 (Restricted Master Problem der Torbelegungsplanung)

Wird der Lösungsraum des in Definition 5.12 vorgestellten MP für jede Nahtour k auf eine Teilmenge ω_k der Menge aller zulässigen Routings Ω_k eingeschränkt, so entsteht ein Problem, welches im Folgenden als Restricted Master Problem (= RMP) definiert ist.

Im Rahmen eines allgemeinen Column Generation Verfahrens (siehe Abbildung 3.6) wird zunächst das RMP in seiner primalen und dualen Form von einem exakten Optimierungsverfahren gelöst. Ziel ist u.a., die Dualvariablen des RMP zu erlangen. Diese werden anschließend für die Bestimmung neuer Spalten mit negativen reduzierten Kosten verwendet.

Bei der Definition des dualen Problems zu einem gegebenen primalen Problem entsprechend der primal-dualen Theorie aus Kapitel 3.3.2 wird für jede Nebenbedingung des primalen Problems eine Dualvariable eingeführt. Ist die Nebenbedingung eine Gleichung, so ist die Dualvariable im Vorzeichen unbeschränkt. Im Falle einer Ungleichung der Form $g(x) \leq 0$ ist sie positiv und bei einer Ungleichung der Form $g(x) \geq 0$ negativ.

Die im weiteren Lösungsprozess benötigten Dualvariablen des RMP der Torbelegungsplanung werden in der folgenden Tabelle in ihren Dimensionen und Vorzeichen aufgeführt.

Definition 5.14 (Dualvariablen des RMP der Torbelegungsplanung)

Die folgenden Dualvariablen definieren das zum RMP der Torbelegungsplanung duale Problem:

Dualvariable	Dimension	Vorzeichen	Nebenbedingung
u_k	$k \in K$	unbeschränkt	5.12
$ca_{arc_i}^1$	$arc_i \in A$	+	5.13
ca_t^2, ca_t^3, ca_t^4	$t \in T$	+	5.14 - 5.16
$ca_{i,t}^5$	$\forall i \in I \cup M, \forall t \in T$	+	5.17
$ca_{j,t}^6$	$\forall j \in M \cup J, \forall t \in T$	+	5.18
ca_j^7	$j \in V_2 \cup V_3$	+	5.19
ca_l^8, ca_l^9	$l \in L$	+	5.20, 5.21
$ca_{k,j,l}^{10}, ca_{k,j,l}^{11}$	$k \in K, j \in M \cup J, l \in L$	-	5.22, 5.23

Tabelle 5.1: Dualvariablen des RMP der Torbelegungsplanung

Der letzte noch fehlende Baustein für die Entwicklung und Anwendung eines Column Generation Ansatzes ist das Pricing Modell. Das RMP ist über dem eingeschränkten Lösungsraum $0 \leq \psi_{R_k^i} \leq 1$ mit $i \in \omega_k$ und $k \in K$ definiert. In Anlehnung an das Theorem 3.5 zur Optimalität des Column Generation ist eine optimale Lösung des RMP über dieser Teilmenge des Lösungsraums auch für das gesamte Problem optimal, falls in der Menge $\Omega_k \setminus \omega_k$ für keine Nahtour mehr Routings mit negativen reduzierten Kosten gefunden werden können. Die Suche nach Spalten mit negativen reduzierten Kosten innerhalb dieses verbleibenden Teils des Lösungsraums ist eine erste Aufgabe des noch zu definierenden Pricing Problems der Torbelegungsplanung. Im vorliegenden Fall sind nicht alle zulässigen Routings, d.h. alle Elemente der Mengen Ω_k , vorab bekannt. Bereits die Erzeugung aller zulässigen Routings für jede Nahtour durch das Netzwerk stellt ein kombinatorisch schweres Problem dar, welches nicht mehr in vertretbarer Zeit lösbar ist. Eine zweite Aufgabe des zu entwickelnden Pricing Modells ist somit die Erzeugung neuer Spalten. Es handelt sich demnach um ein implizites Column Generation, bei dem die Spalten während der Laufzeit des Verfahrens erzeugt werden.

Im Folgenden werden zunächst die reduzierten Kosten des RMP der Torbelegungsplanung definiert, welche anschließend in das Pricing Modell eingehen.

Für ein allgemeines lineares und stetiges Optimierungsproblem, welches über dem \mathbb{R}^n gegeben ist, setzen sich die n reduzierten Kosten nach Definition 3.3 aus dem Koeffizienten der Zielfunktion, ergänzt um das Produkt aus der entsprechenden Dualvariable und dem Koeffizienten der Nebenbedingungsmatrix zusammen: $s_i = c_i - u^T a_i$. Das RMP der Torbelegungsplanung

ist über dem $[0; 1]^{\omega_1 + \dots + \omega_{K'}}$ aufgespannt. Die Spalten der Nebenbedingungsmatrix können anhand des Modells MOAR aus Kapitel 5.2 abgelesen werden. Durch den Typ der Nebenbedingung ($\leq, \geq, =$) wird in Definition 5.14 das Vorzeichen der Dualvariablen bestimmt.

Definition 5.15 (Reduzierte Kosten des RMP der Torbelegungsplanung)

Die reduzierten Kosten $rc_{R_k^i}$ mit $i \in \{1, \dots, \omega'_k\}$ und $k \in K$ des RMP der Torbelegungsplanung haben die folgende Gestalt:

$$\begin{aligned}
 rc_{R_k^i} = & c_{R_k^i} - u_k + \sum_{arc_j \in A} x_{arc_j}^{R_k^i} * ca_{arc_i}^1 + \sum_{t \in T} \sum_{s \in A_{2t}} ent_{arc_s} * x_{arc_s}^{R_k^i} * ca_t^2 \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{s \in A_{3t}} ver_{arc_s} * x_{arc_s}^{R_k^i} * ca_t^3 + \sum_{t \in T} \sum_{s \in A_{4t}} bel_{arc_s} * x_{arc_s}^{R_k^i} * ca_t^4 \\
 & + \sum_{j \in I \cup M} \sum_{t \in T} x_{arc_{A_{1t}^j}}^{R_k^i} * ca_{i,t}^5 + \sum_{j \in M \cup J} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in A_{5t}^j} x_{arc_s}^{R_k^i} * ca_{j,t}^6 \\
 & + \sum_{j \in V_2 \cup V_3} \sum_{s \in P(j)} b_{arc_{sj}}^j * x_{arc_{sj}}^{R_k^i} * ca_j^7 + \sum_{l \in L} \sum_{j \in M \cup J} x_{arc_{d(a^l)A_{5l}^j}}^{R_k^i} * ca_l^8 \\
 & + \sum_{l \in L} \sum_{j \in M \cup J} x_{arc_{d(b^l)A_{5l}^j}}^{R_k^i} * ca_l^9 - \sum_{j \in M \cup J} \sum_{l \in L} (K' - 1) * m_{R_k^i}^{j,l} * ca_{k,j,l}^{10} \\
 & - \sum_{j \in M \cup J} \sum_{l \in L} (K' - 1) * m_{R_k^i}^{j,l} * ca_{k,j,l}^{11}
 \end{aligned}$$

Feststellung 1:

Der erste Teil der reduzierten Kosten $c_{R_k^i}$ entspricht aufgrund der Definitionen 5.5 und 5.9 der Zielfunktion des zeitdiskreten Mehrgüterflussproblems mit Nebenbedingungen aus Kapitel 4.3.4, falls hier die Dimension k festgehalten wird:

$$c_{R_k^i} = \sum_{i=1}^m c_{arc_i}^{R_k^i} * x_{arc_i}^{R_k^i} = A + B + C.$$

Die Anzahl der Kanten m wird durch das jeweilige Routing R_k^i bestimmt und die Summanden A , B und C sind wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 A & := \sum_{t=1}^{T'} \sum_{\substack{j \in \{1, \dots, m\} \text{ mit} \\ arc_j \in A_{2t}}} B^t * x_{arc_j}^k * \left(\frac{arc_j^{laenge} * c_{ent}}{g_{ent}} \right) \\
 B & := \sum_{t=1}^{T'} \sum_{\substack{j \in \{1, \dots, m\} \text{ mit} \\ arc_j \in A_{3t}}} x_{arc_j}^k * \left(\frac{arc_j^{laenge} * c_{ver}}{g_{ver}} \right) \\
 C & := \sum_{t=1}^{T'} \sum_{\substack{j \in \{1, \dots, m\} \text{ mit} \\ arc_j \in A_{4t}}} x_{arc_j}^k * \left(\frac{arc_j^{laenge} * c_{bel}}{g_{bel}} \right).
 \end{aligned}$$

Feststellung 2:

Wird das zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem für nur eine Nahtour k definiert und anschließend optimal gelöst, so ist die Lösung ein zulässiges Routing für diese Nahtour entsprechend der Definition 5.8. Sämtliche Bedingungen aus der Definition zulässiger Routings sowie die Struktur der

Pfade aus Definition 5.7 werden bereits durch die Nebenbedingungen des Ursprungsmodells aus 4.3.4 garantiert. Ebenso vereinfacht sich das zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem stark, wenn es nur noch für eine einzelne Nahtour definiert wird. Es wechselt von einem Mehrgüterflussproblem zu einem "einfachen" Flussproblem, mit nur einem Gut. Dieses ist von einer wesentlich geringeren mathematischen Komplexität und kann mit herkömmlichen Verfahren der diskreten Optimierung vergleichsweise schnell optimal gelöst werden.

Somit wird das noch benötigte Pricing Problem der Torbelegungsplanung, welches zum einen neue Routings erzeugen und zum anderen günstige Routings aufgrund der reduzierten Kosten des RMP identifizieren soll, wie folgt definiert:

Definition 5.16 (Pricing Modell der Torbelegungsplanung)

Das Pricing Modell der Torbelegungsplanung geht auf das zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen aus Kapitel 4.3.4 zurück. Dieses wird für jede Nahtour $k \in K$ separat definiert und mit der folgenden Zielfunktion versehen:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{t=1}^{T'} \left(\sum_{i \in A_{2t}} B^t * x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c_{ent}}{g_{ent}} \right) + \sum_{i \in A_{3t}} x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c_{ver}}{g_{ver}} \right) \right. \\
 & + \left. \sum_{i \in A_{4t}} x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c_{bel}}{g_{bel}} \right) \right) - u_k + \sum_{arc_j \in A} x_{arc_j}^k * ca_{arc_i}^1 \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{s \in A_{2t}} ent_{arc_s} * x_{arc_s}^k * ca_t^2 + \sum_{t \in T} \sum_{s \in A_{3t}} ver_{arc_s} * x_{arc_s}^k * ca_t^3 \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{s \in A_{4t}} bel_{arc_s} * x_{arc_s}^k * ca_t^4 + \sum_{j \in IUM} \sum_{t \in T} x_{arc_{A_{1t}^i}}^k * ca_{i,t}^5 \\
 & + \sum_{j \in MUJ} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in A_{5l}^j} x_{arc_s}^k * ca_{j,t}^6 + \sum_{j \in V_2 \cup V_3} \sum_{s \in P(j)} x_{arc_{s_j}}^k * ca_j^7 \\
 & + \sum_{l \in L} \sum_{j \in MUJ} x_{arc_{d(a^l) A_{5l}^j}}^k * ca_l^8 + \sum_{l \in L} \sum_{j \in MUJ} x_{arc_{d(b^l) A_{5l}^j}}^k * ca_l^9 \\
 & - \sum_{j \in MUJ} \sum_{l \in L} (K' - 1) * \theta_l^j * ca_{k,j,l}^{10} - \sum_{j \in MUJ} \sum_{l \in L} (K' - 1) * \theta_l^j * ca_{k,j,l}^{11}
 \end{aligned}$$

In allen Termen können die Ausdrücke $x_{arc_i}^k$ durch die Entscheidungsvariablen des Ursprungsmodells $x_{arc_i}^k$ ersetzt werden. Lediglich für die letzten beiden Dualvariablen, welche die korrekte Zuordnung der Fernrelationen zu den Ausgangstoren über alle Routings repräsentieren, wurden nicht die Flussvariablen $x_{arc_i}^k$ eingesetzt, sondern die bereits im Modell existierenden binären Variablen θ_l^j , da diese im zeitdiskreten Mehrgüterflussmodell die Zuordnung einer Fernrelation zu einem Ausgangstor nachhalten. Die Ausdrücke $m_{R_k}^{j,l}$ des RMP sind nicht mehr erforderlich.

Im folgenden Kapitel wird ein heuristisches Verfahren entworfen, das unter Verwendung der hier entwickelten Bausteine das Column Generation Konzept in die Torbelegungsplanung integriert.

5.4 Column Generation Ansatz

Das Lösungsverfahren wird in Abbildung 5.2 in Form einer Pseudocodenotation vorgestellt. Auf die einzelnen Elemente wird im Rahmen dieses Kapitels detailliert eingegangen.

Initialisierung:

Der Lösungsraum, auf dem das RMP bzw. das Modell MOAR definiert sind, besteht aus zulässigen Routings der K' Nahtouren. Diese müssen aufeinander abgestimmt sein, damit das RMP bzw. das Modell MOAR entsprechend der Nebenbedingungen 5.13 - 5.23 eine zulässige Gesamtlösung des Torbelegungsproblems generieren können. Sind im Lösungsraum beispielsweise genau K' Routings enthalten, die sämtlich das i -te Eingangstor in der Zeitscheibe t nutzen, so wird bei einer Überlagerung aller K' Routings die maximale Entladeleistung an diesem Tor aus Bedingung 5.17 überschritten. Eine Aufgabe des heuristischen Verfahrens ist, Routings zu erzeugen, die zulässige Gesamtlösungen erlauben. Zu diesem Zweck wird für das Lösungsverfahren der Begriff eines *Routingsets* definiert:

Definition 5.17 (Routingset)

Unter einem Routingset $S = \{R_1, \dots, R_{K'}\}$ wird eine Menge von K' Routings verstanden, die nach Definition 5.8 einzeln zulässig sind sowie auch in ihrer Überlagerung im gemeinsam genutzten Netzwerk N eine zulässige Gesamtlösung des Torbelegungsproblems bilden:

- *Die maximalen Kapazitäten gemeinsam genutzter Ressourcen werden nicht überschritten, d.h. es gelten die Bedingungen 5.13 - 5.21 des Modells MOAR*
- *Die Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnung (siehe Definition 5.10) nehmen in allen Routings für die gleichen Indizes $l \in L$ und $j \in M \cup J$ den Wert Eins an.*

Verfahren zur Erzeugung einer Startlösung:

Bei Anwendung des Verfahrens auf verschiedene Testszenarien hat sich gezeigt, dass das Verfahren unabhängig vom Abstand der Startlösung zur späteren besten Lösung ähnlich schnell arbeitet. Eine erste Startlösung, d.h. das Routingset S^0 , wird daher mit einer relativ einfachen Methode entwickelt. Für die Routings aller Nahtouren werden zunächst die Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnungen wie folgt fixiert: $m_{R_k}^{j,l} = 1$, falls $j = l$. Das bedeutet, dass die erste Fernrelation dem ersten Ausgangstor zugeordnet wird, die zweite dem zweiten etc.. Anschließend wird das zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen aus Kapitel 4.3.4 aufgerufen und mit dem Branch-and-Cut Verfahren gelöst. Durch die vorherige Fixierung der ausgangsseitigen Zuordnungen ist dieses Problem von geringerer Komplexität und nicht mehr mit dem QAP verwandt. Innerhalb kurzer Zeit kann eine erste Lösung gefunden werden und das Verfahren bricht ab. Anschließend wird der Zähler i für die Anzahl der Routingsets erhöht und eine Menge O eingeführt. Diese beschreibt den Lösungsraum als Vereinigung aller zu einem Zeitpunkt bekannten und akzeptierten Routingsets. Anders formuliert stellt O den aktiven Column Pool dar, auf dem das RMP arbeitet.

Initialisierung:	
1.	$i = 0$ /* Routingsetcounter */
2.	Finde $S^i = \{R_1^i, \dots, R_{K'}^i\}$ /* Startlösung */
3.	$O = S^i$ /* Menge bekannter Routings */
4.	$i = i + 1$ /* Erhöhe Routingsetcounter */
5.	Setze Kapazitätslimits (cap_1, \dots, cap_9) /* Ressourcenkapazitäten */
Iteration:	
6.	For $i=1$ to v /* Äußere Schleife */
7.	Löse $RMP(O)$ /* Simplexverfahren */
8.	Aktualisiere Dualvariablen /* Mit Lösung aus Schritt 7. */
9.	Loop über $k \in K$ /* Löse K' Pricing Probleme */
10.	Löse $Pricing(k)$ /* Branch-and-Cut Verfahren */
11.	If $obj(Pricing(k)) < 0$ /* Negative reduzierte Kosten */
12.	Merke Routing R_k /* Pot. Aufnahme in O */
13.	Ermittle $red(k)_1, \dots, red(k)_9$ /* Pot. Ressourcenverbrauch */
14.	Ende If
15.	Ende Loop /* Ende Pricing Loop*/
16.	For $j=1$ to w /* Innere Schleife */
17.	Wähle $k' \in K$ mit /* Finde Routing mit kleinsten
18.	$obj(Pricing(k')) = \min_{k \in K} obj(Pricing(k))$ negativen reduzierten Kosten */
19.	$cap_i = cap_i - red(k')_i, i = 1, \dots, 9$ /* Reduziere Kapazitäten */
20.	$S^i = S^i \cup R_{k'}$ /* Eröffne neues Routingset */
21.	$\theta_l^j = m_{R_{k'}}^{j,l}, \forall k \in K \setminus k'$ /* Gleiche Ausgangstor-Fern-
22.	$U = K \setminus k', obj(Pricing(k')) = \infty$ relation-Zuordnung */
23.	While $U \neq \emptyset$ /* Vervollständige Routingset */
24.	Wähle $s' \in U$ mit /* Finde Tour mit größter Ladung
25.	$ZF(s') = \min_{s \in U} ZF(s) \wedge w^{s'} = \max_{s \in U} w^s$ und kleinstem Zeitfenster */
26.	Setze Dualvariablen auf Null
27.	Löse $Pricing(s')$ /* Ursprüngliches Modell
28.	$S^i = S^i \cup R_{s'}$ mit Branch-and-Cut */
29.	$cap_i = cap_i - red(s')_i, i = 1, \dots, 9$ /* Reduziere Kapazitäten */
30.	$U = U \setminus \{s'\}$
31.	Ende While /* Ende Routingset While */
32.	$O = O \cup S^i$ /* Aufnahme Routingset */
33.	$i = i + 1$ /* Erhöhe Routingsetcounter */
34.	Setze Kapazitätslimits (cap_1, \dots, cap_9) /* Ressourcenkapazitäten */
35.	Next j /* Ende innere Schleife */
36.	Next i /* Ende äußere Schleife */
Optimale Auswahl der Routings:	
37.	Löse $MOAR(O)$

Abbildung 5.2: Column Generation Ansatz zur Bestimmung optimaler Torbelegungspläne

Behandlung der Ressourcenkapazitäten:

Im Gegensatz zur Startlösung werden in den folgenden Iterationen die K' Routings eines neuen Routingsets S^i einzeln und sukzessive durch Aufruf des Pricing Modells für eine Nahtour generiert. Bei Auswahl eines Routings für ein Routingset muss darauf geachtet werden, dass die gemeinsam genutzten Ressourcen um den entstehenden Verbrauch reduziert werden. Verfügt eine Kante arc_i im Netzwerk beispielsweise über eine maximale Kantenkapazität von 20 LE und verbraucht das Routing der Nahtour k bereits 5 Einheiten hiervon, so beträgt die maximale Kapazität für die verbleibenden Routings nur noch 15. Hierfür werden die Kapazitätslimits cap_1, \dots, cap_9 eingeführt. Sie entsprechen den neun Nebenbedingungen zur Überprüfung der Ressourcenkapazitäten des Modells MOAR (5.13 - 5.21) und werden zur Initialisierung auf die Werte der rechten Seiten gesetzt (z.B. $cap_1(arc_j) = arc_j^{capmax}$).

Iteration:

Insgesamt werden im Algorithmus v Iterationen in einer äußeren Schleife durchlaufen. Im Rahmen einer Iteration erfolgen die unten stehende Schritte:

Schritte 7., 8.: Zunächst wird das RMP über dem aktuellen Lösungsraum O gelöst. Für dieses lineare und stetige Problem kann z.B. das Simplexverfahren herangezogen werden, das auch für große Probleminstanzen relativ schnell optimale Lösungen erzeugt. Aus der Lösung sind die Dualvariablen der Tabelle 5.14 ablesbar und können mit Werten belegt werden.

Schritte 9.-15.: Anschließend wird nacheinander für alle K' Nahtouren das Pricing Modell gelöst. In die Zielfunktion des Pricing Modells gehen die aktuellen Werte der Dualvariablen ein. Das Flussproblem mit nur noch einem Gut kann mit Hilfe des Branch-and-Cut Verfahrens gelöst werden. Ist die Zielfunktion negativ, d.h. sind die reduzierten Kosten für das im Pricing Modell neu erzeugte Routing negativ, so wird das Routing der Nahtour vermerkt (Schritt 11., 12.). Zusätzlich wird der Verbrauch $(red(k)_1, \dots, red(k)_9)$, der durch die Nutzung der Kanten des Netzwerks N durch das Routing der Nahtour k entsteht, gespeichert. Wird das Routing später ausgewählt, so müssen die zur Verfügung stehenden Ressourcenkapazitäten (cap_1, \dots, cap_9) entsprechend reduziert werden (Schritt 13.).

Schritte 16.-35.: Die innere Schleife dient dazu, für die w besten Routings R_k mit den kleinsten negativen reduzierten Kosten vollständige Routingsets zu bilden, damit diese vom RMP in der nächsten Iteration ausgewählt werden können. In den Schritten 17. und 18. wird zunächst das beste Routing $R_{k'}$ ausgewählt und in Schritt 19. alle Ressourcenkapazitäten um den Verbrauch des Routings der ausgewählten Nahtour k' reduziert. In Schritt 20. folgt die Eröffnung eines neuen Routingsets für diese Nahtour. Um die Auswahl des aktuell besten Routings später zu ermöglichen, werden entsprechend der Definition der Routingsets $K' - 1$ Routings entwickelt, die die gleiche Ausgangstor-Fernrelation-Zuordnung wie die Nahtour k' haben und gemeinsam mit ihr die Ressourcen cap_1, \dots, cap_9 nicht überschreiten. In Schritt 21. werden daher zunächst die ausgangsseitigen Zuordnungen entsprechend der Vorgabe von $R_{k'}^i$ fixiert. Anschließend wird innerhalb der While-Schleife (Schritte 23. - 31.) zuerst die Nahtour $s' \neq k'$ gesucht, die zum einen das kleinste Zeitfenster $ZF(s')$ für eine Zuordnung zu einem der Eingangstore hat und zum anderen unter den Nahtouren mit gleich engen Zeitfenster über die größte Lademenge

$w^{s'}$ verfügt. Ist über diese Vergleiche eine Nahtour s' identifiziert, so werden die Dualvariablen sämtlich auf Null gesetzt. Anschließend wird das Pricing Modell für diese Nahtour, d.h. das ursprüngliche zeitdiskrete Flussmodell mit fixierter Nahtour $k = s'$ und fixierten Binärvariablen θ_t^j gelöst (Schritt 27.). Die Suche nach der Nahtour mit dem kleinsten Zeitfenster für eine Zuordnung ist notwendig, damit nicht andere Touren wichtige Ressourcen verbrauchen. Eine Zuordnung der kritischen Touren innerhalb des für sie sehr begrenzt erlaubten Zeitraums kann andernfalls eventuell nicht mehr erfolgen, wodurch unzulässige Lösungen, d.h. Routingsets, entstehen. Die so erzeugten zulässigen und optimalen Routings $R_{s'}$ werden in das neue, noch unvollständige Routingset aufgenommen und die Ressourcenkapazitäten erneut um die jeweiligen Bedarfe der Routings reduziert (Schritt 28., 29.). Ist das Routingset vollständig ($U = \emptyset$), so wird die While-Schleife beendet und ein neues Routing über die negativen reduzierten Kosten ausgesucht sowie ein neues Routingset generiert (Schritt 16.).

Nach Durchlauf dieser Prozedur beginnt eine neue innere bzw. bei Erreichen der maximalen Anzahl an inneren Iterationen w eine äußere Iteration. Vorher wird in Schritt 32. der Lösungsraum O um die erzeugten Routingsets erweitert, der Zähler für die Routingsets erhöht und die Ressourcenkapazitäten in Schritt 34. auf die ursprünglichen Werte zurückgesetzt.

Sind v äußere Iterationen durchlaufen worden, so wird das Verfahren insgesamt beendet und das Modell zur Auswahl optimaler Routings $MOAR$ über dem aktuellen Lösungsraum O gelöst. Das Ergebnis ist die Lösung der Torbelegungsplanung nach der hier entwickelten neuen Methode.

Übersicht zum Zusammenspiel der entwickelten Modelle:

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Modelle zur Torbelegungsplanung und deren jeweiligen Transformationen bzw. Zusammenhänge werden abschließend in der Abbildung 5.3 dargestellt und erläutert. Der oben vorgestellte Column Generation Ansatz wird an geeigneter Stelle eingeordnet:

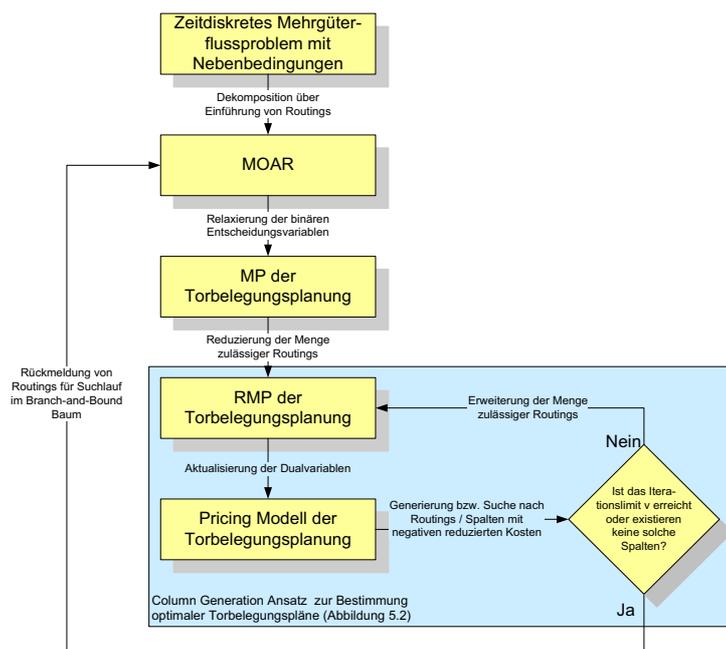


Abbildung 5.3: Zusammenspiel der entwickelten Modelle

1. **Stufe:** Das *zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen* wird entwickelt, um ein möglichst praxisnahes Abbild der Planungsaufgabe Torbelegungsplanung mit allen innerhalb einer Stückgutanlage auftretenden Prozesse, Ressourcen und Randbedingungen zu ermöglichen.
2. **Stufe:** Über die Definition *zulässiger Routings* innerhalb des Netzwerks zur Torbelegungsplanung und die Einführung des Modells *MOAR* zur Auswahl optimaler Routings wird eine Dekomposition des Ursprungsproblems erzielt. Motivation für die Transformation ist die hohe Komplexität des Ursprungsproblems. Szenarienrechnungen haben gezeigt, dass mit dem Branch-and-Cut Verfahren des sehr effizienten Optimization Solver CPLEX 10.0 für realistische Probleminstanzen nicht in adäquater Zeit und Qualität Lösungen entwickelt werden konnten.
3. **Stufe:** Das Modell *MOAR* ist ein binäres Optimierungsmodell. Um dennoch die Anwendung des Column Generation Konzeptes zu ermöglichen, welches Vertreter der linearen und stetigen Klasse erfordert, wird eine *Relaxierung der Binärbedingung* ($0 \leq \psi_{R_k^i} \leq 1$) eingeführt. Das resultierende relaxierte Modell dient als *MP der Torbelegungsplanung*. Durch die *Reduktion des Lösungsraums* auf Untermengen an möglichen Routings wird das *RMP der Torbelegungsplanung* geschaffen. Das Zusammenspiel zwischen dem RMP, dem Pricing Problem und den negativen reduzierten Kosten der Routings bildet den *Column Generation Ansatz zur Torbelegungsplanung*, der in diesem Kapitel detailliert vorgestellt wurde.
4. **Stufe:** Ergebnis nach Abbruch des Column Generation Ansatzes (entweder durch Einstellung des Parameters v der äußeren Schleife oder durch Fehlen weiterer Spalten mit negativen reduzierten Kosten) ist eine Menge an guten Routings O . Diese bilden den Lösungsraum des Modells *MOAR*, welches im Anschluss mit Hilfe des Branch-and-Cut Verfahrens optimal gelöst wird. Als Ergebnis liegt ein optimierter Torbelegungsplan vor.

Im folgenden Kapitel wird das neu entwickelte Verfahren auf die gleichen Testinstanzen wie das Branch-and-Cut Verfahren aus Kapitel 4.5 angewandt. Ein Vergleich der Ergebnisse und verschiedene Beobachtungen zum Verhalten des Verfahrens im Lösungsverlauf werden vorgestellt.

5.5 Anwendung des Column Generation Ansatzes

Im Rahmen der Testanwendungen hat sich gezeigt, dass nach drei äußeren Iterationen (d.h. $v = 3$ in Schritt 6. der Abbildung 5.2) kaum noch merkliche Verbesserungen des Zielfunktionswertes im Modell *MOAR* entstehen. Für $v > 3$ senkt sich nach jeder äußeren Iteration der Zielfunktionswert des dazu gehörenden RMP ab. Es werden aber bei Wiederherstellung der Ganzzahligkeitsbedingung $\psi_{R_k^i} \in \{0, 1\}$ nur noch selten neue und nennenswert bessere Zusammensetzungen der nach einer äußeren Iteration bekannten Routings gefunden.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass eine Festlegung des Parameters w zur Steuerung der Anzahl der inneren Iterationen in Schritt 16. der Abbildung 5.2 sinnvoll ist. Hierdurch werden für die Nahtouren mit den w niedrigsten Zielfunktionswerten im Pricing Modell vollständige Routingsets entwickelt, um ihre Auswahl im Modell *MOAR* zu ermöglichen. Speziell bei $w = 5$ ergaben sich akzeptable Laufzeiten. Werden weniger Routingsets entwickelt, ist die Menge an Spalten, auf denen *MOAR* arbeiten kann, zu klein. Es geht Optimierungspotenzial verloren

und das Verfahren liefert erst spät gute Lösungen. Ist der Parameter w sehr viel größer, so sind die Chancen, eventuell noch kostengünstigere Routingsets zu entwickeln, nur gering. Allerdings steigt die Laufzeit des Modells *MOAR* bis zur Auswahl einer Lösung im Verhältnis wesentlich stärker an. Bei der Anwendung des entwickelten Column Generation Ansatzes auf die dreißig Testszenerien aus Kapitel 4.5 wurde mit den Parametereinstellungen $v = 3$ und $w = 5$ gearbeitet.

Die Ergebnisse der Testanwendungen werden in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Szenario und Variante		Laufzeit in Sekunden				Zielfunktionswert			
Szenario	Zeitscheibenbestrafung	Erste zulässige Lösung	Zweite Zulässige Lösung	Dritte zulässige Lösung	Letzte Lösung	Erste zulässige Lösung	Zweite Zulässige Lösung	Dritte zulässige Lösung	Letzte Lösung
I	A	0,92	7,78	15,85	23,88	0,283500	0,279000	0,277500	0,277500
I	B	0,81	8,27	16,80	24,90	0,320500	0,282400	0,282400	0,280800
I	C	0,72	7,91	16,01	24,37	0,468500	0,307500	0,282500	0,289500
II	A	1,04	18,31	34,93	51,93	0,560500	0,560500	0,560500	0,557500
II	B	0,90	20,60	40,03	59,87	0,643000	0,643000	0,635349	0,635349
II	C	1,12	18,58	35,10	51,97	0,953500	0,953500	0,936250	0,936250
III	A	18,36	135,18	232,09	341,50	6,711200	4,904200	4,895100	4,888600
III	B	62,58	158,03	256,94	366,74	8,376080	5,576505	5,533930	5,533930
III	C	100,52	189,70	281,67	385,21	18,316775	6,533525	6,533348	6,466399
IV	A	25,58	104,47	180,71	258,67	6,337500	5,979350	5,870800	5,870800
IV	B	17,85	99,43	181,84	270,72	7,102430	7,102400	7,065300	7,029360
IV	C	11,68	91,52	173,71	257,72	10,564700	10,450900	10,306950	10,294675
V	A	26,29	236,41	429,21	632,63	12,022230	11,096083	11,037966	11,037966
V	B	44,74	268,83	477,00	689,01	18,320056	12,329131	11,942303	11,477642
V	C	30,36	252,81	460,00	670,75	15,336975	13,600866	13,600866	12,663233
VI	A	33,78	375,98	693,83	1014,35	13,491611	10,789333	10,754733	10,754733
VI	B	55,37	406,74	737,20	1069,92	15,044721	12,027155	12,027155	11,507613
VI	C	91,63	448,93	869,00	1214,21	21,274108	15,295514	15,295514	15,096850
VII	A	126,01	609,45	1055,18	1741,88	21,914197	12,213417	12,191373	12,189893
VII	B	115,88	636,18	1088,62	1575,05	27,147144	13,226995	12,819266	11,278424
VII	C	117,73	641,92	1094,28	1552,41	24,782542	14,838100	13,063862	13,063862
VIII	A	194,31	694,56	1095,06	1536,80	19,274370	9,494353	9,494353	9,494353
VIII	B	124,30	610,21	1013,99	1449,00	22,434418	12,391739	12,221388	10,913898
VIII	C	223,17	701,95	1131,37	1619,21	31,889745	15,348777	13,990918	13,990918
IX	A	64,89	681,34	1165,44	1676,18	10,282000	7,176000	6,736000	6,689000
IX	B	55,30	697,82	1254,68	1799,48	5,463067	5,442433	5,442433	5,442433
IX	C	51,17	650,87	1182,61	1737,42	7,024667	6,810667	6,786500	6,657167
X	A	371,86	1685,32	2202,98	2765,86	32,740666	32,740666	26,991667	26,991667
X	B	384,14	1294,68	1911,04	2803,85	32,697066	32,697066	32,324933	31,532799
X	C	369,18	1146,86	1654,82	2185,01	48,665500	40,271833	40,271833	40,271833

Tabelle 5.2: Testszenerien: Lösungsverlauf und Lösungsgüte des Column Generation Ansatzes

Der Aufbau der Tabelle ist an die Darstellung der Ergebnisse des Branch-and-Cut Verfahrens aus Kapitel 4.5 angelehnt. Zeilenweise sind die Szenarien I - X mit ihren Zielfunktionsvarianten A, B und C eingetragen. Die Spalten drei bis sechs geben Aufschluss über die Lösungszeit. Zunächst wird festgehalten, wann eine erste zulässige Lösung entwickelt werden konnte. In den folgenden Spalten sind die Laufzeiten bis zum Abschluss der drei äußeren Iterationen vermerkt. An diesen Zeitpunkten werden jeweils die Zielfunktionswerte des Modells *MOAR* notiert und in den folgenden vier Spalten abgelegt. Sie liefern Informationen zu der Lösungsgüte, d.h. in diesem Fall zur Entwicklung des Zielfunktionswertes im Verlauf des Verfahrens.

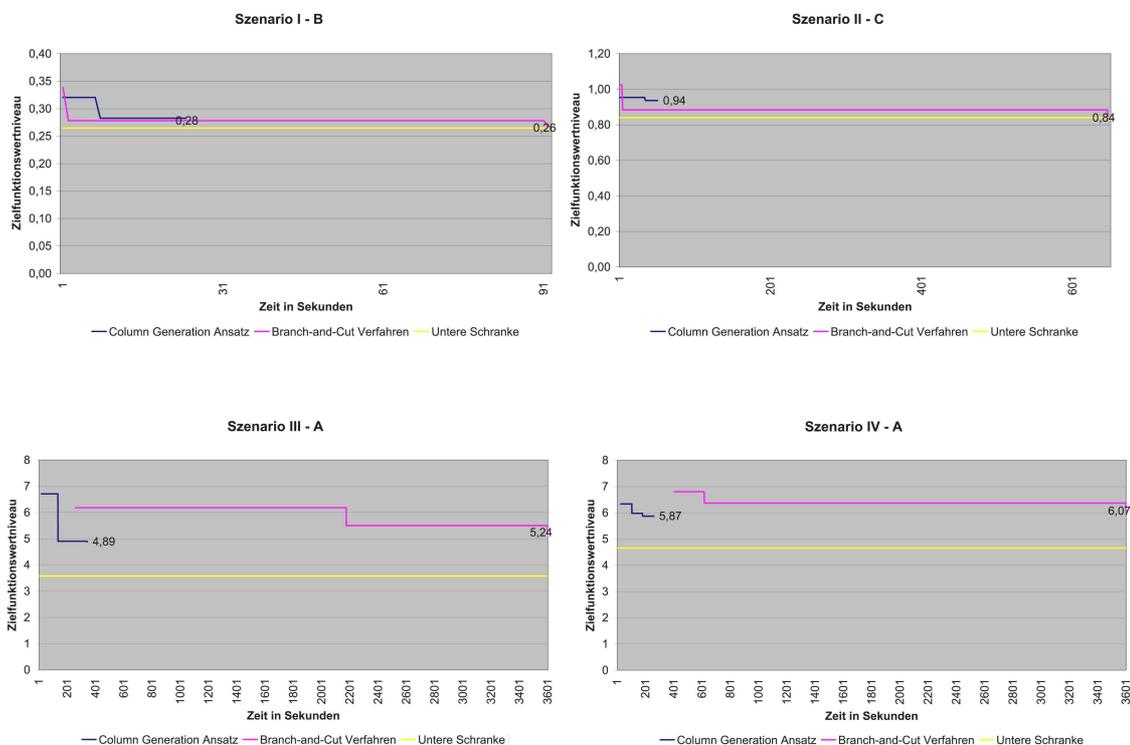
Im Vergleich zur Tabelle 4.9 lässt sich erkennen, dass die im neu entwickelten Verfahren angewandte Methode zur Bestimmung einer Startlösung wesentlich schneller Lösungen generiert, als dies durch das Branch-and-Cut Verfahren der Fall ist. So bewegt sich die Anzahl der Sekunden bis zum Finden einer ersten Lösung in Tabelle 4.9 ab Szenario III durchgängig im dreistelligen und ab Szenario VII sogar im vierstelligen Bereich. Der Column Generation Ansatz allerdings

findet Lösungen noch bis zum Szenario VI im zweistelligen und anschließend zumindest im niedrigen dreistelligen Bereich.

In keinem der Szenarien ist das Ausschöpfen der Obergrenze von einer Stunde notwendig. Durch die Parametrierung der inneren und äußeren Schleife konnte das Lösungsverfahren für die Szenarien I - IV in maximal 5 Minuten und für Szenario V in 10 Minuten durchgeführt werden. Für die größeren Szenarien liegt die Lösungszeit i.d.R. zwischen 20 und 30 Minuten. Nur für das Szenario X sind Laufzeiten von über 30 Minuten notwendig.

Für die Szenarien VII - A, VIII - A-C, IX - C und X konnte mit Hilfe des Branch-and-Cut Verfahrens nach Ablauf einer Stunde Laufzeit keine einzige zulässige Lösung gefunden werden. Dies ist bei Anwendung des Column Generation Ansatzes bei keinem der Szenarien der Fall. In allen Szenarien ließen sich beliebige Startlösungen generieren, die anschließend durchschnittlich um 26% verbessert wurden. In manchen Fällen sanken die Werte sogar um ca. 60 % (Szenario III - C, VIII). Das Verfahren arbeitet stabil und relativ unabhängig von der Güte der Startlösung.

Der Vergleich der Laufzeit und der Lösungsgüte der beiden Verfahren wird in der folgenden Abbildung 5.4 anhand acht ausgewählter Szenarien visualisieren. Der Aufbau der Abbildungen ist identisch. Auf der x-Achse ist die Laufzeit in Sekunden eingetragen. Die y-Achse dient der Darstellung des Zielfunktionswertniveaus der gespeicherten Lösungen. Die pinkfarbene Linie repräsentiert den Verlauf des Branch-and-Cut Verfahrens bei Anwendung auf die Szenarien. Die blaue Kurve gibt den Verlauf des entwickelten Column Generation Ansatzes wieder.



5. Entwicklung eines Dekomposition und Column Generation Ansatzes

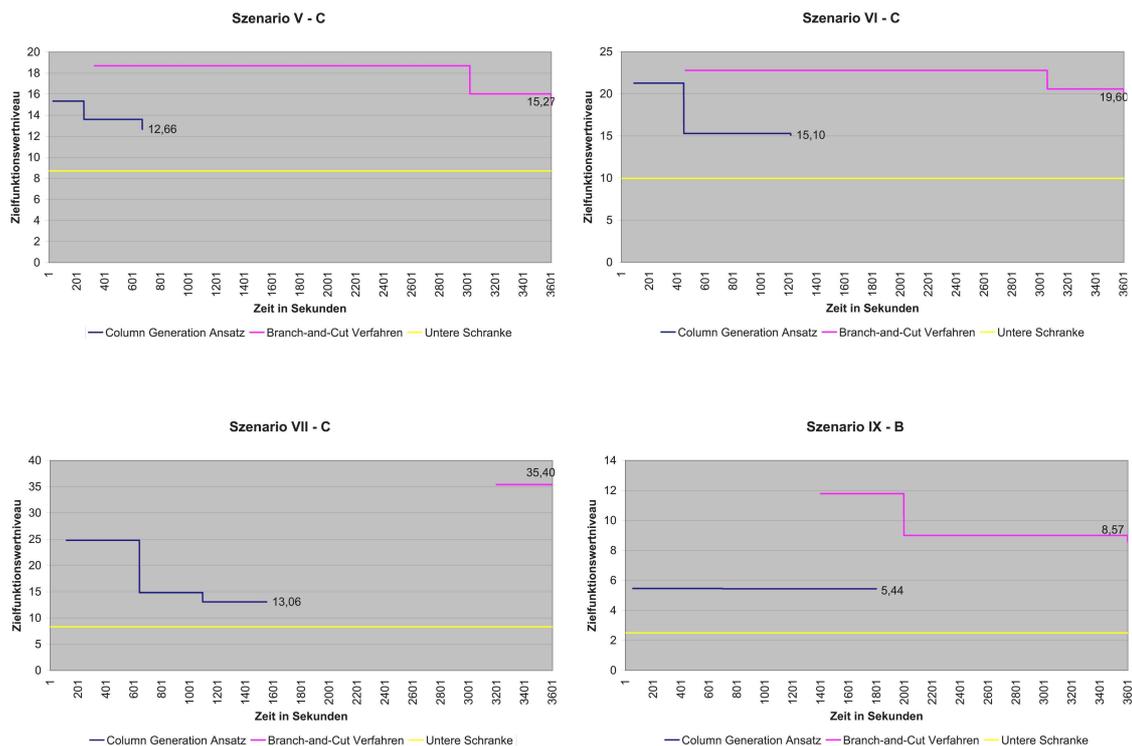


Abbildung 5.4: Vergleich der Laufzeit und der Lösungsgüte der Verfahren

Als zusätzliche Information wird die durch das Branch-and-Cut Verfahren gefundene untere Schranke des jeweiligen Optimierungsproblems als gelbe Linie angezeigt. Aufgrund der Analyse zur Abbildung 4.6 ist für diese nicht gesichert, inwiefern sie eine realistische Referenzlinie darstellt.

In den ersten beiden abgebildeten Szenarien I - B und II - C liefert das bisher in der Wissenschaft bekannte Branch-and-Cut Verfahren bessere Resultate. Die gefundenen Lösungen verfügen über geringere Zielfunktionswerte (6 - 11 %) als die des Column Generation Ansatzes. Die ersten beiden Szenarien I und II sind von nur geringer Komplexität. Dies gilt für die mathematische als auch die logistische Komponente.

Ab dem Szenario III entwickelt der Column Generation Ansatz sowohl die Laufzeit als auch die Lösungsgüte betreffend bessere Lösungen als das Branch-and-Cut Verfahren. Die Lösungen weisen durchschnittlich 16 % bessere Zielfunktionswerte auf. Im Maximum werden sogar 63 % bessere Lösungen gefunden. Zudem konnten bei 8 Szenarien Lösungen entwickelt werden, bei denen das Branch-and-Cut Verfahren nicht mehr in der Lage war, eine einzige zulässige Lösung vor Ablauf der gesetzten einstündigen Laufzeit zu erzeugen. Der Column Generation Ansatz ist mit der Parametrierung $v = 3$ und $w = 5$ in allen Fällen die Laufzeiten betreffend besser als das Branch-and-Cut Verfahren. Im Durchschnitt benötigt das erste Verfahren nur 22 % der Laufzeit des Standardverfahrens der diskreten Optimierung. Dieser Sachverhalt ist besonders gut anhand der Abbildungen Szenario III - A, IV - A und V - C zu erkennen. Der Column Generation Ansatz endet nach 10 Minuten mit Lösungen, die 6, 3 und 17 % niedriger liegen als die des Branch-and-Cut Verfahrens nach einer Stunde Laufzeit. Einen Extremfall stellt das Szenario VII - C dar, bei welchem das Branch-and-Cut Verfahren in der Version von CPLEX 10.0

nach 50 Minuten Laufzeit genau eine Lösung entwickeln kann. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Column Generation Ansatz bereits seit 20 Minuten eine 63 % bessere Lösung gefunden.

Fazit der Testanwendung:

Das Branch-and-Cut Verfahren gehört zu den mathematisch exakten Optimierungsverfahren. Es findet das mathematisch absolute Optimum, falls ihm dies aufgrund der Komplexität des Problems ermöglicht wird. Der entwickelte Column Generation Ansatz ist ein Verfahren, welches Bausteine der stetigen und diskreten Optimierung geschickt in einer heuristischen Struktur miteinander verbindet. Solange es nicht in eine Branch-and-Price Struktur integriert wird, gilt es als heuristisches Verfahren. Zielfunktionswerte, die 6-11 % neben dem tatsächlichen Optimum liegen (Szenarien I - B und II - C), decken die Erfahrungen von Huismann ([44]) aus dem Bereich der Tourenplanung mit Zeitfenstern. Der Autor nimmt Bezug auf Arbeiten, in denen das Column Generation Konzept ebenfalls ohne Integration in einen Branch-and-Price Algorithmus im Root-Knoten angewandt wird und somit einen zu dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren ähnlichen Ansatz darstellt. Die Zielfunktionswerte lagen hier 1,5 - 12,1 % neben dem tatsächlichen Optimum. Der Vorteil der beiden Verfahren ist, dass sie geringere Laufzeiten aufweisen und vor allem bei mittelgroßen bis großen Problemgrößen bessere Lösungen liefern. Die exakten Verfahren sind an dieser Stelle nicht mehr in der Lage effizient zu arbeiten. Aufgrund der Dekompositionsidee wird die Komplexität des Problems unter Beibehaltung des für die Torbelegungsplanung grundsätzlich geeigneten zeitdiskreten Mehrgüterflussproblems mit Nebenbedingungen umgangen. Der darauf basierend entwickelte Column Generation Ansatz liefert somit speziell für realistische Instanzen in wesentlich kürzerer Laufzeit optimierte und bessere Ergebnisse und bedeutet daher Optimierungspotenzial für die Praxis.

Ziel der Arbeit ist die Erstellung eines optimierten für mehrere Monate geltenden Regelplans zur Bestimmung der in Abbildung 2.11 aufgeführten strategischen, mittelfristigen und operativen Aufgaben an einem modellierten Verkehrstag. Unter dieser Prämisse sind die Laufzeiten des Verfahrens von 10 - 30 Minuten im Einzelfall akzeptabel.

Kapitel 6

Test anhand realer Praxisdaten

Zur Lösung der Torbelegungsplanung werden verschiedene Daten der Stückgutspeditionsanlage und deren aktuellem Geschäft benötigt, welche in Kapitel 6.1 beschrieben werden. Anhand des Beispiels eines Stückgutspediteurs aus dem Münsterland wird in Kapitel 6.2 dargelegt, wie im Einzelfall bei der Beschaffung vorgegangen werden kann. Anschließend wird der entwickelte Column Generation Ansatz zur Lösung des realen Szenarios angewandt und in Kapitel 6.3 die Ergebnisse der Optimierung beschrieben sowie mit der Ist-Situation verglichen.

Neben der Bestimmung optimaler Torbelegungspläne können das Optimierungsmodell sowie das Lösungsverfahren zusätzlich zur Bestimmung bzw. Bewertung von Lösungen anderer Planungsaufgaben in Stückgutanlagen genutzt werden. Auf diese Möglichkeiten wird abschließend in Kapitel 6.4 eingegangen.

6.1 Datenbeschaffung und Aufbereitung

Die für das Optimierungsmodell benötigten Inputdaten lassen sich wie in folgender Abbildung dargestellt klassifizieren:

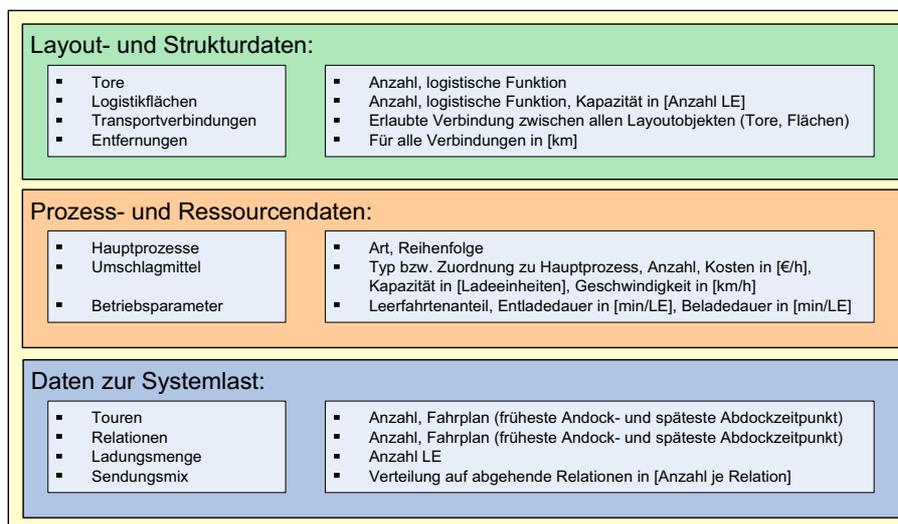


Abbildung 6.1: Klassifizierung der Inputdaten für die Optimierung

Layout- und Strukturdaten:

Im Rahmen der Optimierung werden Daten und Informationen über das zugrunde liegende Layout der Stückgutanlage erhoben. Diese umfassen die Kategorien Tore, Flächen und Entfernungen. Potentielle Quellen sind CAD-Zeichnungen in elektronischer Form oder Bauzeichnungen, die vom Architekten angefertigt wurden.

Für den Aufbau der Knotenmengen V_1 und V_4 des Netzwerks muss geklärt werden, wieviele Tore in der Halle existieren und für welche logistische Funktion sie geeignet sind. Letzteres lässt sich in der Regel nicht aus den Zeichnungen und Plänen ablesen, da diese Einteilung entweder aus der technischen Ausstattung der Tore resultiert oder aber vorab vom Betreiber festgelegt wurde. An dieser Stelle müssen begleitende Gespräche mit dem Betreiber darüber geführt werden, welche Tore mit welcher Funktion in die Optimierung einbezogen werden sollen.

Die gleichen Informationen werden für die vorhandenen Logistikflächen zum Aufbau der Knotenmengen V_2 und V_4 erhoben. Zusätzlich sind die Kapazitäten der Flächen, gemessen in Anzahl an Palettenstellplätze, zu ermitteln. Die Baupläne eignen sich zumeist nicht zur Erfassung dieser Informationen. So kann es zum einen sein, dass der Architekt exemplarisch vor jedes Tor Flächen einer bestimmten Größe eingezeichnet hat, die tatsächlichen Flächen in der Halle vom Betreiber aber anders angelegt worden sind. Zum anderen werden die Flächen im Laufe der Jahre abgeändert und dem Betrieb angepasst. Diese Änderungen werden selten nachgehalten. Parallele Besichtigungen und Vermessungen vor Ort sind notwendig.

Zum Aufbau der Kantenmengen $A_2 - A_4$ müssen die erlaubten Transportverbindungen zwischen sämtlichen Layoutobjekten erfasst und anschließend mit realen Entfernungen hinterlegt werden. Dies kann anhand der Zeichnungen oder der CAD-Datei geschehen. Messungen vor Ort scheiden aus, da sie den Betrieb zu stark stören.

Prozess- und Ressourcendaten:

Bei der Lösungsentwicklung wird der Ressourcenaufwand gegen die vorhandenen Kapazitäten abgeglichen. Der Algorithmus benötigt Informationen zu den Hauptprozessen, den verwendeten Umschlagmittelressourcen sowie eine Zuordnung der Umschlagmittel zu den Prozessen.

Die Art der Hauptprozesse, die typischerweise im Rahmen des Umschlags einer LE von einer ankommenden Tour auf eine abgehende Relation durchlaufen werden, sowie die Eigenschaften der Ressourcen können in einem Gespräch mit dem Anlagenbetreiber begleitet durch Prozessaufnahmen und Vorortbesichtigungen erfasst werden. Die Geschwindigkeit der Ressourcen in [km/h] ergibt sich z.B. aus den Leistungsparametern laut Hersteller. Die Kosten der Ressourcen in [EURO/h] dagegen resultieren aus einer Kostenkalkulation unter Verwendung diverser Informationen der Controllingabteilung, wie z.B. Abschreibung, Abnutzung, variable Kosten in Form von Strom oder Gas, Personalkosten etc..

Weitere Betriebsparameter, die der Algorithmus verwendet, sind der Leerfahrtenanteil und die Dauer der Ent- und Beladung je LE. Letztere können durch Zeitaufnahmen vor Ort bestimmt werden. Der Leerfahrtenanteil sollte gemeinsam mit dem Betreiber abgeschätzt werden. Bei Bedarf kann er auch den Wert Eins annehmen, d.h. er spielt keine Rolle.

Daten zur Systemlast:

Die beiden vorangegangenen Datenkategorien umfassen Informationen, die nie (z.B. Layout einer Halle) oder selten (z.B. Ressourcenanzahl) geändert werden. Informationen zum laufenden Betrieb hingegen fehlen noch in der Datenerfassung und werden im Folgenden als Systemlast bezeichnet. Die Systemlast einer Stückgutanlage kann mit Hilfe der vorhandenen Touren und Relationen sowie deren Fahrpläne, Lademengen und dem Sendungsmix beschrieben werden.

Mögliche Datenquelle für die pro Tag in einer Stückgutspeditionsanlage umgeschlagenen Ladeeinheiten ist die verwendete Speditionssoftware. Hieraus werden für eine bestimmte Zeitspanne sämtliche Transportaufträge gefiltert. Die Zeitspanne sollte in Absprache mit dem Betreiber so gesetzt werden, dass saisonale Effekte, z.B. Winter- und Sommergeschäft, erfasst werden können. Neben Details zur Abrechnung und zu den Lieferkonditionen sind in der Speditionssoftware die Verlade- und Lieferadresse eines Transportauftrags sowie Produkteigenschaften abgelegt. Die Produkteigenschaften umfassen das Gewicht der Sendung, da hierüber die Abrechnung erfolgt. Weitere Eigenschaften, wie etwa die Länge, Breite und Höhe werden oft nicht erfasst. Einige Stückgutspediteure pflegen zusätzlich die Verpackungsart (z.B. Gitterbox, Karton, Palette) der Ladeinheit. Falls vorhanden, kann diese Information dazu genutzt werden, um zum einen eine Analyse über die am häufigsten auftretende Ladeinheit im System vorzunehmen, welche anschließend als Basiseinheit in das Modell eingeht. Zum anderen lässt sich nur aus dem Gewicht einer Sendung nicht auf die Anzahl an resultierenden Transportaufträgen, d.h. an zu fahrenden innerbetrieblichen Wege, schließen. Die Angabe zur Verpackungsart dient in diesem Fall einer besseren Abschätzung der Anzahl der anfallenden Transportaufträge.

Für den SA wird in der Speditionssoftware erfasst, auf welche Fernrelation eine Sendung gebucht ist. Es wird nicht immer notiert, mit welchem Nahverkehrsfahrzeug sie in der Umschlaganlage eingetroffen ist. Ähnlich ist durch das übergeordnete Stückguttransportnetz zwar die Anzahl der Relationen und deren Fahrpläne bekannt. Der Ankunftszeitpunkt der Nahverkehrsfahrzeuge wird aber meistens nicht erfasst. Für den SE gilt ein ähnlicher Sachverhalt.

Fazit ist, dass die für die Optimierung der Torbelegungsplanung erforderlichen Informationen nur teilweise vorhanden sind. Neben genauen Informationen zu den ankommenden Touren und deren Fahrplänen fehlt häufig eine genaue Beschreibung der Lademengen und des Sendungsmix. Die fehlenden Informationen können durch Aufzeichnung über einen mehrere Wochen umfassenden Zeitraum hinweg ergänzt oder aber mit den Spediteuren sinnvoll abgeschätzt werden.

6.2 Vorstellung eines realen Praxisszenarios

Anhand der Stückgutanlage eines Spediteurs aus dem Münsterland wird im Folgenden die Vorgehensweise bei der Erhebung der für die Optimierung benötigten Daten vorgestellt.

Tore und Flächen:

Der Stückgutspediteur gehört einem internationalen Stückguttransportnetz an. Die Form der Umschlaghalle gehört mittlerweile, nach Erweiterung aufgrund eines starken Geschäftszuwachses,

zu den L-Shapes. Insgesamt verfügt die Halle über 64 Tore. Das Tor 24 an der unteren Seite der Halle ist für die Seitenbeladung reserviert und soll nicht in die Optimierung eingehen.

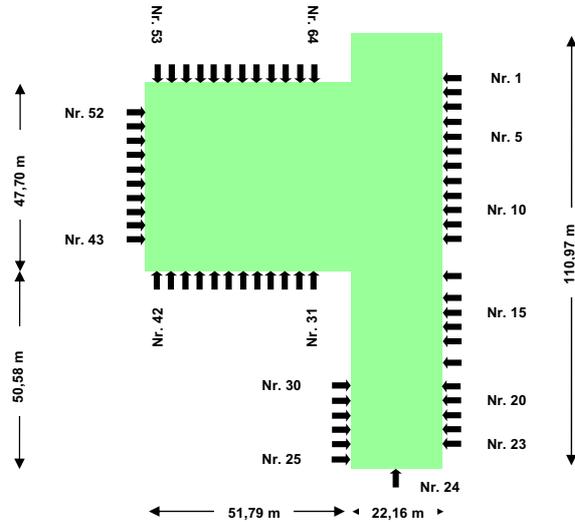


Abbildung 6.2: Praxisszenario: Layout der Umschlaghalle

Derzeit werden die Tore 41 - 54 für den Eingang genutzt. Vor diesen ist eine 118 m² große Entladefläche eingezeichnet, die für alle Eingangstore zuständig ist. Die Fläche fasst maximal 122 Paletten. Die verbleibenden 49 Tore sind Ausgangstore. Vor jedem der Ausgangstore ist eine Bereitstellfläche in Schienenform eingezeichnet.

Fläche	Funktion	Torzuordnung	Anzahl Palettenstellplätze	Fläche	Funktion	Torzuordnung	Anzahl Palettenstellplätze	Fläche	Funktion	Torzuordnung	Anzahl Palettenstellplätze
1	B	Tor 1	21	18	B	Tor 18	17	35	B	Tor 36	30
2	B	Tor 2	14	19	B	Tor 19	17	36	B	Tor 37	15
3	B	Tor 3	32	20	B	Tor 20	17	37	B	Tor 38	15
4	B	Tor 4	32	21	B	Tor 21	9	38	B	Tor 39	30
5	B	Tor 5	32	22	B	Tor 22	17	39	B	Tor 40	30
6	B	Tor 6	16	23	B	Tor 23	9	40	E	Tore 41 - 54	122
7	B	Tor 7	16	24	B	Tor 25	8	41	B	Tor 55	34
8	B	Tor 8	32	25	B	Tor 26	16	42	B	Tor 56	34
9	B	Tor 9	32	26	B	Tor 27	8	43	B	Tor 57	17
10	B	Tor 10	32	27	B	Tor 28	8	44	B	Tor 58	17
11	B	Tor 11	16	28	B	Tor 29	16	45	B	Tor 59	34
12	B	Tor 12	16	29	B	Tor 30	16	46	B	Tor 60	45
13	B	Tor 13	49	30	B	Tor 31	16	47	B	Tor 61	17
14	B	Tor 14	35	31	B	Tor 32	20	48	B	Tor 62	17
15	B	Tor 15	33	32	B	Tor 33	15	49	B	Tor 63	22
16	B	Tor 16	24	33	B	Tor 34	15	50	B	Tor 64	27
17	B	Tor 17	17	34	B	Tor 35	39				

Tabelle 6.1: Praxisszenario: Innerbetriebliche Flächen und Torzuordnung

Die Schienen sind unterschiedlich groß und haben zwischen 8 bis 49 Palettenstellplätze. Die Schienen der Tore, die an den Ecken der Halle oder aber im rechten und somit wesentlich schmaleren Teil der Halle liegen, sind von geringerer Größe. In der Mitte des linken Hallenteils befindet sich eine große Fläche, auf der Sendungen, die in der eigenen Nahverkehrsregion verbleiben, gepuffert werden.

Prozesse und Entfernungen:

Grundsätzlich sind 100 % der Sendungen bereits vorgelabelt und 90% der Sendungen werden entsprechend des Musters 3.3a → 3.4 → 3.5a → 3.6 → 3.7 aus der Abbildung 2.8 umgeschla-

gen. Für das Modell bedeutet dies, dass drei Hauptprozesse existieren, die in der folgenden Reihenfolge durchgeführt werden: Entladung → Verbringung → Beladung.

Die Sendungen werden von allen Eingangstoren aus auf die gemeinsam genutzte Entladefläche verbracht. Von der Entladefläche aus sind alle Bereitstellflächen erreichbar. Diese sind wiederum eindeutig einem Ausgangstor zugeordnet. Die Sendungen werden im Modell nicht an einem zentralen Punkt auf der Entladefläche abgestellt. Vielmehr werden sie vom jeweiligen Entladetor auf denjenigen Teilbereich der Entladefläche transportiert, der dem Tor am nächsten ist. Somit ergibt sich eine konstante Entfernung von ca. 4 m von den Eingangstoren 41 bis 54 zur Entladefläche. Gleiches gilt für den Transport von den Bereitstellflächen zu den Ausgangstoren. Die Transportwege von der Entladefläche zu den verbleibenden Bereitstellflächen sind aufgrund der unterschiedlichen Abstellplätze auf der Entladefläche unterschiedlich lang und wurden anhand einer CAD-Zeichnung ermittelt¹.

Ressourcen und Betriebsparameter:

Es stehen Handgabelhubwagen, Elektro-Deichselhubwagen und Gabelstapler zur Verfügung. Die Handgabelhubwagen können 5 km/h schnell fahren. Die Elektro-Deichselhubwagen haben eine maximale Geschwindigkeit von 6 km/h, die Gabelstapler von 16 km/h. Die Kapazität liegt jeweils bei einer Europalette und durchschnittlich 1.500 kg. Insgesamt arbeiten im Sammelgutausgang und -eingang 30 Personen. Acht Personen werden der Entladung zugeordnet, vier der Verbringung und 18 Personen der Beladung. Von den acht Personen für die Entladung transportieren vier die Sendungen zwischen den Fahrzeugen und der Entladefläche. Die verbleibenden vier Personen bearbeiten entladene Sendungen (z.B. scannen, fotografieren). Entsprechend sind für die Entladung vier Handgabelhubwagen im Einsatz. Drei Gabelstapler sowie fünfzehn Elektro-Deichselhubwagen werden für die Beladung eingesetzt. Den vier Personen in der Verbringung werden vier Elektro-Deichselhubwagen bereitgestellt.

Die Umschlagmittelfloten je Hauptprozess sind relativ homogen. Lediglich in der Beladung werden zwei Typen parallel eingesetzt. Hier wird aufgrund der höheren Anzahl an Elektro-Deichselhubwagen die Geschwindigkeit vereinfachend auf 6 km/h gesetzt. Kosten werden nicht betrachtet, sondern rein über die Minimierung der Wegstrecken optimiert, welche im Modell zu den Kosten linear verlaufen.

Der Parameter Leerfahrtenanteil wird mit 2 geschätzt. Die Umschlagmittelressourcen der drei Hauptprozesse arbeiten in abgeschlossenen Systemen. Keiner der Transporte kann derart gestaltet werden, dass der Abladeort und der Aufnahmeort einer Ladeinheit identisch sind. Vielmehr muss vor allem bei der Beladung und Verbringung nach Absetzen einer LE jedes Mal zum Ausgangspunkt (Bereitstellfläche, Entladefläche) zurückgefahren werden. Somit ist hier die Bildung von innerbetrieblichen Touren schwer möglich. Die Parameter zur Be- und Entladung wurden bei einem anderen Spediteur durch Zeitaufnahmen vor Ort mit $e = b = 50$ Sekunden beziffert. Diese Werte werden aufgrund der Ähnlichkeit in den Be- und Entladeprozessen für dieses Szenario übernommen.

¹ Die Entfernungen entsprechen denjenigen der Szenarien VII und VIII in Kapitel 4.5 und 5.5 und können speziell für die hier beschriebene Nutzung der Halle im Anhang A.1 nachgelesen werden.

Touren, Relationen und Fahrplan:

Entsprechend dem übergeordneten Stückguttransportnetz existieren 40 nationale und internationale Fernverkehrsrelationen im Sammelgutausgang, die täglich gefahren werden. Für den Sammelguteingang werden 27 Nahverkehrsrelationen im eigenen Nahverkehrsgebiet bedient. Die Anzahl der im SE und SA ankommenden Touren wurde vom Spediteur nicht erfasst. Aufgrund der Tatsache, dass Direktfahrten zwischen den Anlagen im Transportnetz durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Zahl der ankommenden Fernverkehrstouren relativ konstant bei 40 liegt. Für den SA hingegen konnte nicht allgemein gültig abgeleitet werden, wieviele Nahverkehrstouren täglich sammeln. Hier besteht die Möglichkeit, Zählungen über einen längeren Zeitraum hinweg durchzuführen. Allerdings sind auch dabei Schwankungen zu erwarten, die sich nicht verallgemeinern lassen. Eine andere Vorgehensweise, die für eine mittelfristige bis strategische Optimierung ausreichend ist, liegt in der groben Abschätzung der Anzahl der ankommenden Touren im SA aufgrund des erfassten Mengengerüsts. Hierfür werden die Sendungsdaten des Spediteurs über mehrere Monate hinweg ausgewertet. In den Sendungsdaten ist sowohl das Gewicht als auch die Verpackungsart der Sendungen vermerkt. Durch die Analyse ergibt sich zum einen, dass 80 % der Sendungen palettiert sind. Zum anderen wurde ein durchschnittlicher Gewichtungsfaktor je Europalette ermittelt. Der Betreiber gab zusätzlich an, dass die ankommenden Nahverkehrstouren einen Füllgrad von ca. 70 % aufweisen. Durch Verrechnung der drei Informationen wird abgeschätzt, wieviele Paletten und somit wieviele Nahverkehrstouren (hier 56 Touren) im Schnitt pro Tag ankommen.

Der Optimierungszeitraum SA startet um 15:00 Uhr und endet um 22:00 Uhr. Dabei liegt die Spitze der Belastung zwischen 16:30 Uhr und 18:00 Uhr. Der SE dagegen fängt um 00:00 Uhr an und reicht bis 8:00 Uhr. Hier ist die Spitzenzeit zwischen 6:30 Uhr und 8:00 Uhr. Bezüglich des Fahrplans der Relationen und Touren zeigt sich eine ähnlich schlechte Informationsqualität wie bei der Anzahl der Touren und ihrem Sendungsmix. Es existiert lediglich für die abgehenden Fernverkehrsrelationen im SA ein detaillierter Plan zu den Abfahrtszeiten:

Relation	Früheste Andockzeit	Späteste Abdockzeit									
FR-01	13:00	22:00	FR-11	13:00	18:30	FR-21	13:00	22:00	FR-31	13:00	18:00
FR-02	13:00	18:30	FR-12	13:00	19:00	FR-22	13:00	20:00	FR-32	13:00	20:00
FR-03	13:00	19:00	FR-13	13:00	20:00	FR-23	13:00	17:30	FR-33	13:00	19:00
FR-04	13:00	18:45	FR-14	13:00	21:00	FR-24	13:00	22:00	FR-34	13:00	18:00
FR-05	13:00	18:00	FR-15	13:00	18:00	FR-25	13:00	19:00	FR-35	13:00	18:45
FR-06	13:00	19:00	FR-16	13:00	19:30	FR-26	13:00	19:30	FR-36	13:00	18:45
FR-07	13:00	18:00	FR-17	13:00	18:30	FR-27	13:00	20:30	FR-37	13:00	19:00
FR-08	13:00	18:30	FR-18	13:00	22:00	FR-28	13:00	19:30	FR-38	13:00	19:30
FR-09	13:00	18:00	FR-19	13:00	20:00	FR-29	13:00	20:00	FR-39	13:00	18:30
FR-10	13:00	18:30	FR-20	13:00	19:00	FR-30	13:00	19:00	FR-40	13:00	18:30

Tabelle 6.2: Praxisszenario: Fahrplan der Fernverkehrsrelationen

Es liegen keine Informationen vor, ab wann eine Relation zur Beladung bereitsteht. Im Modell wird die linke Seite des Fahrplans für die Fernverkehrsrelationen, d.h. die Ankunftszeit, vereinfachend auf 15:00 Uhr, den Start des Optimierungszeitraums, gelegt.

Die Ankunft der Nahverkehrstouren im SA ist zeitmäßig nicht erfasst worden. Gleiches gilt für die ankommenden Fernverkehrstouren und die abgehenden Nahverkehrsrelationen im SE. Ersatzweise wird mit einer Verteilung der Ankünfte und Abfahrten gearbeitet. Diese Vorgehensweise soll am Beispiel der Nahverkehrstouren im SA vorgestellt werden. Die Erfahrung des

Betreibers zeigt, dass die meisten Nahverkehrstouren erst sehr spät in der Anlage eintreffen. So liegt die Spitze zwischen 16:30 Uhr und 18:00 Uhr. Zu Beginn der Verkehrswelle, d.h. um 15:00 Uhr, treffen nur sehr vereinzelt Fahrzeuge ein. Nach 18:30 Uhr kommen i.d.R. ebenfalls kaum noch Fahrzeuge an. Für die verbleibenden Stunden kann eine prozentuale Verteilung der Ankünfte angegeben werden. Die Prozentangaben sind in die entsprechende Anzahl an Fahrzeugen, die je Zeitscheibe an einem Modelltag eintreffen, umgerechnet worden und können aus folgender Abbildung abgelesen werden:

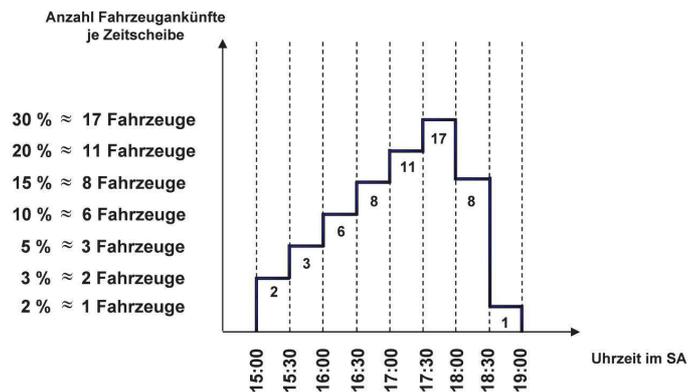


Abbildung 6.3: Praxisszenario: Verteilung der Fahrzeugankünfte

Es gibt keine definierte Abfahrtszeit für die Nahtouren. Die rechte Seite der Fahrpläne im SA ist daher identisch mit dem Ende des Optimierungszeitraums. Auf die gleiche Art werden die fehlenden Fahrpläne der Fernverkehrstouren und der Nahverkehrsrelationen im SE erzeugt.

Lademengen und Sendungsmix:

Die Lademengen der Fernverkehrsrelationen im SA und der Nahverkehrsrelationen im SE konnten über die eindeutigen Nummern in den Sendungsdaten ermittelt werden. Die Daten wurden tageweise analysiert und Durchschnittswerte für die einzelnen Relationen abgeleitet. Die Verteilung der ankommenden Mengen auf die abgehenden Relationen war aufgrund der fehlenden Erfassung sämtlicher Fahrzeugbewegungen nicht möglich. Als Sendungsmix wurde daher eine gleichmäßige Verteilung der LE einer ankommenden Tour auf die vorhandenen abgehenden Relationen angenommen.

Eine komplette Übersicht über die resultierenden Daten ist aus Platzgründen im Anhang A.2 aufgeführt.

6.3 Anwendung des Column Generation Ansatzes

Bei der Optimierung werden zwei Ziele verfolgt. Zunächst soll ein Torbelegungsplan für die Verkehrswellen SA und SE unter Beibehaltung aller Layout- und Betriebsentscheidungen erstellt werden (Kapitel 6.3.1). Durch Vergleich der in den Lösungen entstehenden Wegsummen mit den aktuell bestehenden Torbelegungsplänen kann die jeweilige Reduktion der Zielwerte durch die Optimierung ausgewiesen werden. Anschließend gilt es zu überprüfen, ob durch die

Verlegung der Wareneingangszone oder aber durch eine Zweiteilung der Zone geringere Betriebskosten im Sammelgutausgang und -eingang realisiert werden können. Hierfür werden drei Layout- bzw. Betriebsvarianten entworfen, auf die der Algorithmus sukzessive angewandt wird. Im Anschluss kann durch Vergleich der Ergebnisse entschieden werden, welche Variante zu der größten Reduktion der Arbeitsaufwände führt (Kapitel 6.3.2).

6.3.1 Torbelegungsplanung

Folgende Abbildung zeigt die aktuellen Torbelegungspläne im SA und SE des Stückgutspeditors:

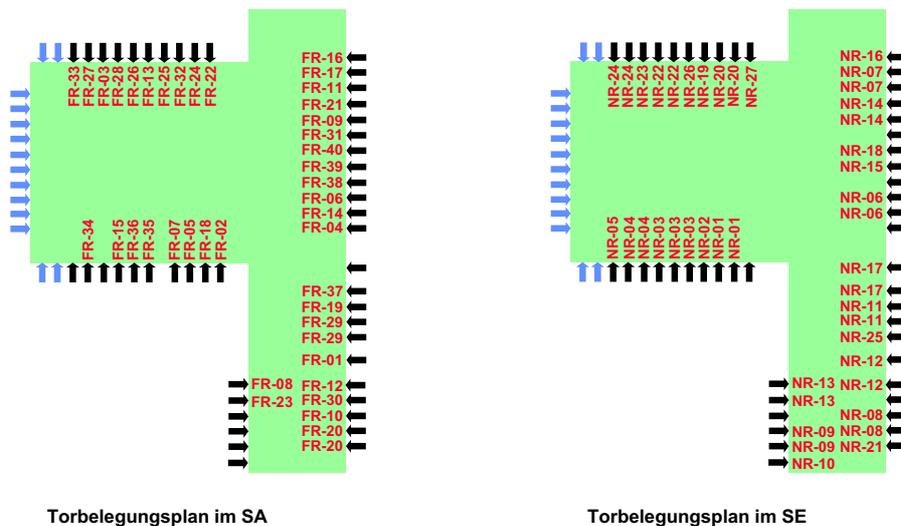


Abbildung 6.4: Praxiszenario: Bestehende Torbelegungspläne im SA und SE

Für beide Verkehrswellen sind die Tore 41 - 54 für den Eingang reserviert (blau eingefärbten Pfeile). Hier docken im SA die Nahverkehrstouren und im SE die Fernverkehrstouren an. Da der Spediteur die Torbelegungsplanung bisher nur als örtliche Zuordnung der ausgangsseitigen Relationen zu Toren verstanden hat, ist eine Darstellung der Ist-Situation in Form eines Gantt-Charts und die Ausweisung der in Summe entstehenden Wartezeiten der aktuellen Lösung nicht möglich. Die Torbelegungspläne werden daher nur über die resultierenden Wegsummen bewertet. Für die Daten aus Kapitel 6.2 ergibt sich im SA ein Bewertungsindex von 11,87 und im SE von 9,31.

Die Minimierung der eigenen innerbetrieblichen Umschlagressourcen ist das Hauptaugenmerk der Optimierung. Demnach wird die Zielfunktionsvariante A für die Optimierung gewählt, in der der Faktor B^t zur Bestrafung später Zuordnungen und Flüsse für alle Zeitscheiben auf Eins fixiert ist.

Das Ergebnis der Optimierung (hier: die ausgangsseitige Zuordnung der Relationen für die komplette Verkehrswelle SA bzw. SE zu Toren) wird in gleicher Weise wie die Torbelegungen der Ist-Situation in Abbildung 6.4 dargestellt:

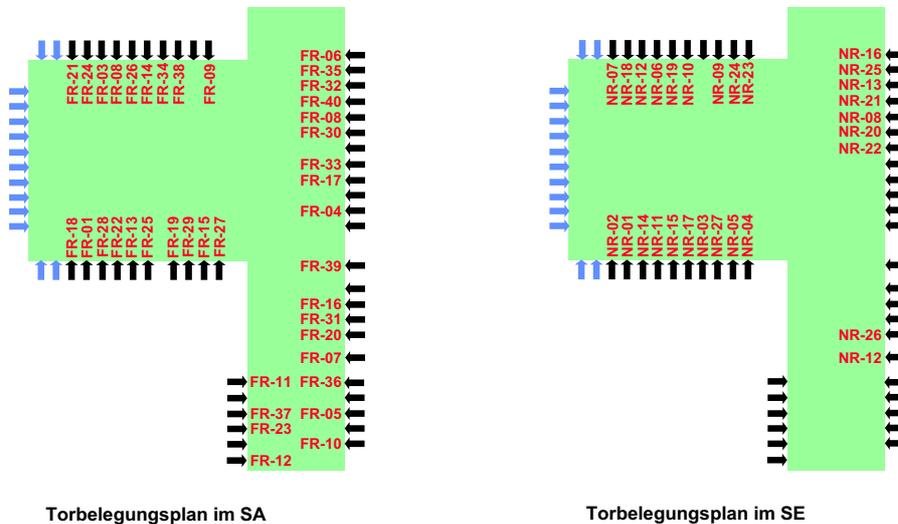


Abbildung 6.5: Praxiszenario: Optimierte Torbelegungspläne im SA und SE

In der vom Column Generation Ansatz berechneten Lösung, wie sie in Abbildung 6.5 dargestellt ist, liegt der Bewertungsindex für den SA bei 9,95 und für den SE bei 5,27. Dies bedeutet für den SA eine Reduktion der Wege um ca. 16 % und für den SE um ca. 43 %. Das hohe Einsparpotenzial im Fall des SE liegt darin begründet, dass der Betreiber bisher unkritisch die Nahverkehrsrelationen ihren Nummern entsprechend aufsteigend den Toren zugewiesen hat.

Im Column Generation Ansatz wird mit den Parametereinstellungen $v = 3$ und $w = 5$ gearbeitet. In diesem Fall ist dies ein zu früher Abbruch des Verfahrens, was sich u.a. darin zeigt, dass die Relationen NR-26 und NR-12 nicht wegoptimal zugeordnet werden. Dennoch liefert die Optimierung großes Einsparpotenzial, das mit dem Betreiber diskutiert werden kann. Hierbei ist es möglich, Verschiebungen von Tor-Relation-Zuordnungen in einem im Rahmen des Forschungsprojekts S 693 angefertigten Tools manuell durchzuführen und die Veränderungen im Bewertungsindex zu beobachten.

6.3.2 Layout- und Betriebsentscheidungen

Die Umschlaghalle des Stückgutspediteurs wurde im Zuge eines starken Geschäftszuwachses vor einigen Jahren um den schmalen rechten Teil erweitert. Durch diese Maßnahme konnten neue Tore und neue Relationsflächen für den täglichen Betrieb geschaffen werden. Der Nachteil der Erweiterung liegt in den relativ weiten Wegen, die für das Verbringen einer LE von der fest installierten Eingangszone an der linken Seite des Gebäudes in den neu erbauten Teil entstehen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ist darüber nachgedacht worden, inwieweit sich eine Verlagerung der Eingangszone in die Mitte der Halle oder gar eine Zweiteilung der Wareneingangszone, von denen aus die Ausgangstore in beiden Gebäudeteilen relativ schnell bedient werden

können, lohnen. Es werden im Folgenden drei Layoutvarianten untersucht, auf die das entwickelte Verfahren unter Beibehaltung aller anderen Werte angewandt wird. Die Notation und der Vergleich der entstehenden Bewertungsindizes (hier: Summe der Wege) der Varianten untereinander und in Relation zur optimierten Ist-Situation ermöglicht die Ausweisung der besten Alternative. Die festgelegten Varianten haben die folgende Gestalt:

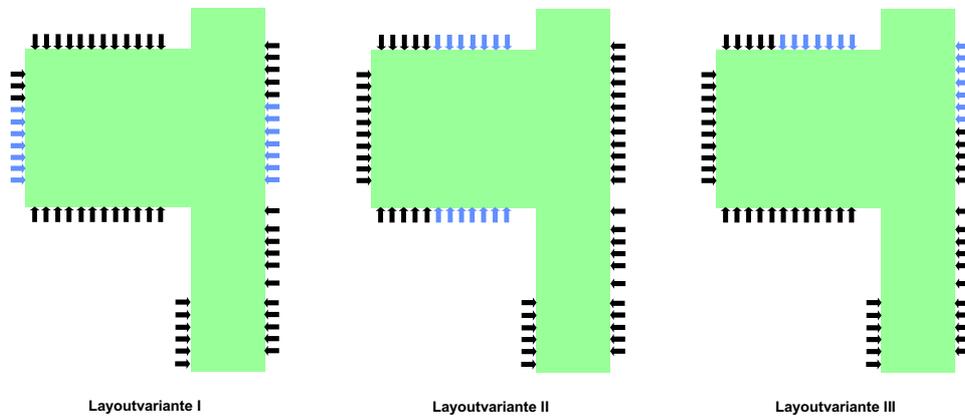


Abbildung 6.6: Layoutvarianten

In allen Varianten bleibt die Anzahl der Eingangstore auf vierzehn fixiert. Die ersten beiden Varianten stellen eine Umstellung des Betriebs auf zwei Eingangszonen dar. In Variante I sind diese gegenüberliegend angeordnet, wobei 7 Eingangstore an der bisherigen Seite des Gebäudes verbleiben und weitere 7 im rechten Teil geschaffen werden. Von beiden Zonen aus können die Tore in den jeweiligen Teilen des Gebäudes schnell erreicht werden. In der zweiten Variante werden die beiden Zonen in der Mitte der Halle angeordnet. In der dritten Variante wird mit einer Eingangszone gearbeitet, die allerdings nicht an einer äußeren Seite des Gebäudes, wie in der Ist-Situation, liegt, sondern in der Mitte liegend positioniert ist.

Die nach Anwendung des Verfahrens entstehenden Bewertungsindizes der Optimierung sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Layoutvariante	Bewertungsindex - absolut		Einsparung in Prozent	
	SA	SE	SA	SE
Ist	11,87	9,31	100,00	100,00
Ist - Optimiert	9,95	5,27	16,18	43,39
Variante I - Optimiert	8,34	4,89	29,74	47,48
Variante II - Optimiert	8,73	5,40	26,45	42,00
Variante III - Optimiert	9,73	5,19	18,03	44,25

Tabelle 6.3: Vergleich der Layoutvarianten: Bewertungsindizes im SA und SE

Für die Datengrundlage im SA führen alle Layoutvarianten zu einer Reduktion der innerbetrieblichen Wegstrecken im Vergleich zur optimierten Torbelegung unter Annahme des Ist-Layouts. Im SE hingegen konnte für die Layoutvariante II keine Verbesserung zur optimalen Torbelegung im Ist-Layout festgestellt werden. Diese Variante scheidet somit aus. Bezüglich der verbleibenden Varianten I und III gilt, dass sowohl im SA als auch im SE die dritte Variante nur leichte Verbesserungen in der Summe der innerbetrieblichen Wege im Vergleich zum optimierten Ist-

Layout erzeugt. Die erste Layoutvariante dagegen ermöglicht im SA eine große Ersparnis und im SE ebenfalls eine höhere im Vergleich zur dritten Variante.

Die Layoutvariante I wird folglich als die vorteilhafteste angesehen. Für sie kann gemeinsam mit dem Betreiber eine anschließende Feinplanung vorgenommen werden. Mögliche Aspekte in diesem Zusammenhang sind die Neugestaltung der innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Flächen sowie die notwendig gewordene Reorganisationen des Betriebs. Die Zerteilung einer Wareneingangszone bedeutet beispielsweise, dass eine Instanz geschaffen werden muss, die darüber entscheidet, an welche Eingangszone ein ankommendes Fahrzeug gewiesen wird, wodurch sich der Steuerungsaufwand erhöht. Hier greifen die Entscheidungen der Torbelegungsplanung mit denen einer Layoutplanung und einer Bestimmung von Betriebsstrategien ineinander.

6.4 Nutzung der entwickelten Modelle und Verfahren für weitere Planungsaufgaben

Das entworfene Optimierungsmodell sowie die Lösungsverfahren können neben den vorgestellten Aufgaben der Torbelegungsplanung auch zur Lösung anderer Planungsaufgaben verwendet werden. Diese lassen sich in drei Bereiche unterteilen und werden im Anschluss skizziert:

- Planungsaufgaben in Stückgutspeditiionsanlagen
- Planungsaufgaben in allgemeinen logistischen Verkehrsknoten
- Planungsaufgaben anderer logistischer oder mathematischer Bereiche

Planungsaufgaben in Stückgutspeditiionsanlagen:

Viele Parameter der Torbelegungsplanung werden dem Optimierungsmodell fest vorgegeben. So etwa die Anzahl an Ressourcen und deren Leistungseigenschaften, die Kapazität der Flächen oder die Fahrpläne der Touren. Bei sukzessiver Veränderung der Parameter kann das entwickelte Optimierungsmodell zur Berechnung und Bewertung verschiedener Szenarien und somit zur Entscheidung anderer strategischer, mittelfristiger und operativer Planungsaufgaben in Stückgutanlagen herangezogen werden. Wichtige Indikatoren für die Leistungsfähigkeit einer Stückgutanlage wie etwa der Durchsatz an Ladeeinheiten pro Zeiteinheit, die Betriebskosten oder aber die Wartezeiten der Fahrzeuge werden hierbei beobachtet. Aus einem Vergleich der Werte für die einzelnen Szenarien lassen sich Rückschlüsse auf die optimale Wahl der Parameter ziehen.

Beispiel: Fahrplan der Touren

Die Ankunftszeit und Abfahrtszeit der Touren und Relationen wird als fix angesehen. Beim Lösen des Optimierungsmodells wird automatisch durch die Formulierung entsprechender Nebenbedingungen darauf geachtet, dass die Andockphase sowie der zeitliche Fluss der Sendungen durch die Umschlaghalle hierauf abgestimmt sind. Dies kann bezüglich des Gesamtoptimums Nachteile haben. Kommen die Touren im Sammelgutausgang beispielsweise laut Fahrplan alle

sehr spät in der Anlage an, so kann der Algorithmus manchen von ihnen nicht mehr das wegoptimale Tor zuweisen. Auch kann nicht mehr auf eine gleichmäßige Auslastung der Ressourcen über den kompletten Optimierungszeitraum geachtet werden. Wird der Fahrplan aber für jede Tour im System gleich dem Start und dem Ende des kompletten Optimierungszeitraums gesetzt (d.h. $d(a^k) = 1$ und $d(b^k) = T'$), so sucht der Algorithmus für jede der Zeitscheiben die Touren an den Toren so aus, dass insgesamt eine möglichst geringe Ressourcenauslastung entsteht. Diese Entscheidungen können als Vorschlag für die tägliche Tourenplanung dienen.

Beispiel: Ressourceneinsatz

Die für die Hauptprozesse eingesetzten Ressourcen und ihre Leistungseigenschaften in Form von Typ, Anzahl, Kosten und Geschwindigkeit werden dem Algorithmus zu Beginn übergeben. Nebenbedingungen garantieren, dass pro Zeitscheibe nicht mehr innerbetriebliche Transportaufträge entstehen, als dies die vorhandenen Ressourcen erlauben. Daraus resultiert ein maximal möglicher Durchfluss an Ladeeinheiten durch das System je Zeitscheibe. Ein Betreiber kann sich die Frage stellen, ob durch eine Erhöhung der Entladeressourcen das System insgesamt schneller und flexibler wird. Die zusätzlichen Ressourcen erfordern einen Invest und erzeugen Betriebskosten. Andererseits sind eventuell bessere Zuordnungen der Fahrzeuge zu Toren und somit täglich niedrigere Ressourcenauslastungen möglich. Durch eine entsprechende Szenarienrechnung kann eine Handlungsempfehlung gegeben werden.

Beispiel: Layoutentscheidungen

Parameter zum Layout, die dem Algorithmus fest vorgegeben werden, sind die Größe der Logistikflächen oder aber auch die Anzahl der Tore und ihre funktionelle Einteilung in Eingangs- und Ausgangstore. Diese Parameter können variiert werden, um bei den anschließenden Rechenläufen zu überprüfen, ob ein Engpass entstehen wird. Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren wurde so z.B. im Fall einer klein und mittelständischen Spedition im Münsterland zur Entscheidungsunterstützung herangezogen. Die Betreiber der Spedition mussten ihre Halle aufgrund eines starken Geschäftszuwachses vergrößern. Laut Annahmen der Betreiber sollten 40 Tore ausreichen, um das erwartete zukünftige Geschäft und weitere Anstiege in den nächsten Jahren bewältigen zu können. Aufgrund der Vergangenheitsdaten wurden durchschnittliche Touren, Fahrpläne und Lademengen künstlich erzeugt und das Layout der Halle parametrisiert. Anschließend konnten Rechenläufe zur Überprüfung der Annahme durchgeführt werden.

Beispiel: Betriebsentscheidungen

Viele Betreiber von Stückgutanlagen arbeiten mit gebündelten Wareneingangszonen. Das bedeutet, dass mehrere nebeneinander liegende Tore ausschließlich zur Entladung genutzt werden dürfen. Ist die Halle kompakt im Layout (z.B. quadratisch), so führt dies zu keinen Nachteilen bei der späteren Verteilung der Sendungen auf die Bereitstellflächen. Viele Anlagen sind im Zuge einer steigenden Systemlast in der Länge erweitert worden oder aber es wurden aufgrund des Geländes verwinkelte Anbauten entwickelt. Der Wechsel hin zu einem Betrieb mit zwei entgegengesetzt liegenden Wareneingangszonen kann für die in der Verbringung entstehenden Wege vorteilhafter sein. Eine entsprechende Anwendung wurde in Kapitel 6.3 vorgestellt.

Beispiel: Yard Management oder Disposition

Sind die mittelfristigen Tor-Relation-Zuordnungen durch die Installation der Karten über den Toren bereits fixiert und sollen nicht erneuert werden, so kann das Modell für die verbleibende tägliche Disposition der ankommenden Fahrzeuge genutzt werden. In diesem Fall sind die Senken der innerbetrieblichen Transportaufträge bereits bekannt und das Modell verliert seine Verwandtschaft zu quadratischen Zuordnungsproblemen. Hierdurch kann es erheblich schneller Lösungen generieren. Die resultierenden optimalen Entscheidungen über die Andockphasen der Fahrzeuge zur Entladung bestimmen die Teilsysteme Ankunft und Abfahrt, d.h. das Yard Management. Trifft ein Fahrzeug beispielsweise gegen 14.15 Uhr in der Anlage ein und wird es erst gegen 15.00 Uhr einem Tor zugewiesen, so muss es zunächst auf eine Wartefläche gestellt werden.

Planungsaufgaben in allgemeinen logistischen Verkehrsknoten:

Der Umschlag zwischen Fahrzeugen in einer Stückgutspeditionsanlage innerhalb eines Verkehrstages ist ein logistischer Spezialfall. Dennoch sind die Basiselemente dieser Planungsaufgabe auch in anderen logistischen Verkehrsknoten zu finden. So ist die Aufgabe, ankommende Fahrzeuge den Be- und Entladestellen zuzuweisen, z.B. auch in Crossdockingterminals, in Distributionszentren oder Produktionsstandorten gegeben. Aufgrund der Größe des Werksgeländes oder der Logistikimmobilien sowie der Fülle an Informationen ist diese Aufgabe auch hier komplex und Planungsunterstützung notwendig. Unterschiede zwischen den Anwendungsfällen bestehen trotzdem. So ist in einem Distributionszentrum der Umschlag der Güter innerhalb eines Verkehrstages zwischen *Fahrzeugen* nicht gefordert. Die Senken der innerbetrieblichen Transportaufträge (Beladung) bzw. die Quellen (Entladung) sind nicht ein Fahrzeug, sondern z.B. eine Warenzone in einem Hochregallager, in dem die Güter laut Betriebsstrategie gelagert werden. Nach einer entsprechenden Anpassung des Netzwerks $N = (V, A, c)$ lässt sich das vorgestellte Modell und der später entwickelte Algorithmus zur Lösung dieser Aufgabe verwenden.

Planungsaufgaben anderer logistischer oder mathematischer Bereiche:

Das entwickelte Modell stellt zum einen eine Erweiterung des quadratischen Zuordnungsproblems um die Betrachtung innerbetrieblicher Prozessflächen, Umschlagmitteltypen und mehrstufiger Transportschritte dar. Zum anderen ist es eine Erweiterung des allgemeinen ganzzahligen Mehrgüterflussproblems um bestimmte Sachverhalte, wie etwa die Bündelung der Flüsse in bestimmten Knotenmengen oder aber der Beachtung von Kapazitäten auf Gruppen von Kanten. Das Optimierungsmodell kann bei Vernachlässigung der Nebenbedingungen zu diesen erweiterten Aspekten auch für die Lösung des klassischen QAP bzw. des klassischen Mehrgüterflussproblems genutzt werden. Des Weiteren ist das Problem der Zuordnung von Objekten zu Ressourcen für eine bestimmte Belegdauer mit Scheduling- oder Maschinenbelegungsproblemen verwandt. Durch Weglassen der nicht benötigten Nebenbedingungen, kann das entwickelte Verfahren auch in diesem Bereich Anwendung finden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Stückgutspeditionsanlagen dienen dem zeitgerechten und fehlerfreien Umschlag von Sendungen zwischen ankommenden Touren und abgehenden Relationen innerhalb eines Stückguttransportnetzes. Der Umschlag der Sendungen gestaltet sich als mehrstufiger innerbetrieblicher Transport- und Handlingsprozess, der in die Hauptprozesse Entladung, Verbringung und Beladung zerlegt werden kann. Für den Transport der Sendungen werden in der Mehrzahl der Fälle manuelle Umschlagmittel eingesetzt. Diese müssen von entsprechendem Personal bedient werden, so dass die Betriebskosten bzw. die Personalkosten einer Stückgutspeditionsanlage einen hohen Teil der Gesamtkosten ausmachen. Eine Möglichkeit, die Betriebskosten nachhaltig zu senken, liegt in der Minimierung der innerbetrieblichen Transportleistung. Die Transportleistung wird maßgeblich durch die Anzahl der Transportaufträge und die Lage ihrer Quellen und Senken bestimmt. Letztere resultieren zum einen aus dem Andockverhalten der Fahrzeuge an den Toren und zum anderen aus der Steuerung des innerbetrieblichen Materialflusses.

Zur Optimierung der angesprochenen Aspekte wurde in der vorliegenden Arbeit der Begriff der *Torbelegungsplanung in Stückgutspeditionsanlagen* definiert. Die Torbelegungsplanung umfasst sowohl strategische als auch mittelfristige und operative Entscheidungsebenen. Strategisch unterliegt der Torbelegungsplanung die Einteilung der vorhandenen Tore in Eingangs- und Ausgangstore und somit die Definition ihrer logistischen Funktion während des Betriebs. Mittelfristig wird durch die Torbelegungsplanung die örtliche Zuordnung der Relationen zu den Ausgangstoren im Sammelguteingang und im Sammelgutausgang festgelegt. Diese bleibt für eine längere Dauer, z.B. ein Jahr oder mehrere Monate, bestehen. Eingangsseitig muss zusätzlich, nach Fixierung der vorgelagerten Entscheidungsebenen, in einem operativen Rahmen die örtliche und zeitliche Zuordnung der ankommenden Touren zu den Eingangstoren organisiert werden. Eine reine Betrachtung der äußeren Schnittstelle, d.h. des Andockverhaltens der Fahrzeuge an den Toren, ist im Hinblick auf einen aufeinander abgestimmten Materialfluss zwischen den ankommenden und den abgehenden Fahrzeugen zu einseitig. Die Optimierung der Schnittstelle wird in der Torbelegungsplanung daher um die Optimierung des innerbetrieblichen zeitlichen und örtlichen Flusses der Sendungen durch die Umschlaghalle unter Verwendung der daran beteiligten Ressourcen und Flächen erweitert. Ziel der Torbelegungsplanung ist, basierend auf einem Modelltag einen Regelplan zu entwickeln, der als Grundlage zur Steuerung der Anlage über einen längeren Zeitraum dient.

Die Torbelegungsplanung ist eine sehr komplexe Planungsaufgabe, bei der eine Vielzahl an Informationen aus unterschiedlichen Bereichen zu verarbeiten und Wechselwirkungen zwischen den Entscheidungen zu beachten sind. In der Praxis ist für die Zuweisung der Fahrzeuge zu den Toren der Betriebslenker oder der Disponent zuständig. Dieser wird bei seinen Entscheidungen derzeit kaum durch Informationstechnik oder Softwaretools unterstützt. Erst wenige Spediteure haben Tools zur Visualisierung der aktuellen Situation in der Umschlaganlage im Einsatz. Hintergrund für das Fehlen von Lösungen für die Praxis ist u.a. die bisher nur geringe automatisierte Erfassung der hierfür notwendigen Informationen. In der wissenschaftlichen Literatur wurde die Torbelegungsplanung fast ausschließlich als örtliche Zuordnung der Touren und Relationen zu Toren verstanden. Nur wenige Arbeiten integrieren einen zeitlichen Aspekt. Der innerbetriebliche Fluss der Sendungen und die Nutzung der Ressourcen wird i.d.R. komplett vernachlässigt. Das in den Arbeiten entstehende Abbild der logistischen Realität ist daher sehr grob und weit von den Anforderungen der logistischen Praxis entfernt.

Dieser Sachverhalt wurde zum Anlass genommen, in der vorliegenden Arbeit ein praxisnahes Abbild des logistischen Systems Torbelegungsplanung in Stückgutspeditionsanlagen zu entwerfen. Nach einer Identifikation der relevanten Objekte und einer Beschreibung ihrer Eigenschaften, wurden die in der Praxis verwendeten Planungsregeln und Optimierungsziele erfasst. Basierend hierauf wurde anschließend ein zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen entwickelt, welches parallel sowohl die örtliche und zeitliche Zuordnung der Touren und Relationen zu den Toren als auch den innerbetrieblichen Materialfluss optimiert. Neben der Entscheidungsebene Zeit und somit den Fahrplänen der Touren und Relationen werden erstmals auch innerbetriebliche Prozessschritte sowie Ressourcentypen mit ihren Leistungseigenschaften und vorhandene Flächen mit unterschiedlichen logistischen Funktionen und Kapazitäten integriert. Im Optimierungsmodell werden zwei Zielsetzungen verfolgt. Zum einen ist eine Minimierung des innerbetrieblichen Ressourcenaufwands, d.h. der in Summe zu fahrenden Wege für die umzuschlagenden Sendungen, relevant. Zum anderen ist für den Betreiber einer logistischen Anlage wichtig, die wartenden Fahrzeuge möglichst früh den Toren zuzuweisen. Die Minimierung der Wartezeiten der Fahrzeuge stellt das zweite Ziel der Optimierung.

Das entwickelte Modell wurde aufgrund seiner Verwandtschaft zu quadratischen Zuordnungsproblemen als \mathcal{NP} -hart identifiziert. Zudem gehört es zu der Klasse der ganzzahligen Optimierungsprobleme. Zur Überprüfung seiner Eignung für die logistische Praxis wurde das Branch-and-Cut Verfahren auf das Optimierungsmodell angewandt. Hierfür wurden Testszenarien unterschiedlicher logistischer und mathematischer Komplexität entwickelt und als Inputdaten an das in CPLEX 10.0 implementierte Lösungsverfahren übergeben. Anschließend wurde der Lösungsverlauf hinsichtlich Laufzeit und Lösungsgüte beobachtet und interpretiert. Die Testanwendung und eine Rückinterpretation der Optimierungsergebnisse in die Systemwelt der Logistik haben gezeigt, dass das entwickelte zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen ein geeignetes Abbild der Optimierungsaufgabe ist. Das Branch-and-Cut Verfahren ist allerdings für die Optimierungsaufgabe insgesamt nicht geeignet. Das Verfahren erzeugte in den Testanwendungen bereits bei mittelgroßen Problemen nur wenige Lösungen, die nach einer Laufzeiten von 60 Minuten eine große Lücke zur unteren Schranke des Problems aufwiesen. Bei großen bis sehr großen Probleminstanzen konnte das Verfahren in einer Stunde Laufzeit gar keine zulässigen Lösungen entwickeln. Das Branch-and-Cut Verfahren ist nur für kleine Szenarien geeignet.

Hieraus resultierend wurde in der vorliegenden Arbeit unter Beibehaltung des mathematischen Modells ein neues Optimierungsverfahren entwickelt. Kernidee des Verfahrens ist die Dekomposition des Ursprungsmodells und die Ableitung zweier Optimierungsmodelle, die die Entwicklung und Anwendung eines angepassten Column Generation Verfahrens auf die Torbelegungsplanung ermöglichen. Die Dekomposition erfolgt über die Definition des Begriffs *Routing einer Tour* durch das Netzwerk des zeitdiskreten Mehrgüterflussproblems mit Nebenbedingungen. Anschließend muss über ein Auswahlmodell genau ein Routing für jede der Touren aus der Menge aller zulässigen und bekannten Routings bestimmt werden. Hierbei wird die Einhaltung gemeinsam genutzte Ressourcenkapazitäten überprüft. Zur Ermittlung zulässiger Routings für eine Tour wird das Ursprungsmodell, d.h. das zeitdiskrete Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen, reduziert um einige Sachverhalte und mit einer modifizierten Zielfunktion, herangezogen. Aufgrund der Tatsache, dass dieses für die Touren einzeln durchlaufen wird und somit nicht mehr zur Klasse der Mehrgüterflussprobleme zählt, verliert es an Komplexität. Zulässige Routings können schnell ermittelt werden. Das neu entwickelte Column Generation Verfahren wurde auf die gleichen Testinstanzen wie zuvor das Branch-and-Cut Verfahren angewandt, um die beiden Verfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit vergleichen zu können. Dabei zeigte sich, dass vor allem bei mittelgroßen und großen Testinstanzen der Column Generation Ansatz den Standardalgorithmus der diskreten Optimierung bezüglich Laufzeit und Güte der Lösungen klar übertrifft.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ermöglichen es den Betreibern von Stückgutspeditionsanlagen, bei Aufnahme entsprechender Daten zum Layout, den Touren bzw. Relationen, den Fahrplänen, den Prozessen und Ressourcen sowie der Systemlast, erstmals strukturiert und mittels mathematischer Verfahren Regelpläne zum optimierten Betrieb ihrer Anlagen zu entwerfen. Der Regelplan kann von den Unternehmen in der Praxis genutzt werden, um entsprechend seiner Vorgaben zu den strategischen, mittelfristigen und operativen Entscheidungen der Torbelegungsplanung, die Ausrichtung der innerbetrieblichen Prozesse und die Steuerung der Fahrzeuge auf dem Hof der Anlage vorzunehmen.

Ausblick auf das Forschungsgebiet:

Der in dieser Arbeit entwickelte Column Generation Ansatz ist ein heuristisches Verfahren. Ziel des Verfahrens ist die Identifikation einer Menge an "guten" Routings bereits im Root-Knoten des Branch-and-Bound Baums, die im Anschluss für den weiteren Suchlauf im Branch-and-Bound Baum genutzt werden. Weiterer mathematischer Forschungsbedarf besteht darin, den Column Generation Ansatz in einen Branch-and-Price Algorithmus einzubetten, welcher exakte Lösungen produziert. Der Unterschied zu dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren liegt darin, dass die Erzeugung der Spalten bei Bedarf in allen Knoten des Branch-and-Bound Baumes geschieht. Es ist zu erwarten, dass die Laufzeit des Verfahrens steigen wird. Ob und in welchem Ausmaß die Entwicklung eines Branch-and-Price Verfahrens zu einer Verbesserung der Lösungen führt, ist das Ziel weiterer Untersuchungen.

Im Verlauf des Branch-and-Cut Verfahrens wurden LP-Relaxierungen in den Knoten des Lösungsbaums berechnet, die als untere Schranke für den Zielfunktionswert galten. Die Anwendung auf kleine Testszenarien hat gezeigt, dass ab einer bestimmten Anzahl an Iterationen keine besseren ganzzahligen Lösungen mehr im Baum gefunden werden. Statt dessen hebt sich

die untere Schranke langsam an, bis sie das Zielfunktionsniveau der bisher besten zulässigen Lösung erreicht. Dies weist darauf hin, dass sie eine schlechte Näherung des theoretischen Optimums ist. Die Bestimmung besserer unterer Schranken kann zu einer Beschleunigung des Lösungsverfahrens führen. Weiterer Forschungsbedarf liegt daher in der Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung realistischer unterer Schranken für die formulierte Problemklasse. Im Bereich der quadratischen Optimierungsprobleme sind hierzu Arbeiten entstanden. Es gilt ihre Übertragbarkeit auf die Problemklasse der Torbelegungsplanung, welche mit den quadratischen Zuordnungsproblemen verwandt ist, zu prüfen.

Forschungsbedarf für die Verkehrslogistik liegt in der Erweiterung der vorgestellten Optimierungsaufgabe Torbelegungsplanung um die Komponente der außerbetrieblichen Tourenplanung. Unter Tourenplanung kann sowohl der Einsatz der Fahrzeuge im Nahverkehrsgebiet als auch im Hauptlauf zwischen den Stückgutanlagen im übergeordneten Transportnetz verstanden werden. Informationen aus der Tourenplanung, wie etwa die Fahrpläne der Fahrzeuge, sind in diesem Fall nicht mehr fest gegeben sondern können ebenfalls im Modell mit entschieden werden. Ziel einer Kombination der beiden in der Wissenschaft bisher getrennt betrachteten Planungsaufgaben Torbelegungsplanung und Tourenplanung ist eine gleichmäßigere Zulaufsteuerung der Fahrzeuge in die Umschlaganlage, wodurch es zur Entzerrung der Spitzenzeiten samt Reduktion des benötigten Personals sowie der Verkehrsbelastungen auf dem Hof der Anlage kommen kann.

Die Torbelegungsplanung verbindet verschiedene Bereiche miteinander, welche für die Optimierung informationstechnisch erfasst werden müssen. So gehen Strukturinformationen zum Layout der Halle in die Optimierung ein, Informationen zur täglichen Systemlast, den Touren etc.. Es hat sich im Rahmen des Forschungsprojekts S 693 gezeigt, dass das vorhandene Informationsangebot in den Anlagen noch nicht über die erforderliche Qualität verfügt. Beispielsweise werden Touren und die Ankunftszeiten der Fahrzeuge nicht täglich erfasst und die Systemlast ist oft nur über eine Gesamttonnage beschrieben. Hier besteht Bedarf, Informationssysteme zu schaffen, die die benötigten Informationen für die Steuerung einer Anlage automatisch erfassen und bereitstellen. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung dafür, dass die Algorithmen der Torbelegungsplanung in Form eines Leitstandes in die mittelfristige und operative Arbeit des Anlagenbetreibers integriert werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Ahuja, R.; Magnanti, T.; Orlin, J.: *"Network Flows - Theory, Algorithms and Applications"*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1. Auflage, 1993.

- [2] van den Akker, M.; Hoogeveen, H.; van de Velde S.: *"Applying Column Generation to Machine Scheduling"*, In: G. Desaulniers, J. Desrosiers and M.M. Solomon (eds.), *Column Generation, GERAD 25th Anniversary Series*, Springer, New York, Seite 303-330, 2005.

- [3] Andersen, E.D.: *"Linear Optimization: Theory, Methods and Extensions"*, Odense University, Department of Management, 1998.

- [4] Anstreicher, K.: *"Recent Advances in the Solution of Quadratic Assignment Problems"*, In: *Mathematical Programming, Serie B*, Nr. 97, Seite 27-42, 2003.

- [5] Arnold, D.: *"Materialflusslehre"*, Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden, 2. Auflage, 1998.

- [6] Baier, G.; Köhler, E.; Skutella, M.: *"On the k-splittable Flow Problem"*, In: *Proceedings of the 10th Annual European Symposium on Algorithms*, Springer, Seite 101-113, 2002.

- [7] Barnhart, C.; Johnson, E.; Nemhauser, G.L.; Savelsbergh, M.W.P.; Vance, P.: *"Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs"*, In: *Operations Research, Informs*, Nr. 46, Seite 316-329, 1998.

- [8] Barnhart, C.; Hane, A.; Vance, P.: *"Using Branch-and-Price-and-Cut to Solve Origin-Destination Integer Multicommodity Flow Problems"*, In: *Operations Research, Informs*, Volume 48, Nr. 2, Seite 318-326, 2000.

- [9] Baudach, J.: *"Das Crew Scheduling Problem"*, Universität Dortmund, Fachbereich Mathematik, Diplomarbeit, 2006.

-
- [10] Bartz-Beielstein, T.; Chmielewski, A.; Janas, M.; Naujoks, B.; Scheffermann, R.: "*Optimizing Door Assignment in LTL-terminals by Evolutionary Multiobjective Algorithms*", In Proc. Congress on Evolutionary Computation, IEEE Press, Piscataway NJ, 2006.
- [11] Bermudez, R.; Cole, M.: "*A Genetic Algorithm Approach to Door Assignments in Breakbulk Terminals*", MBTC-1102, Mack-Blackwell Transportation Center, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, Technical Report, 2001.
- [12] Brucker, P.; Knust, S.: "*Complex Scheduling*", GOR Publications, Springer, Berlin-Heidelberg, 2005.
- [13] Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.: "*Handbuch der Verkehrslogistik*", Springer, Berlin-Heidelberg, 1998.
- [14] Bussieck, M.: "*Optimal Lines in Public Rail Transport*", Universität Braunschweig, Fachbereich Mathematik, Diss., 1998.
- [15] Cappanera, P.; Gallo, G.: "*A Multicommodity Flow Approach to the Crew Rostering Problem*", In: Operations Research, Informs, Volume 52, Nr. 4, Seite 583-596, 2004.
- [16] Cardeneo, A.: "*Modellierung und Optimierung des B2C-Tourenplanungsproblems mit alternativen Lieferorten und -zeiten*", Universität Karlsruhe, Fachbereich Maschinenbau, Diss. 2005.
- [17] Chmielewski, A.; Clausen, U.: "*Entwicklung eines Dispositionsleitstandes zur Bestimmung optimaler Torbelegungen in Stückgutpeditionsanlagen*", In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) Journal, 2005.
- [18] Chmielewski, A.; Clausen, U.: "*Entwicklung optimaler Torbelegungspläne in Stückgutanlagen*" In: DSOR Contributions to Information Systems, MKWI, Information Systems in Transport and Traffic, Seite 103-116, 2006.
- [19] Chmielewski, A.; Clausen, U.; Schlüter, O.; Stein, F.: "*Yard Management - Schnittstellenoptimierung in logistischen Anlagen*", In: Software in der Logistik, Hussmannverlag, Seite 30-34, 2006.
- [20] Clausen, U.; Neumann, L.: "*Logistikstrategien und Güterverkehr*", In: Wirtschaftsverkehr, Verlag Praxiswissen, Seite 49-62, 2005.

- [21] Clausen, U.; Heimann, B.; Goerke, M.: *"Nur gemeinsam überzeugend - Inner- und außerbetriebliche Anforderungen einer Umschlaganlage"*, In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik (dhf), Jubiläumsausgabe, Nr. 6, Seite 158-160, 2004.
- [22] Clausen, U.: *"Der Disponent wünscht keine vollendeten Tatsachen. An geeigneter Software für die Transportlogistik besteht weiterhin großer Bedarf"*, In: DVZ Sonderbeilage Logistik 56, Nr. 123, Seite 33, 2002.
- [23] Commander, C. W.: *"A Survey of the Quadratic Assignment Problem with Applications"*, In: Morehead Electronic Journal of Applied Mathematics, Nr. 4, Seite 1-14, 2005.
- [24] Danna, E.; Le Pape, C.: *"Branch-and-Price Heuristics: A Case Study on the Vehicle Routing Problems with Time Windows"*, In: G. Desaulniers, J. Desrosiers and M.M. Solomon (eds.), Column Generation, GERAD 25th Anniversary Series, Springer, New York, Seite 99-129, 2005.
- [25] Dantzig, G. B.; Wolfe, P.: *"Decomposition Principle for Linear Programs"*, In: Operations Research, Informs, Nr. 8, Seite 101-111, 1960.
- [26] Deutsche Norm: *"Paletten für die Handhabung von Gütern"*, DIN EN ISO 445, 1998.
- [27] Dilling, C.; Reinholz, A.: *"Ein Bewertungsmodell zur Optimierung der Rampenbelegung und der Relationsflächen einer Stückgutumschlaghalle"*, Universität Dortmund, Sonderforschungsbereich 559 (Modellierung großer Netze in der Logistik), Technical Report, 2003.
- [28] Dilling, C.; Reinholz, A.: *"Umschlagoptimierung in Stückgutumschlaghallen durch dynamische Rampenbelegung"*, In: Material Management m+m Distribution, Nr. 1, Seite 26-30, 2006.
- [29] Domschke, W; Drexel, A.: *"Logistik: Rundreisen und Touren"*, Oldenbourg Verlag, München, 3. Auflage, 1990.
- [30] Domschke, W; Drexel, A.: *"Einführung in Operations Research"*, Springer, Berlin-Heidelberg, 6. Auflage, 2005.
- [31] Dréo, J.; Pétrowski, A.; Siarry, P.; Taillard, E.: *"Metaheuristics for Hard Optimization"*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2006.

- [32] Arbeitskreis RFID in Spedition und Logistik - DSLV: *"RFID in Spedition und Logistik mit Schwerpunkt Sammelgutspedition"*, Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (DSLV) - Studie, 2003.
- [33] Freling, R.: *"Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling"*, Erasmus Universität Rotterdam, Tinbergen Research Institut, Diss., 1997.
- [34] Futuyama, D.J.: *"Evolutionenbiologie"*, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 1990.
- [35] Gudehus, T.: *"Optimale Auslegung von Logistikhallen (1)"*, In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik - dhf, AGT Verlag, Ludwigsburg, Nr. 2, Seite 16-20, 2005.
- [36] Gudehus, T.: *"Optimale Auslegung von Logistikhallen (2)"*, In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik - dhf, AGT Verlag, Ludwigsburg, Nr. 3, Seite 13-15, 2005.
- [37] Gue, K.R.; Bartholdi, J.: *"The Best Shape for a Crossdock"*, Naval Postgraduate School Monterey, Technical Report, 2000.
- [38] Gue, K.R.; Bartholdi, J.: *"Reducing Labor Costs in an LTL Cross-docking Terminal"*, In: Operations Research, Informs, Nr. 48, Seite 823-832, 1999.
- [39] Gue, K.R.; Keebom, K.: *"Staging Queues in Material Handling and Transportation Systems"*, In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, M.W. Rohrer (Herausgeber), Seite 1104-1108.
- [40] Gue, K.R.: *"The effects of Trailer Scheduling on the Layout of Freight Terminals"*, In: Transportation Science, Volume 33, Nr. 4, Seite 419-428, 1999.
- [41] Gue, K.R.: *"Freight Terminal Layout and Operations"*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Diss., 1995.
- [42] Hall, A., Hippler, S.; Skutella, M.: *"Multicommodity Flows Over Time: Efficient Algorithms and Complexity"*, In: Automata, Languages and Programming, Volume 2719, Seite 397-409, 2003.
- [43] Hoos, H.H.; Stützle, T.: *"Stochastic Local Search: Foundations and Applications"*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2004.

- [44] Huisman, D.: *"Integrated and Dynamic Vehicle and Crew Scheduling"* Rotterdam, Erasmus University, Tinbergen Institute, Diss., 2004.
- [45] Huisman, D.; Jans, R.; Peeters, M.; Wagelmans, A.P.M.: *"Combining Column Generation and Lagrangian Relaxation"* In: G. Desaulniers, J. Desrosiers and M.M. Solomon (eds.), *Column Generation, GERAD 25th Anniversary Series*, Springer, New York, Seite 247-270, 2005.
- [46] Jaeger, G.; Laudel, H.: *"Transportmanagement. Die Fachkunde des Güterverkehrs für Spedition, Handel und Industrie"*, Feldhaus Verlag, Hamburg, 3. Auflage, 1999.
- [47] Jünemann, R.; Schmidt, T.: *"Materialflusssysteme"*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2. Auflage, 1999.
- [48] Käppner, M.; Laakmann, F.; Stracke, N.: *"Dortmunder Prozesskettenparadigma - Grundlagen"*, Universität Dortmund, Sonderforschungsbereich 559 (Modellierung großer Netze in der Logistik), Technical Report, 2002.
- [49] Klaus, P.; Krieger, W.: *"Gabler Lexikon Logistik"*, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 3. Auflage, 2004.
- [50] Klaus, P.; Kille, C.: *"Top 100 der Logistik"*, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 4. Auflage, 2006.
- [51] Koopmans, T. C.; Beckmann, M.: *"Assignment Problems and the Location of Economic Activities"*, In: *Econometric*, Volume 25, Nr. 1, Seite 53-76, 1957.
- [52] Korte, B.; Vygen, J.: *"Combinatorial Optimization"*, Springer, Berlin-Heidelberg, 3. Auflage, 2006.
- [53] Kuhn, A.: *"Prozessketten in der Logistik. Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien"*, Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995.
- [54] Li, Y.; Lim, A.; Rodrigues, B.: *"Crossdocking - JIT Scheduling with time windows"*, In: *Journal of the Operational Research Society*, Nr. 55, Seite 1342-1351, 2004.
- [55] Lübbecke, M. E.: *"Engine Scheduling by Column Generation"*, Universität Braunschweig, Fachbereich Mathematik, Diss., 2001.

-
- [56] Lübbecke, M. E.; Desrosiers, J.: *"Selected Topics in Column Generation"*, In: Operations Research, Informs, Volume 53, Nr. 6, Seite 1007-1023, 2005.
- [57] Lübbecke, M. E.; Desrosiers, J.: *"A Primer in Column Generation"*, In: Column Generation, Desaulniers, Desrosiers, Solomon (Herausgeber), Springer, New York, Seite 1-32, 2005.
- [58] Lublow, R.: *"Konzeption eines telematikgetützten Speditionsleitstandes für den Sammelgutumschlag"*, Universität Dortmund, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1995.
- [59] Mitchell, J.E.: *"Cutting Plane and Column Generation Methods using Interior Point Methods"*, Delft University of Technology, 1997.
- [60] Mitchell, J.E.: *"Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization Problems"*, In: P.M. Pardalos, M.G.C. Resende (eds.) Handbook of Applied Optimization, Oxford University Press, New York, Seite 65-77, 2003.
- [61] Mitchell, J.E.; Pardalos, P.; Resende, M.: *"Interior Point Methods for Combinatorial Optimization"*, In: Handbook for Combinatorial Optimization, Kluwer Academic Publishers, Nr. 1, Seite 189-298, 1998.
- [62] Neumann, K.; Morlock, M.: *"Operations Research"*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1993.
- [63] Papadimitriou, C.H.; Steiglitz, K.: *"Combinatorial Optimization - Algorithms and Complexity"*, Dover Publications Inc., Mineola, 1998.
- [64] Papendick, W.: *"Prozessoptimierung im Stückgutumschlag - von der Planung bis zum Controlling"*, Deutscher-Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2005.
- [65] Peck, K.E.: *"Operational Analysis of Freight Terminals Handling Less Than Container Load Shipments"*, Universität Illinois, Urbana-Champaign, 1983.
- [66] Sahni, S.; Gonzalez, T.: *"P-complete Approximation Problems"*, In: Journal of the Association for Computing Machinery, 23, Seite 555-565, 1976.
- [67] Sandholm, T.: *"Algorithms for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions"*, In: Artificial Intelligence, Volume 135, Seite 1-54, 2002.

- [68] Sol, M.; Savelsbergh, M.: *"A Branch-and-Price Algorithm for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows"*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Technical Report, 1994.
- [69] Schneider, A.: *"LKWControl, Dynamische LKW-Steuerung auf dem Werksgelände"*, Materialflusskongress, München, VDI-Berichte, Nr. 1928 - Vortrag, 2006.
- [70] Schwefel, H.-P.: *"Evolution and Optimum Seeking"*, Wiley, New York, Sixth-Generation Computer Technology, 1995.
- [71] Skutella, M.: *"Approximating the Single Source Unsplittable Min-Cost Flow Problem"*, In: *Mathematical Programming*, Springer, Ser. B 91, Seite 493-514, 2001.
- [72] Sol, M.: *"Column Generation Techniques for Pickup and Delivery Problems"*, Technische Universität Eindhoven, Diss., 1994.
- [73] Solomon, M.M.: *"Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints"*, In: *Operations Research*, Informs, Volume 35, Seite 254-265, 1985.
- [74] Stickel, M.; Metzelaers, M.: *"Ein zentrales Steuerungsmodell für bestandslose Umschlagzentren"*, Universität Karlsruhe, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Technical Report, 2005.
- [75] Stickel, M.; Furmans, K.: *"An Optimal Control Policy for Crossdocking Terminals"*, In: *International Conference on Operations Research*, Gesellschaft für Operations Research (GOR), Springer, Berlin-Heidelberg, 2005.
- [76] Stickel, M.: *"Effiziente, operative Torbelegung mittels kombinatorischer Auktionen"*, In: *2. Fachkolloquium der WGTL, Tagungsbeiträge*, Hrsg.: Hans-Georg Marquardt, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Seite 145-158, 2006.
- [77] Stumpf, P.: *"Tourenplanung im speditionellen Güterfernverkehr"*, GVB Schriftenreihe, Band 39, 1998.
- [78] Ten Hompel, M.; Schmidt, T.: *"Warehouse Management"*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2. Auflage, 2005.
- [79] Tripp, C.: *"Chancen und Risiken mittelständischer System-Stückgutkooperationen in Deutschland"*, Fraunhofer Institut Integrierte Schaltungen - Arbeitsgruppe für Technologien der Logistik-Dienstleistungswirtschaft ATL, Studie, 2003.

- [80] Tripp, C.: *"Externes Rating für Logistik-Dienstleister"*, DVZ-Symposium "Niedrige Zinsen durch erfolgreiches Rating", Köln, Vortrag, 2003.
- [81] Truffot, J.; Duhamel, C.; Mahey, P.: *"Using Branch-and-Price to Solve Multicommodity k-splittable Flow problems"*, In: The Proceedings of International Network Optimisation Conference, 2005.
- [82] Tsui, L.; Chang, C.: *"An Optimal Solution to a Dock Door Assignment Problem"*, In: Computers and Industrial Engineering, Volume 23, Nr. 1, Seite 283-286, 1992.
- [83] Villeneuve, D.; Desrosiers, J.; Lübbecke, M. E.; Soumis, F.: *"On Compact Formulations for Integer Programs solved by Column Generation"*, In: Annals of Operations Research, Springer Netherlands, Volume 139, Nr. 1, Seite 375-388, 2005.
- [84] Verein Deutscher Ingenieure: *"Güterumschlagszonen und Verladetechniken mit Flurförderzeugen für Stückgutverkehre"*, VDI-Richtlinie 2360, 1992.
- [85] Vries de, S.; Vohra, R.V.: *"Combinatorial Auctions"*, In: Journal on Computing, Inform, Volume 15, Nr. 3, Seite 284-309, 2003.
- [86] Vogler, J.: *"Der Wandel der Sammelgutladungsspediteure zu industrialisierten Stückgutnetzen"*, In: Entwicklungspfade und Meilensteine moderner Logistik, 2004
- [87] Wegener, I.: *"Komplexitätstheorie - Grenzen der Effizienz von Algorithmen"*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2003.
- [88] Wlcek, H.: *"Gestaltung der Güterverkehrsnetze von Sammelgutspeditionen"*, GVB Schriftenreihe, Band 37, 1998.

Kapitel A

Anhang

A.1 Inputdaten der künstlichen Testinstanzen

Testszenario I:

Layout der Umschlaghalle:

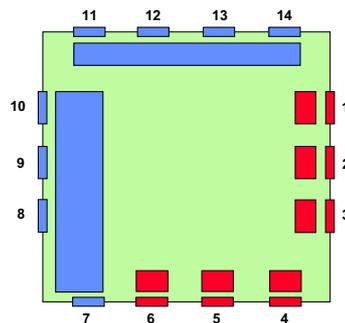


Abbildung A.1: Testszenario I: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen:

Die Entfernungen zwischen den Toren und den Bereitstell- bzw. Entladeflächen beträgt 4 Meter.

	BF1	BF2	BF3	BF4	BF5	BF6	BF7	BF8	BF9	BF10	BF11	BF12	BF13	BF14
EF1	0	3	6	9	15	18	21	15	12	9	6	12	9	6
EF2	3	0	3	6	12	15	18	12	9	6	9	15	12	9
EF3	6	3	0	3	9	12	15	9	6	9	12	18	15	12
EF4	9	6	3	0	6	9	12	6	9	12	15	21	18	15
EF5	15	12	9	6	0	3	6	12	15	18	21	27	24	21
EF6	18	15	12	9	3	0	3	9	12	15	18	24	27	24
EF7	21	18	15	12	6	3	0	6	9	12	15	21	24	27
EF8	15	12	9	6	12	9	6	0	3	6	9	15	18	21
EF9	12	9	6	9	15	12	9	3	0	3	6	12	15	18
EF10	9	6	9	12	18	15	12	6	3	0	3	9	12	15
EF11	6	9	12	15	21	18	15	9	6	3	0	6	9	12
EF12	12	15	18	21	27	24	21	15	12	9	6	0	3	6
EF13	9	12	15	18	24	27	24	18	15	12	9	3	0	3
EF14	6	9	12	15	21	24	27	21	18	15	12	6	3	0

Tabelle A.1: Testszenario I: Entfernungen in [m]

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 16:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 20 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	14:00	16:00	5
NT2	14:00	16:00	10
NT3	14:00	16:00	2
NT4	14:00	16:00	7
NT5	14:00	16:00	8
NT6	14:00	16:00	4

Tabelle A.2: Testszenario I: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	14:00	16:00	4
FT2	14:00	16:00	8
FT3	14:00	16:00	9
FT4	14:00	16:00	8
FT5	14:00	16:00	3
FT6	14:00	16:00	4

Tabelle A.3: Testszenario I: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6
NT1	2	3	0	0	0	0
NT2	0	3	4	2	1	0
NT3	0	0	0	0	1	1
NT4	0	0	3	4	0	0
NT5	2	2	2	2	0	0
NT6	0	0	0	0	1	3

Tabelle A.4: Testszenario I: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zwei Umschlagmittel mit Geschwindigkeiten von 20 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1, 2$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 10 LE. Die Entladefläche kann maximal 80 LE fassen.

Testscenario II:

Layout der Umschlaghalle:

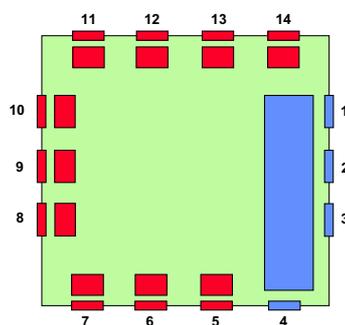


Abbildung A.2: Testscenario II: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen:

(Siehe Szenario I)

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 16:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 20 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	14:00	16:00	5
NT2	14:20	15:20	10
NT3	14:00	15:20	2
NT4	14:40	16:00	7
NT5	14:00	15:20	8
NT6	14:20	15:20	4
NT7	14:40	16:00	2
NT8	14:40	16:00	12
NT9	15:40	16:00	7
NT10	14:00	16:00	6
NT11	14:20	15:20	3
NT12	14:00	16:00	4

Tabelle A.5: Testscenario II: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	14:00	16:00	12
FT2	14:00	16:00	14
FT3	14:00	16:00	9
FT4	14:00	16:00	17
FT5	14:00	16:00	10
FT6	14:00	16:00	8

Tabelle A.6: Testscenario II: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6
NT1	2	3	0	0	0	0
NT2	0	3	4	2	1	0
NT3	0	0	0	0	1	1
NT4	0	0	3	4	0	0
NT5	2	2	2	2	0	0
NT6	0	0	0	0	1	3
NT7	2	0	0	0	0	0
NT8	0	0	0	5	4	3
NT9	0	3	0	4	0	0
NT10	3	3	0	0	0	0
NT11	0	0	0	0	2	1
NT12	3	0	0	0	1	0

Tabelle A.7: Testszenario II: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zwei Umschlagmittel mit Geschwindigkeiten von 20 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1, 2$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 10 LE. Die Entladefläche kann maximal 40 LE fassen.

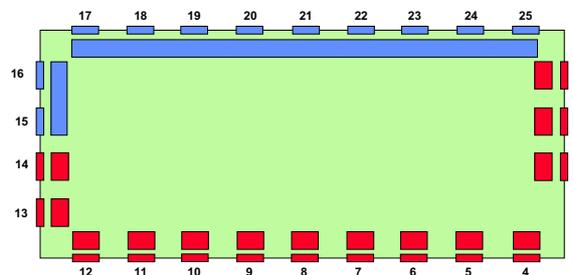
Testszenario III:Layout der Umschlaghalle:

Abbildung A.3: Testszenario III: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen:

Die Entfernungen zwischen den Toren und den Bereitstell- bzw. Entladeflächen beträgt 4 Meter.

	BF1	BF2	BF3	BF4	BF5	BF6	BF7	BF8	BF9	BF10	BF11	BF12	BF13	BF14	BF15	BF16	BF17	BF18	BF19	BF20	BF21	BF22	BF23	BF24	BF25
EF1	0,00	5,20	10,40	18,20	22,10	27,30	31,20	36,40	41,60	45,50	50,70	55,90	52,00	50,70	49,40	48,10	46,80	41,60	36,40	31,20	26,00	20,80	15,60	11,70	6,50
EF2	5,20	0,00	5,20	15,60	20,80	24,70	29,90	35,10	40,30	45,50	50,70	55,90	52,00	50,70	50,70	52,00	48,10	42,90	37,70	32,50	27,30	22,10	18,20	14,30	10,40
EF3	10,40	5,20	0,00	13,00	18,20	23,40	28,60	33,80	39,00	44,20	49,40	54,60	50,70	49,40	48,10	46,80	49,40	44,20	39,00	33,80	29,90	24,70	20,80	18,20	15,60
EF4	18,20	15,60	13,00	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	31,20	36,40	41,60	45,50	46,80	48,10	49,40	45,50	41,60	36,40	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50
EF5	22,10	20,80	18,20	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	31,20	36,40	40,30	41,60	42,90	44,20	41,60	36,40	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80
EF6	27,30	24,70	23,40	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	31,20	35,10	36,40	37,70	39,00	36,40	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10
EF7	31,20	29,90	28,60	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	29,90	31,20	32,50	33,80	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70
EF8	36,40	35,10	33,80	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	24,70	26,00	27,30	29,90	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60
EF9	41,60	40,30	39,00	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	19,50	22,10	23,40	26,00	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50
EF10	46,80	45,50	44,20	31,20	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	14,30	16,90	19,50	22,10	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	36,40
EF11	52,00	50,70	49,40	36,40	31,20	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	13,00	15,60	18,20	19,50	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	36,40
EF12	57,20	55,90	54,60	41,60	36,40	31,20	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	13,00	16,90	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	36,40	41,60	45,50
EF13	53,30	52,00	50,70	45,50	40,30	35,10	29,90	24,70	19,50	14,30	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	14,30	16,90	20,80	24,70	28,60	32,50	37,70	42,90	48,10
EF14	52,00	50,70	49,40	46,80	41,60	36,40	31,20	26,00	22,10	16,90	13,00	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	11,70	14,30	18,20	22,10	27,30	31,20	36,40	41,60	46,80
EF15	50,70	49,40	48,10	48,10	42,90	37,70	32,50	27,30	23,40	19,50	15,60	13,00	10,40	5,20	0,00	5,20	7,80	11,70	15,60	20,80	26,00	31,20	35,10	40,30	45,50
EF16	49,40	48,10	46,80	49,40	44,20	39,00	33,80	29,90	26,00	22,10	19,50	16,90	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	14,30	19,50	24,70	29,90	35,10	40,30	45,50
EF17	46,80	48,10	49,40	45,50	41,60	36,40	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	14,30	11,70	7,80	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	31,20	36,40	41,60
EF18	41,60	42,90	44,20	41,60	36,40	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	16,90	14,30	11,70	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	31,20	36,40
EF19	36,40	37,70	39,00	36,40	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	20,80	18,20	15,60	14,30	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00	31,20
EF20	31,20	32,50	33,80	32,50	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	24,70	22,10	20,80	19,50	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00
EF21	26,00	27,30	29,90	28,60	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	27,30	26,00	24,70	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80	26,00
EF22	20,80	22,10	24,70	24,70	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	32,50	31,20	29,90	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60	20,80
EF23	15,60	18,20	20,80	22,10	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	36,40	37,70	36,40	35,10	31,20	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40	15,60
EF24	11,70	14,30	18,20	20,80	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	36,40	41,60	42,90	41,60	40,30	36,40	31,20	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20	10,40
EF25	6,50	10,40	15,60	19,50	20,80	22,10	24,70	28,60	32,50	36,40	41,60	45,50	48,10	46,80	45,50	41,60	36,40	31,20	26,00	20,80	15,60	10,40	5,20	0,00	5,20

Tabelle A.8: TestszENARIO III: Entfernungen in [m]

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 17:20 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 20 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	14:00	17:20	15
NT2	14:00	17:20	17
NT3	14:00	17:20	21
NT4	14:00	17:20	15
NT5	14:00	17:20	18
NT6	14:00	17:20	14
NT7	14:00	17:20	18
NT8	14:00	17:20	21
NT9	14:00	17:20	14
NT10	14:00	17:20	14
NT11	14:00	17:20	15
NT12	14:00	17:20	16
NT13	14:00	17:20	18
NT14	14:00	17:20	16
NT15	14:00	17:20	20
NT16	14:00	17:20	21
NT17	14:00	17:20	20
NT18	14:00	17:20	19
NT19	14:00	17:20	18
NT20	14:00	17:20	14

Tabelle A.9: TestszENARIO III: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	14:00	17:20	30
FT2	14:00	17:20	37
FT3	14:00	17:20	32
FT4	14:00	17:20	27
FT5	14:00	17:20	41
FT6	14:00	17:20	38
FT7	14:00	17:20	40
FT8	14:00	17:20	38
FT9	14:00	17:20	35
FT10	14:00	17:20	26

Tabelle A.10: TestszENARIO III: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7	FT8	FT9	FT10
NT1	3	4	1	1	1	1	1	1	1	1
NT2	1	1	1	1	1	4	5	1	1	1
NT3	6	1	3	3	3	1	1	1	1	1
NT4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1
NT5	1	3	3	1	1	2	4	1	1	1
NT6	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1
NT7	1	1	1	1	2	1	4	1	3	3
NT8	1	1	1	1	9	1	1	4	1	1
NT9	1	4	2	1	1	1	1	1	1	1
NT10	1	1	1	2	4	1	1	1	1	1
NT11	1	5	2	1	1	1	1	1	1	1
NT12	1	1	1	1	3	1	1	1	3	3
NT13	2	2	1	1	1	3	3	3	1	1
NT14	1	2	1	2	2	4	1	1	1	1
NT15	1	1	1	1	1	3	1	5	5	1
NT16	1	1	1	1	1	4	3	1	5	3
NT17	3	3	3	1	3	1	3	1	1	1
NT18	1	1	3	3	3	2	2	2	1	1
NT19	1	1	1	1	1	3	3	5	1	1
NT20	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1

Tabelle A.11: TestszENARIO III: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren fünf Umschlagmittel mit Geschwindigkeiten von 20 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 60 LE. Die Entladefläche kann maximal 660 LE fassen.

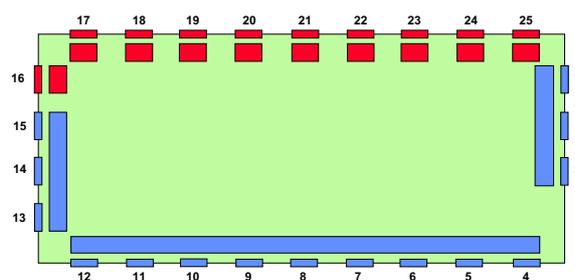
TestszENARIO IV:Layout der Umschlaghalle:

Abbildung A.4: TestszENARIO IV: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen:

(Siehe Szenario III)

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 17:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 30 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Andockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Andockzeitpunkt	Lademenge
NT1	15:00	16:00	10	NT21	14:30	17:00	10
NT2	14:00	17:00	9	NT22	14:30	17:00	9
NT3	16:30	17:00	15	NT23	16:00	17:00	15
NT4	15:00	17:00	10	NT24	14:00	15:00	10
NT5	15:30	16:00	12	NT25	14:30	17:00	12
NT6	15:30	17:00	9	NT26	14:30	17:00	9
NT7	16:00	17:00	13	NT27	14:00	17:00	13
NT8	14:00	15:00	13	NT28	14:00	17:00	13
NT9	14:00	16:00	6	NT29	14:00	17:00	6
NT10	14:00	16:30	6	NT30	15:30	17:00	6
NT11	14:00	17:00	7	NT31	14:00	15:00	7
NT12	14:00	15:00	9	NT32	14:00	17:00	9
NT13	15:00	17:00	14	NT33	15:00	17:00	14
NT14	14:00	16:30	10	NT34	14:00	16:30	10
NT15	14:00	17:00	16	NT35	16:00	17:00	16
NT16	15:30	16:00	15	NT36	14:00	17:00	15
NT17	14:00	17:00	15	NT37	14:00	15:00	15
NT18	15:00	17:00	15	NT38	15:00	17:00	15
NT19	14:00	17:00	11	NT39	14:00	17:00	11
NT20	14:30	16:00	6	NT40	14:00	17:00	6

Tabelle A.12: TestszENARIO IV: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Andockzeitpunkt	Lademenge
FT1	14:00	17:00	28
FT2	14:00	17:00	50
FT3	14:00	17:00	44
FT4	14:00	17:00	28
FT5	14:00	17:00	60
FT6	14:00	17:00	54
FT7	14:00	17:00	58
FT8	14:00	17:00	54
FT9	14:00	17:00	46
FT10	14:00	17:00	20

Tabelle A.13: TestszENARIO IV: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7	FT8	FT9	FT10	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5	NT6	NT7	NT8	NT9	NT10	NT11	NT12	NT13	NT14	NT15	NT16	NT17	NT18	NT19	NT20				
NT1	3	4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	NT21	0	3	4	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT2	0	0	0	0	0	4	5	0	0	0	0	NT22	0	0	2	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT3	6	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	NT23	4	0	5	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT4	0	2	2	2	0	0	0	2	2	0	NT24	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT5	0	3	3	0	0	2	4	0	0	0	0	NT25	0	0	0	6	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT6	0	0	2	0	0	2	2	2	1	0	0	NT26	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT7	0	0	0	1	2	0	4	0	3	3	NT27	0	1	8	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT8	0	0	0	0	9	0	0	4	0	0	0	NT28	0	0	0	4	4	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
NT9	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	NT29	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0					
NT10	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	NT30	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
NT11	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	NT31	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
NT12	0	0	0	0	3	0	0	0	3	3	NT32	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
NT13	2	2	1	0	0	3	3	3	0	0	0	NT33	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0				
NT14	0	2	0	2	2	4	0	0	0	0	0	NT34	0	0	0	2	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
NT15	0	0	1	1	1	3	0	5	5	0	0	NT35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0			
NT16	0	0	0	0	0	4	3	0	5	3	NT36	0	0	0	0	0	0	0	6	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
NT17	3	3	3	0	3	0	3	0	0	0	0	NT37	0	10	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
NT18	0	0	3	3	3	2	2	2	0	0	0	NT38	0	0	0	0	6	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
NT19	0	0	0	0	0	3	3	5	0	0	0	NT39	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
NT20	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	NT40	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle A.14: TestszENARIO IV: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren fünf Umschlagmittel mit Geschwindigkeiten von 20 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1,35$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 60 LE. Die Entladefläche kann maximal 660 LE fassen.

Testscenario V:

Layout der Umschlaghalle:

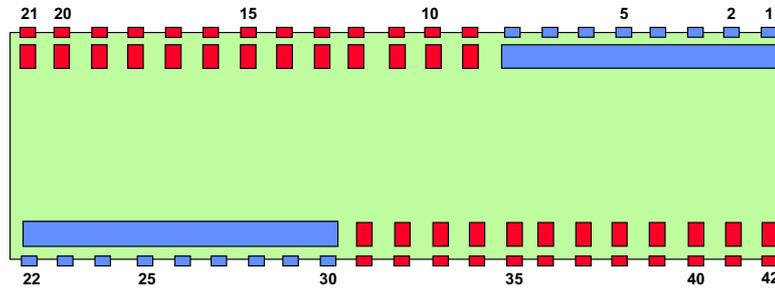


Abbildung A.5: Testscenario V: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen:

Die Entfernungen zwischen den Toren und den Bereitstell- bzw. Entladeflächen beträgt 4 Meter.

BF1	BF2	BF3	BF4	BF5	BF6	BF7	BF8	BF9	BF10	BF11	BF12	BF13	BF14	BF15	BF16	BF17	BF18	BF19	BF20	BF21	BF22	BF23	BF24	BF25	BF26	BF27	BF28	BF29	BF30	BF31	BF32	BF33	BF34	BF35	BF36	BF37	BF38	BF39	BF40	BF41	BF42																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
BF1	0.00	13.00	26.00	39.00	52.00	65.00	78.00	91.00	104.00	117.00	130.00	143.00	156.00	169.00	182.00	195.00	208.00	221.00	234.00	247.00	260.00	273.00	286.00	299.00	312.00	325.00	338.00	351.00	364.00	377.00	390.00	403.00	416.00	429.00	442.00	455.00	468.00	481.00	494.00	507.00	520.00	533.00	546.00	559.00	572.00	585.00	598.00	611.00	624.00	637.00	650.00	663.00	676.00	689.00	702.00	715.00	728.00	741.00	754.00	767.00	780.00	793.00	806.00	819.00	832.00	845.00	858.00	871.00	884.00	897.00	910.00	923.00	936.00	949.00	962.00	975.00	988.00	1001.00	1014.00	1027.00	1040.00	1053.00	1066.00	1079.00	1092.00	1105.00	1118.00	1131.00	1144.00	1157.00	1170.00	1183.00	1196.00	1209.00	1222.00	1235.00	1248.00	1261.00	1274.00	1287.00	1300.00	1313.00	1326.00	1339.00	1352.00	1365.00	1378.00	1391.00	1404.00	1417.00	1430.00	1443.00	1456.00	1469.00	1482.00	1495.00	1508.00	1521.00	1534.00	1547.00	1560.00	1573.00	1586.00	1599.00	1612.00	1625.00	1638.00	1651.00	1664.00	1677.00	1690.00	1703.00	1716.00	1729.00	1742.00	1755.00	1768.00	1781.00	1794.00	1807.00	1820.00	1833.00	1846.00	1859.00	1872.00	1885.00	1898.00	1911.00	1924.00	1937.00	1950.00	1963.00	1976.00	1989.00	2002.00	2015.00	2028.00	2041.00	2054.00	2067.00	2080.00	2093.00	2106.00	2119.00	2132.00	2145.00	2158.00	2171.00	2184.00	2197.00	2210.00	2223.00	2236.00	2249.00	2262.00	2275.00	2288.00	2301.00	2314.00	2327.00	2340.00	2353.00	2366.00	2379.00	2392.00	2405.00	2418.00	2431.00	2444.00	2457.00	2470.00	2483.00	2496.00	2509.00	2522.00	2535.00	2548.00	2561.00	2574.00	2587.00	2600.00	2613.00	2626.00	2639.00	2652.00	2665.00	2678.00	2691.00	2704.00	2717.00	2730.00	2743.00	2756.00	2769.00	2782.00	2795.00	2808.00	2821.00	2834.00	2847.00	2860.00	2873.00	2886.00	2899.00	2912.00	2925.00	2938.00	2951.00	2964.00	2977.00	2990.00	3003.00	3016.00	3029.00	3042.00	3055.00	3068.00	3081.00	3094.00	3107.00	3120.00	3133.00	3146.00	3159.00	3172.00	3185.00	3198.00	3211.00	3224.00	3237.00	3250.00	3263.00	3276.00	3289.00	3302.00	3315.00	3328.00	3341.00	3354.00	3367.00	3380.00	3393.00	3406.00	3419.00	3432.00	3445.00	3458.00	3471.00	3484.00	3497.00	3510.00	3523.00	3536.00	3549.00	3562.00	3575.00	3588.00	3601.00	3614.00	3627.00	3640.00	3653.00	3666.00	3679.00	3692.00	3705.00	3718.00	3731.00	3744.00	3757.00	3770.00	3783.00	3796.00	3809.00	3822.00	3835.00	3848.00	3861.00	3874.00	3887.00	3900.00	3913.00	3926.00	3939.00	3952.00	3965.00	3978.00	3991.00	4004.00	4017.00	4030.00	4043.00	4056.00	4069.00	4082.00	4095.00	4108.00	4121.00	4134.00	4147.00	4160.00	4173.00	4186.00	4199.00	4212.00	4225.00	4238.00	4251.00	4264.00	4277.00	4290.00	4303.00	4316.00	4329.00	4342.00	4355.00	4368.00	4381.00	4394.00	4407.00	4420.00	4433.00	4446.00	4459.00	4472.00	4485.00	4498.00	4511.00	4524.00	4537.00	4550.00	4563.00	4576.00	4589.00	4602.00	4615.00	4628.00	4641.00	4654.00	4667.00	4680.00	4693.00	4706.00	4719.00	4732.00	4745.00	4758.00	4771.00	4784.00	4797.00	4810.00	4823.00	4836.00	4849.00	4862.00	4875.00	4888.00	4901.00	4914.00	4927.00	4940.00	4953.00	4966.00	4979.00	4992.00	5005.00	5018.00	5031.00	5044.00	5057.00	5070.00	5083.00	5096.00	5109.00	5122.00	5135.00	5148.00	5161.00	5174.00	5187.00	5200.00	5213.00	5226.00	5239.00	5252.00	5265.00	5278.00	5291.00	5304.00	5317.00	5330.00	5343.00	5356.00	5369.00	5382.00	5395.00	5408.00	5421.00	5434.00	5447.00	5460.00	5473.00	5486.00	5499.00	5512.00	5525.00	5538.00	5551.00	5564.00	5577.00	5590.00	5603.00	5616.00	5629.00	5642.00	5655.00	5668.00	5681.00	5694.00	5707.00	5720.00	5733.00	5746.00	5759.00	5772.00	5785.00	5798.00	5811.00	5824.00	5837.00	5850.00	5863.00	5876.00	5889.00	5902.00	5915.00	5928.00	5941.00	5954.00	5967.00	5980.00	5993.00	6006.00	6019.00	6032.00	6045.00	6058.00	6071.00	6084.00	6097.00	6110.00	6123.00	6136.00	6149.00	6162.00	6175.00	6188.00	6201.00	6214.00	6227.00	6240.00	6253.00	6266.00	6279.00	6292.00	6305.00	6318.00	6331.00	6344.00	6357.00	6370.00	6383.00	6396.00	6409.00	6422.00	6435.00	6448.00	6461.00	6474.00	6487.00	6500.00	6513.00	6526.00	6539.00	6552.00	6565.00	6578.00	6591.00	6604.00	6617.00	6630.00	6643.00	6656.00	6669.00	6682.00	6695.00	6708.00	6721.00	6734.00	6747.00	6760.00	6773.00	6786.00	6799.00	6812.00	6825.00	6838.00	6851.00	6864.00	6877.00	6890.00	6903.00	6916.00	6929.00	6942.00	6955.00	6968.00	6981.00	6994.00	7007.00	7020.00	7033.00	7046.00	7059.00	7072.00	7085.00	7098.00	7111.00	7124.00	7137.00	7150.00	7163.00	7176.00	7189.00	7202.00	7215.00	7228.00	7241.00	7254.00	7267.00	7280.00	7293.00	7306.00	7319.00	7332.00	7345.00	7358.00	7371.00	7384.00	7397.00	7410.00	7423.00	7436.00	7449.00	7462.00	7475.00	7488.00	7501.00	7514.00	7527.00	7540.00	7553.00	7566.00	7579.00	7592.00	7605.00	7618.00	7631.00	7644.00	7657.00	7670.00	7683.00	7696.00	7709.00	7722.00	7735.00	7748.00	7761.00	7774.00	7787.00	7800.00	7813.00	7826.00	7839.00	7852.00	7865.00	7878.00	7891.00	7904.00	7917.00	7930.00	7943.00	7956.00	7969.00	7982.00	7995.00	8008.00	8021.00	8034.00	8047.00	8060.00	8073.00	8086.00	8099.00	8112.00	8125.00	8138.00	8151.00	8164.00	8177.00	8190.00	8203.00	8216.00	8229.00	8242.00	8255.00	8268.00	8281.00	8294.00	8307.00	8320.00	8333.00	8346.00	8359.00	8372.00	8385.00	8398.00	8411.00	8424.00	8437.00	8450.00	8463.00	8476.00	8489.00	8502.00	8515.00	8528.00	8541.00	8554.00	8567.00	8580.00	8593.00	8606.00	8619.00	8632.00	8645.00	8658.00	8671.00	8684.00	8697.00	8710.00	8723.00	8736.00	8749.00	8762.00	8775.00	8788.00	8801.00	8814.00	8827.00	8840.00	8853.00	8866.00	8879.00	8892.00	8905.00	8918.00	8931.00	8944.00	8957.00	8970.00	8983.00	8996.00	9009.00	9022.00	9035.00	9048.00	9061.00	9074.00	9087.00	9100.00	9113.00	9126.00	9139.00	9152.00	9165.00	9178.00	9191.00	9204.00	9217.00	9230.00	9243.00	9256.00	9269.00	9282.00	9295.00	9308.00	9321.00	9334.00	9347.00	9360.00	9373.00	9386.00	9399.00	9412.00	9425.00	9438.00	9451.00	9464.00	9477.00	9490.00	9503.00	9516.00	9529.00	9542.00	9555.00	9568.00	9581.00	9594.00	9607.00	9620.00	9633.00	9646.00	9659.00	9672.00	9685.00	9698.00	9711.00	9724.00	9737.00	9750.00	9763.00	9776.00	9789.00	9802.00	9815.00	9828.00	9841.00	9854.00	9867.00	9880.00	9893.00	9906.00	9919.00	9932.00	9945.00	9958.00	9971.00	9984.00	9997.00	10010.00	10023.00	10036.00	10049.00	10062.00	10075.00	10088.00	10101.00	10114.00	10127.00	10140.00	10153.00	10166.00	10179.00	10192.00	10205.00	10218.00	10231.00	10244.00	10257.00	10270.00	10283.00	10296.00	10309.00	10322.00	10335.00	10348.00	10361.00	10374.00	10387.00	10400.00	10413.00	10426.00	10439.00	10452.00	10465.00	10478.00	10491.00	10504.00	10517.00	10530.00	10543.00	10556.00	10569.00	10582.00	10595.00	10608.00	10621.00	10634.00	10647.00	10660.00	10673.00	10686.00	10699.00	10712.00	10725.00	10738.00	10751.00	10764.00	10777.00	10790.00	10803.00	10816.00	10829.00	10842.00	10855.00	10868.00	10881.00	10894.00	10907.00	10920.00	10933.00	10946.00	10959.00	10972.00	10985.00	10998.00	101011.00	101024.00	101037.00	101050.00	101063.00	101076.00	101089.00	101102.00	101115.00	101128.00	101141.00	101154.00	101167.00	101180.00	101193.00	101206.00	101219.00	101232.00	101245.00	101258.00	101271.00	101284.00	101297.00	101310.00	101323.00	101336.00	101349.00	101362.00	101375.00	101388.00	101401.00	101414.00	101427.00

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 15:00 Uhr bis 19:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 40 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Andockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Andockzeitpunkt	Lademenge
NT1	15:00	19:00	6	NT14	15:00	18:20	20
NT2	15:00	17:40	7	NT15	15:00	18:00	21
NT3	16:20	19:00	10	NT16	15:00	18:00	12
NT4	15:00	18:20	8	NT17	15:00	18:00	17
NT5	15:00	19:00	12	NT18	15:00	18:00	27
NT6	15:00	19:00	10	NT19	15:00	17:40	20
NT7	15:00	18:20	15	NT20	15:00	18:00	10
NT8	15:00	19:00	28	NT21	15:00	17:40	32
NT9	15:00	19:00	16	NT22	15:00	18:00	24
NT10	15:00	19:00	18	NT23	15:00	18:00	17
NT11	15:00	19:00	29	NT24	15:00	18:00	21
NT12	15:00	18:20	18	NT25	15:00	18:00	20
NT13	15:00	19:00	27	NT26	16:20	17:40	42
NT14	15:00	17:40	9	NT27	15:00	18:00	20
NT15	15:00	19:00	19	NT28	15:00	17:00	21
NT16	15:00	19:00	11	NT29	15:00	18:00	37
NT17	15:00	19:00	41	NT30	16:20	17:40	12
NT18	15:00	18:20	12	NT31	15:00	18:00	12
NT19	15:00	19:00	9	NT32	15:00	17:40	15
NT20	15:00	19:00	22	NT33	15:00	18:00	11

Tabelle A.16: TestszENARIO V: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Andockzeitpunkt	Lademenge
FT1	15:00	19:00	22
FT2	15:00	19:00	49
FT3	15:00	19:00	33
FT4	15:00	19:00	28
FT5	15:00	19:00	36
FT6	15:00	19:00	18
FT7	15:00	19:00	74
FT8	15:00	19:00	59
FT9	15:00	19:00	25
FT10	15:00	19:00	30
FT11	15:00	19:00	19
FT12	15:00	19:00	27
FT13	15:00	19:00	19
FT14	15:00	19:00	33
FT15	15:00	19:00	41
FT16	15:00	19:00	60
FT17	15:00	19:00	41
FT18	15:00	19:00	58
FT19	15:00	19:00	41
FT20	15:00	19:00	50

Tabelle A.17: TestszENARIO V: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7	FT8	FT9	FT10	FT11	FT12	FT13	FT14	FT15	FT16	FT17	FT18	FT19	FT20
NT1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
NT3	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
NT4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	2	0	0	0	0
NT5	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
NT6	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
NT7	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	7	0	0	0	0
NT8	0	0	0	6	0	0	9	0	0	0	9	0	0	0	0	5	0	0	0	0
NT9	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0
NT10	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	4	0	0	0
NT11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	11	9	0	0	0
NT12	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
NT13	7	0	0	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0	0	0	8	0	0	0	0
NT14	1	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
NT15	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	8	0	0	0	0
NT16	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	2	0	0	0	0
NT17	0	3	0	0	16	0	7	8	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
NT18	0	4	0	0	3	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT19	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT20	0	7	0	0	0	0	3	9	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
NT21	0	5	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
NT22	0	6	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0
NT23	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
NT24	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
NT25	0	0	4	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	8	0	0	0	8	12	0
NT26	0	0	5	0	0	0	8	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0
NT27	0	0	2	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NT28	0	0	7	0	0	0	2	11	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
NT29	0	0	6	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9
NT30	0	0	0	0	0	0	3	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
NT31	0	0	0	0	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	5
NT32	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	8
NT33	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	6	8	4
NT34	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	3	9	7
NT35	0	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	6	0	3
NT36	0	7	1	0	0	0	0	0	0	5	0	5	7	0	4	0	0	8	0	0
NT37	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0
NT38	0	0	0	0	0	4	0	0	0	5	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
NT39	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
NT40	0	0	0	0	0	4	0	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabelle A.18: TestszENARIO V: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zehn Umschlagmittel mit Geschwindigkeiten von 30 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1,35$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 60 LE. Jede der Entladeflächen kann maximal 1020 LE fassen.

Testscenario VI:

Layout der Umschlaghalle:

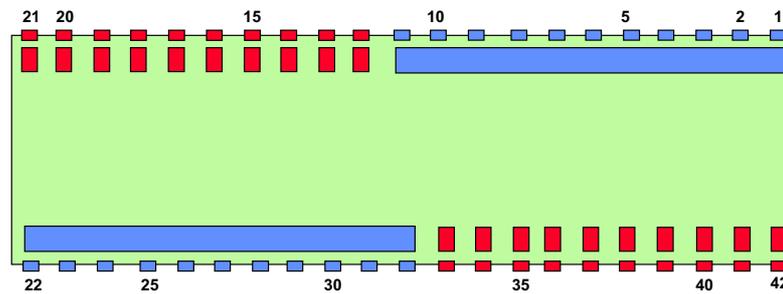


Abbildung A.6: Testscenario VI: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen:

(Siehe Szenario V)

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 15:00 Uhr bis 19:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 30 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Frühester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Frühester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	15:00	19:00	5	NT26	15:00	19:00	30
NT2	15:00	19:00	7	NT27	15:00	18:00	10
NT3	16:00	19:00	10	NT28	17:30	19:00	27
NT4	15:00	18:30	4	NT29	15:00	17:30	19
NT5	15:00	19:00	12	NT30	15:00	19:00	17
NT6	17:00	19:00	10	NT31	15:00	19:00	14
NT7	17:00	19:00	10	NT32	15:00	18:30	20
NT8	15:00	16:00	11	NT33	15:00	19:00	29
NT9	15:00	19:00	16	NT34	17:30	19:00	21
NT10	15:00	19:00	16	NT35	15:00	19:00	21
NT11	15:00	16:30	20	NT36	15:00	19:00	20
NT12	16:00	19:00	18	NT37	15:00	18:30	12
NT13	15:00	19:00	22	NT38	15:00	19:00	7
NT14	15:00	19:00	9	NT39	15:00	19:00	15
NT15	15:00	16:30	19	NT40	15:00	19:00	11
NT16	16:30	19:00	11	NT41	15:00	19:00	11
NT17	15:00	19:00	27	NT42	15:00	19:00	6
NT18	15:00	19:00	7	NT43	15:00	16:00	20
NT19	15:00	17:00	9	NT44	15:00	19:00	13
NT20	15:00	19:00	22	NT45	15:00	19:00	17
NT21	15:00	19:00	20	NT46	15:00	17:00	13
NT22	17:30	19:00	11	NT47	15:00	19:00	19
NT23	15:00	19:00	12	NT48	16:30	17:30	11
NT24	15:00	19:00	17	NT49	15:30	19:00	20
NT25	15:00	19:00	20	NT50	15:00	19:00	17

Tabelle A.19: Testscenario VI: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	15:00	19:00	22
FT2	15:00	19:00	50
FT3	15:00	19:00	33
FT4	15:00	19:00	28
FT5	15:00	19:00	60
FT6	15:00	19:00	41
FT7	15:00	19:00	58
FT8	15:00	19:00	54
FT9	15:00	19:00	25
FT10	15:00	19:00	20
FT11	15:00	19:00	10
FT12	15:00	19:00	15
FT13	15:00	19:00	12
FT14	15:00	19:00	33
FT15	15:00	19:00	41
FT16	15:00	19:00	60
FT17	15:00	19:00	41
FT18	15:00	19:00	58
FT19	15:00	19:00	54
FT20	15:00	19:00	50

Tabelle A.20: Testscenario VI: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7	FT8	FT9	FT10	FT11	FT12	FT13	FT14	FT15	FT16	FT17	FT18	FT19	FT20
NT1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
NT3	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
NT4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
NT5	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
NT6	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
NT7	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
NT8	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
NT9	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0
NT10	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	4	0	0	0
NT11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	9	0	0	0
NT12	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
NT13	7	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
NT14	1	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
NT15	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	8	0	0	0	0
NT16	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	2	0	0	0	0
NT17	0	3	0	0	16	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT18	0	4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT19	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT20	0	7	0	0	0	0	3	9	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
NT21	0	5	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
NT22	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
NT23	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	4	0	0
NT24	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	2	0	0
NT25	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	8	0	0
NT26	0	0	5	0	0	0	8	0	5	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0
NT27	0	0	2	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NT28	0	0	7	0	0	0	2	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
NT29	0	0	6	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
NT30	0	0	0	0	0	0	3	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
NT31	0	0	0	0	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
NT32	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	8
NT33	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	6	4
NT34	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	3	0	7
NT35	0	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	6	0	0	3
NT36	0	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	8	0	0	0
NT37	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0
NT38	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
NT39	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
NT40	0	0	0	0	0	4	0	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
NT41	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT42	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
NT43	0	0	0	0	0	8	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0
NT44	0	0	0	0	5	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
NT45	0	0	0	0	5	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
NT46	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
NT47	0	0	0	0	6	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	7	0
NT48	0	0	0	0	1	0	0	0	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0
NT49	0	0	0	0	0	5	0	0	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	9	0
NT50	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	7	0

Tabelle A.21: Testscenario VI: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zehn Umschlagmittel mit Geschwindigkeiten von 30 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1,35$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 30 LE. Jede der Entladeflächen kann maximal 660 LE fassen.

Testszenerio VII:

Layout der Umschlaghalle:

Das Layout entspricht der Abbildung 6.2 aus Kapitel 6. Die Eingangstore befinden sich an den Toren 1 - 10 und 38 - 52.

Entfernungen:

Die Entfernungen zwischen den Toren und den Bereitstell- bzw. Entladeflächen beträgt 4 Meter.

Table with 32 columns (BF1 to BF32) and 32 rows (BF1 to BF32). Each cell contains a numerical value representing the distance between two specific loading/unloading points.

Table with 32 columns (BF33 to BF64) and 32 rows (BF33 to BF64). Each cell contains a numerical value representing the distance between two specific loading/unloading points.

Tabelle A.22: Testszenerio VII: Entfernungen in [m]

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 17:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 30 Minuten.

Tour	Früheste Andock	Späteste Andock	Lademenge	Tour	Früheste Andock	Späteste Andock	Lademenge
NT1	14:00	17:00	11	NT21	14:00	17:00	14
NT2	14:00	17:00	13	NT22	14:00	17:00	16
NT3	14:00	17:00	18	NT23	14:00	17:00	17
NT4	14:00	17:00	10	NT24	14:00	17:00	18
NT5	14:00	17:00	12	NT25	14:00	17:00	17
NT6	14:00	17:00	15	NT26	14:00	17:00	20
NT7	14:00	17:00	15	NT27	14:00	17:00	13
NT8	14:00	17:00	16	NT28	14:00	17:00	16
NT9	14:00	17:00	14	NT29	14:00	17:00	24
NT10	14:00	17:00	30	NT30	14:00	17:00	26
NT11	14:00	17:00	17	NT31	14:00	17:00	20
NT12	14:00	17:00	10	NT32	14:00	17:00	7
NT13	14:00	17:00	16	NT33	14:00	17:00	8
NT14	14:00	17:00	17	NT34	14:00	17:00	5
NT15	14:00	17:00	13	NT35	14:00	17:00	9
NT16	14:00	17:00	16	NT36	14:00	17:00	25
NT17	14:00	17:00	16	NT37	14:00	17:00	18
NT18	14:00	17:00	15	NT38	14:00	17:00	26
NT19	14:00	17:00	20	NT39	14:00	17:00	11
NT20	14:00	17:00	12	NT40	14:00	17:00	12

Tabelle A.23: TestszENARIO VII: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Früheste Andock	Späteste Andock	Lademenge
FT1	14:00	17:00	9
FT2	14:00	17:00	19
FT3	14:00	17:00	11
FT4	14:00	17:00	28
FT5	14:00	17:00	17
FT6	14:00	17:00	29
FT7	14:00	17:00	33
FT8	14:00	17:00	17
FT9	14:00	17:00	20
FT10	14:00	17:00	22
FT11	14:00	17:00	25
FT12	14:00	17:00	29
FT13	14:00	17:00	30
FT14	14:00	17:00	27
FT15	14:00	17:00	48
FT16	14:00	17:00	37
FT17	14:00	17:00	43
FT18	14:00	17:00	36
FT19	14:00	17:00	32
FT20	14:00	17:00	53
FT21	14:00	17:00	14
FT22	14:00	17:00	16
FT23	14:00	17:00	7
FT24	14:00	17:00	9
FT25	14:00	17:00	17

Tabelle A.24: TestszENARIO VII: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7	FT8	FT9	FT10	FT11	FT12	FT13	FT14	FT15	FT16	FT17	FT18	FT19	FT20	FT21	FT22	FT23	FT24	FT25
NT1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0
NT2	0	0	1	0	0	2	0	0	2	0	0	1	0	2	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0
NT3	0	3	0	0	4	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
NT4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0
NT5	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT6	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	6	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0
NT7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	8	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT8	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	3	0	0
NT9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0
NT10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	1	0	19	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0
NT11	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
NT12	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT13	0	0	2	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT14	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	7	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0
NT15	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0
NT16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	2	0	0	7	0	0	0	0	0
NT17	0	0	0	3	0	0	7	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
NT18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	2	3	0	0	6	0	0	0	0	0
NT19	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	7	3	0	0	4	0	0	0	0
NT20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT21	0	0	0	0	0	2	0	1	2	0	2	0	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
NT22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	4	0	4	0	3	0	0	0	0
NT23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	0	1	0	0	7	0	4	0	0	0	0	0	0
NT24	0	0	1	0	0	1	0	1	0	2	0	0	1	4	1	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
NT25	0	0	0	0	0	2	0	0	0	4	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
NT26	0	2	0	0	2	0	2	0	2	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0
NT27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT28	0	0	0	0	6	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	1	0	0	0	0
NT29	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	0	1	6	1	0	1	0	0	0	0	0	3	4	4
NT30	6	2	0	4	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	5	0	0	0	4	4
NT31	0	2	0	4	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	4	4
NT32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4	4
NT33	0	1	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
NT34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NT35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0
NT36	0	0	0	5	0	5	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT37	0	0	0	0	6	3	0	0	4	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
NT38	0	2	0	6	0	5	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	1	0	0	0	
NT39	1	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
NT40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0

Tabelle A.25: Testszenario VII: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zwanzig Umschlagmittel (Verbringung: vierzig) mit Geschwindigkeiten von 20 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1, 1$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 30 LE. Jede der Entladeflächen kann maximal 750 LE fassen.

Testszenario VIII:

Layout der Umschlaghalle:

Das Layout entspricht der Abbildung 6.2 aus Kapitel 6. Die Eingangstore befinden sich an den Toren 44 - 53.

Entfernungen:

(Siehe Szenario VII)

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 16:40 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 20 Minuten.

Tour	Früheste Andock	Späteste Andock	Lademenge	Tour	Früheste Andock	Späteste Andock	Lademenge
NT1	15:00	15:40	9	NT21	14:20	16:40	10
NT2	14:00	16:40	13	NT22	14:00	16:40	13
NT3	15:00	16:40	18	NT23	14:20	16:40	17
NT4	14:00	16:40	10	NT24	14:00	16:40	11
NT5	15:00	16:40	12	NT25	14:20	16:40	12
NT6	14:00	16:40	10	NT26	14:00	16:40	15
NT7	14:20	15:00	15	NT27	14:00	15:40	13
NT8	14:00	16:40	12	NT28	14:00	16:40	15
NT9	14:00	16:40	14	NT29	14:20	16:40	17
NT10	14:00	16:40	28	NT30	14:00	16:40	17
NT11	14:00	16:40	15	NT31	14:00	16:40	10
NT12	14:00	15:20	10	NT32	14:00	16:40	8
NT13	14:00	16:40	16	NT33	14:00	16:40	15
NT14	15:00	16:40	15	NT34	14:00	16:40	12
NT15	14:00	16:40	10	NT35	14:00	16:40	12
NT16	14:20	16:00	16	NT36	14:00	16:40	10
NT17	14:00	16:40	14	NT37	14:00	16:40	11
NT18	14:00	16:40	9	NT38	14:00	16:40	13
NT19	14:00	14:40	16	NT39	14:00	16:40	14
NT20	14:00	16:40	12	NT40	14:00	16:40	12

Tabelle A.26: Testszenario VIII: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Früheste Andock	Späteste Andock	Lademenge
FT1	14:00	16:40	13
FT2	14:00	16:40	15
FT3	14:00	16:40	21
FT4	14:00	16:40	14
FT5	14:00	16:40	24
FT6	14:00	16:40	19
FT7	14:00	16:40	26
FT8	14:00	16:40	12
FT9	14:00	16:40	18
FT10	14:00	16:40	23
FT11	14:00	16:40	25
FT12	14:00	16:40	31
FT13	14:00	16:40	32
FT14	14:00	16:40	32
FT15	14:00	16:40	64
FT16	14:00	16:40	37
FT17	14:00	16:40	39
FT18	14:00	16:40	30
FT19	14:00	16:40	29
FT20	14:00	16:40	27

Tabelle A.27: Testszenario VIII: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5	FT6	FT7	FT8	FT9	FT10	FT11	FT12	FT13	FT14	FT15	FT16	FT17	FT18	FT19	FT20
NT1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
NT2	0	0	1	0	0	2	0	0	2	0	0	1	0	2	0	0	3	0	2	0
NT3	0	3	0	0	4	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	2	0	0	2	0
NT4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	0
NT5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2	0	6	0	0	0
NT6	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	6	0	0	0	0	0	0
NT7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	8	0	3	0	0	0
NT8	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
NT9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	9	0
NT10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	1	0	19	0	3	0	0	0
NT11	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0
NT12	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
NT13	0	0	2	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0
NT14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	7	1	0	1	3	0	0	0
NT15	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	3	0
NT16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	2	0	0	7
NT17	0	0	0	3	0	0	7	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
NT18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2	3	0	0	0
NT19	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	7	3	0
NT20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	8	0	0	0	0	0
NT21	0	0	0	0	0	0	2	0	1	2	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0
NT22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	4	0	4
NT23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	0	1	0	0	0	7	0	4
NT24	0	0	1	0	0	1	0	1	0	2	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0
NT25	0	0	0	0	0	2	0	0	0	4	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
NT26	0	2	0	0	2	0	2	0	2	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0
NT27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0	7	0	0	0	0
NT28	0	0	0	0	6	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2
NT29	0	0	0	4	0	0	0	0	4	0	0	0	1	6	1	0	1	0	0	0
NT30	6	2	0	4	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
NT31	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	2	0	2
NT33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	4	0	4
NT34	0	0	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
NT35	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT36	0	0	0	0	2	2	2	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
NT37	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
NT38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	3	0	1
NT39	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	5	0	0	6	0	0	0	0	0	0
NT40	2	0	2	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle A.28: Testszenario VIII: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zwanzig Umschlagmittel (Verbringung: vierzig) mit Geschwindigkeiten von 30 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1,35$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 20 LE. Jede der Entladeflächen kann maximal 200 LE fassen.

150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabelle A.29: Testscenario IX: Entfernungen in [m]

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 16:40 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 40 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	14:00	16:40	16	NT16	14:00	16:40	12
NT2	14:00	16:40	18	NT17	14:00	16:40	12
NT3	14:00	16:40	18	NT18	14:00	16:40	14
NT4	14:00	16:40	13	NT19	14:00	16:40	12
NT5	14:00	16:40	16	NT20	14:00	16:40	16
NT6	14:00	16:40	16	NT21	14:00	16:40	10
NT7	14:00	16:40	12	NT22	14:00	16:40	7
NT8	14:00	16:40	15	NT23	14:00	16:40	8
NT9	14:00	16:40	22	NT24	14:00	16:40	8
NT10	14:00	16:40	13	NT25	14:00	16:40	8
NT11	14:00	16:40	17	NT26	14:00	16:40	7
NT12	14:00	16:40	15	NT27	14:00	16:40	6
NT13	14:00	16:40	17	NT28	14:00	16:40	18
NT14	14:00	16:40	11	NT29	14:00	16:40	16
NT15	14:00	16:40	18	NT30	14:00	16:40	7

Tabelle A.30: Testscenario IX: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	14:00	16:40	16	FT16	14:00	16:40	17
FT2	14:00	16:40	16	FT17	14:00	16:40	35
FT3	14:00	16:40	18	FT18	14:00	16:40	16
FT4	14:00	16:40	13	FT19	14:00	16:40	15
FT5	14:00	16:40	16	FT20	14:00	16:40	19
FT6	14:00	16:40	16	FT21	14:00	16:40	12
FT7	14:00	16:40	12	FT22	14:00	16:40	12
FT8	14:00	16:40	15	FT23	14:00	16:40	9
FT9	14:00	16:40	22	FT24	14:00	16:40	9
FT10	14:00	16:40	13	FT25	14:00	16:40	16
FT11	14:00	16:40	17	FT26	14:00	16:40	17
FT12	14:00	16:40	15	FT27	14:00	16:40	17
FT13	14:00	16:40	17	FT28	14:00	16:40	19
FT14	14:00	16:40	11	FT29	14:00	16:40	19
FT15	14:00	16:40	18	FT30	14:00	16:40	8

Tabelle A.31: Testscenario IX: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30
NT1	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT2	0	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT3	0	0	0	0	3	0	4	5	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	2	2	0	1	1	0
NT5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	2	0	2	0
NT6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0
NT7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
NT8	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	2	2	2	2	2	0	0
NT10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
NT13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	7	6
NT14	0	0	0	0	0	5	0	0	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
NT15	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
NT16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	0	0
NT17	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
NT18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	2	0	2
NT19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6
NT20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
NT21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0
NT22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
NT23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
NT24	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
NT25	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
NT26	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
NT27	0	0	0	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT28	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0
NT29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NT30	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle A.32: TestszENARIO IX: Sendungsmix

Weitere Angaben:

Je Hauptprozess existieren zwanzig Umschlagmittel (Verbringung: vierzig) mit Geschwindigkeiten von 30 km/h.

Die Parameter nehmen die folgenden Werte an: $e = b = 1$ [min], $\alpha = 1, 1$.

Die Bereitstellflächen verfügen über eine Kapazität von 40 LE. Jede der Entladeflächen kann maximal 1600 LE fassen.

TestszENARIO X:

Layout der Umschlaghalle:

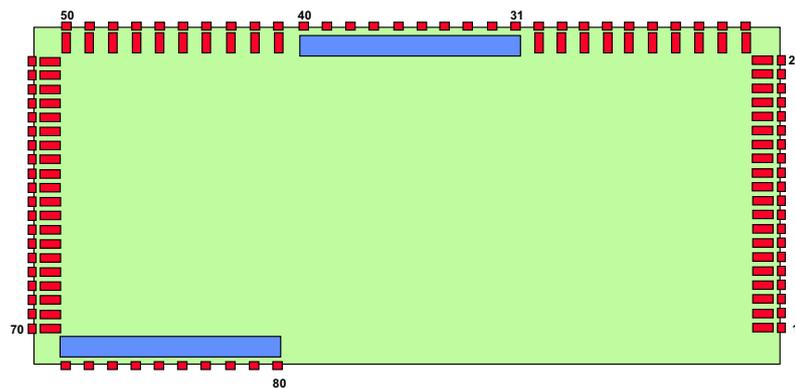


Abbildung A.8: TestszENARIO X: Layout der Umschlaghalle

Entfernungen: (Siehe Szenario X)

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Der Optimierungszeitraum reicht von 14:00 Uhr bis 18:00 Uhr, die Zeitscheibenlänge beträgt 40 Minuten.

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	14:00	18:00	16	NT41	14:00	18:00	27
NT2	14:00	18:00	20	NT42	14:00	18:00	20
NT3	14:00	18:00	40	NT43	14:00	18:00	2
NT4	14:00	18:00	27	NT44	14:00	18:00	21
NT5	14:00	18:00	20	NT45	14:00	18:00	26
NT6	14:00	18:00	16	NT46	14:00	18:00	20
NT7	14:00	18:00	14	NT47	14:00	18:00	20
NT8	14:00	18:00	25	NT48	14:00	18:00	8
NT9	14:00	18:00	49	NT49	14:00	18:00	15
NT10	14:00	18:00	12	NT50	14:00	18:00	40
NT11	14:00	18:00	17	NT51	14:00	18:00	19
NT12	14:00	18:00	5	NT52	14:00	18:00	6
NT13	14:00	18:00	2	NT53	14:00	18:00	3
NT14	14:00	18:00	21	NT54	14:00	18:00	23
NT15	14:00	18:00	26	NT55	14:00	18:00	19
NT16	14:00	18:00	20	NT56	14:00	18:00	21
NT17	14:00	18:00	20	NT57	14:00	18:00	6
NT18	14:00	18:00	8	NT58	14:00	18:00	15
NT19	14:00	18:00	20	NT59	14:00	18:00	32
NT20	14:00	18:00	40	NT60	14:00	18:00	21
NT21	14:00	18:00	19	NT61	14:00	18:00	16
NT22	14:00	18:00	10	NT62	14:00	18:00	14
NT23	14:00	18:00	3	NT63	14:00	18:00	25
NT24	14:00	18:00	23	NT64	14:00	18:00	40
NT25	14:00	18:00	19	NT65	14:00	18:00	4
NT26	14:00	18:00	21	NT66	14:00	18:00	4
NT27	14:00	18:00	6	NT67	14:00	18:00	4
NT28	14:00	18:00	15	NT68	14:00	18:00	2
NT29	14:00	18:00	32	NT69	14:00	18:00	21
NT30	14:00	18:00	21	NT70	14:00	18:00	28
NT31	14:00	18:00	16	NT71	14:00	18:00	20
NT32	14:00	18:00	20	NT72	14:00	18:00	20
NT33	14:00	18:00	40	NT73	14:00	18:00	8
NT34	14:00	18:00	27	NT74	14:00	18:00	13
NT35	14:00	18:00	20	NT75	14:00	18:00	40
NT36	14:00	18:00	16	NT76	14:00	18:00	19
NT37	14:00	18:00	14	NT77	14:00	18:00	1
NT38	14:00	18:00	25	NT78	14:00	18:00	3
NT39	14:00	18:00	40	NT79	14:00	18:00	23
NT40	14:00	18:00	40	NT80	14:00	18:00	19

Tabelle A.33: Testszenario X: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	14:00	18:00	15	FT21	14:00	18:00	36
FT2	14:00	18:00	16	FT22	14:00	18:00	39
FT3	14:00	18:00	14	FT23	14:00	18:00	24
FT4	14:00	18:00	20	FT24	14:00	18:00	25
FT5	14:00	18:00	24	FT25	14:00	18:00	32
FT6	14:00	18:00	42	FT26	14:00	18:00	26
FT7	14:00	18:00	22	FT27	14:00	18:00	49
FT8	14:00	18:00	33	FT28	14:00	18:00	65
FT9	14:00	18:00	28	FT29	14:00	18:00	11
FT10	14:00	18:00	25	FT30	14:00	18:00	49
FT11	14:00	18:00	32	FT31	14:00	18:00	41
FT12	14:00	18:00	26	FT32	14:00	18:00	32
FT13	14:00	18:00	49	FT33	14:00	18:00	49
FT14	14:00	18:00	65	FT34	14:00	18:00	68
FT15	14:00	18:00	11	FT35	14:00	18:00	11
FT16	14:00	18:00	50	FT36	14:00	18:00	51
FT17	14:00	18:00	88	FT37	14:00	18:00	89
FT18	14:00	18:00	48	FT38	14:00	18:00	78
FT19	14:00	18:00	53	FT39	14:00	18:00	18
FT20	14:00	18:00	57	FT40	14:00	18:00	11

Tabelle A.34: Testszenario X: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NT1	15:00	18:30	15	NT29	17:30	18:30	15
NT2	15:00	18:30	15	NT30	17:30	18:30	15
NT3	15:30	18:30	15	NT31	17:30	18:30	15
NT4	15:30	18:30	15	NT32	17:30	18:30	15
NT5	16:00	18:30	15	NT33	17:30	18:30	15
NT6	16:00	18:30	15	NT34	17:30	18:30	15
NT7	16:00	18:30	15	NT35	17:30	18:30	15
NT8	16:00	18:30	15	NT36	17:30	18:30	15
NT9	16:00	18:30	15	NT37	17:30	18:30	15
NT10	16:00	18:30	16	NT38	17:30	18:30	15
NT11	16:30	18:30	15	NT39	17:30	18:30	15
NT12	16:30	18:30	15	NT40	17:30	18:30	15
NT13	16:30	18:30	15	NT41	17:30	18:30	15
NT14	16:30	18:30	15	NT42	17:30	18:30	15
NT15	16:30	18:30	15	NT43	17:30	18:30	15
NT16	16:30	18:30	15	NT44	17:30	18:30	16
NT17	16:30	18:30	15	NT45	17:30	18:30	15
NT18	16:30	18:30	15	NT46	17:30	18:30	15
NT19	17:00	18:30	15	NT47	18:00	18:30	15
NT20	17:00	18:30	15	NT48	18:00	18:30	15
NT21	17:00	18:30	15	NT49	18:00	18:30	15
NT22	17:00	18:30	15	NT50	18:00	18:30	15
NT23	17:00	18:30	15	NT51	18:00	18:30	15
NT24	17:00	18:30	15	NT52	18:00	18:30	15
NT25	17:00	18:30	15	NT53	18:00	18:30	15
NT26	17:00	18:30	15	NT54	18:00	18:30	12
NT27	17:00	18:30	15	NT55	18:30	18:30	11
NT28	17:00	18:30	15	NT56	18:30	18:30	11

Tabelle A.36: Szenario SA: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT1	15:00	18:30	39	FT21	15:00	18:30	31
FT2	15:00	18:30	39	FT22	15:00	18:30	22
FT3	15:00	18:30	46	FT23	15:00	18:30	9
FT4	15:00	18:30	22	FT24	15:00	18:30	15
FT5	15:00	18:30	11	FT25	15:00	18:30	25
FT6	15:00	18:30	22	FT26	15:00	18:30	33
FT7	15:00	18:30	9	FT27	15:00	18:30	14
FT8	15:00	18:30	11	FT28	15:00	18:30	12
FT9	15:00	18:30	26	FT29	15:00	18:30	20
FT10	15:00	18:30	10	FT30	15:00	18:30	14
FT11	15:00	18:30	19	FT31	15:00	18:30	12
FT12	15:00	18:30	27	FT32	15:00	18:30	16
FT13	15:00	18:30	39	FT33	15:00	18:30	11
FT14	15:00	18:30	19	FT34	15:00	18:30	9
FT15	15:00	18:30	40	FT35	15:00	18:30	11
FT16	15:00	18:30	18	FT36	15:00	18:30	17
FT17	15:00	18:30	14	FT37	15:00	18:30	4
FT18	15:00	18:30	30	FT38	15:00	18:30	51
FT19	15:00	18:30	23	FT39	15:00	18:30	15
FT20	15:00	18:30	11	FT40	15:00	18:30	17

Tabelle A.37: Szenario SA: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

Sendungsmix:

	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40
NT1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NT42	1	1	1																											

Szenario SE:Layout der Umschlaghalle:

Das Layout entspricht der Abbildung 6.2 aus Kapitel 6. Die Eingangstore befinden sich an den Toren 41 - 54.

Entfernungen:

(Siehe Szenario VII)

Nahverkehrstouren: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge	Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
FT-001	2.30	6.30	16	FT-021	4.00	6.30	15
FT-002	2.30	6.30	16	FT-022	4.00	6.30	15
FT-003	3.00	6.30	16	FT-023	4.00	6.30	15
FT-004	3.00	6.30	16	FT-024	4.00	6.30	15
FT-005	3.00	6.30	16	FT-025	4.00	6.30	15
FT-006	3.00	6.30	16	FT-026	4.00	6.30	15
FT-007	3.00	6.30	16	FT-027	4.00	6.30	15
FT-008	3.00	6.30	16	FT-028	4.00	6.30	15
FT-009	3.30	6.30	16	FT-029	4.00	6.30	15
FT-010	3.30	6.30	16	FT-030	4.00	6.30	15
FT-011	3.30	6.30	15	FT-031	4.00	6.30	15
FT-012	3.30	6.30	16	FT-032	4.00	6.30	15
FT-013	3.30	6.30	15	FT-033	4.00	6.30	15
FT-014	3.30	6.30	15	FT-034	4.00	6.30	15
FT-015	3.30	6.30	15	FT-035	4.30	6.30	15
FT-016	3.30	6.30	15	FT-036	4.30	6.30	15
FT-017	3.30	6.30	15	FT-037	4.30	6.30	16
FT-018	3.30	6.30	15	FT-038	4.30	6.30	16
FT-019	3.30	6.30	15	FT-039	4.30	6.30	16
FT-020	3.30	6.30	15	FT-040	4.30	6.30	16

Tabelle A.39: Szenario SE: Nahverkehrstouren mit Lademengen und Fahrplan

Fernverkehrsrelationen: Lademengen und Fahrplan

Tour	Frühester Andockzeitpunkt	Spätester Abdockzeitpunkt	Lademenge
NR-001	2.00	6.30	28
NR-002	2.00	6.30	21
NR-003	2.00	6.30	26
NR-004	2.00	6.30	26
NR-005	2.00	6.30	12
NR-006	2.00	6.30	48
NR-007	2.00	6.30	56
NR-008	2.00	6.30	11
NR-009	2.00	6.30	7
NR-010	2.00	6.30	27
NR-011	2.00	6.30	47
NR-012	2.00	6.30	13
NR-013	2.00	6.30	7
NR-014	2.00	7.00	23
NR-015	2.00	7.00	30
NR-016	2.00	7.00	1
NR-017	2.00	7.00	25
NR-018	2.00	7.00	46
NR-019	2.00	7.00	51
NR-020	2.00	7.00	11
NR-021	2.00	7.00	30
NR-022	2.00	7.00	17
NR-023	2.00	7.00	19
NR-024	2.00	7.00	29
NR-025	2.00	7.00	2
NR-026	2.00	7.00	1
NR-027	2.00	7.00	1

Tabelle A.40: Szenario SE: Fernverkehrsrelationen mit Lademengen und Fahrplan

