

## **Abschlussbericht**

Zuwendungsempfänger:

Leibniz Universität Hannover

Fakultät für Maschinenbau

Fachgebiet Planung und Steuerung  
von Lager- und Transportsystemen

Leibniz Universität Hannover

Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät

Institut für Wirtschaftsinformatik

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 15358 N

### **Ganzheitliche Disposition von Strecken- und Flächenverkehren durch kombinierten Einsatz modifizierter Operations Research-Verfahren**

Das Projekt wurde mit Mitteln aus dem Haushalt des Bundesministeriums für  
Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller  
Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Auftrag  
der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. durchgeführt.

Hannover, den 20.01.2010

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis.....	IV
Bildverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	X
1 Allgemeine Angaben.....	1
1.1 Kurzbeschreibung des Forschungsprojekts .....	1
1.2 Antragsteller und beteiligte Unternehmen .....	2
2 Einleitung.....	3
3 Ausgangssituation, Stand der Technik und Aufgabenstellung.....	5
3.1 Entwicklungen des Stückgutverkehrsmarktes .....	5
3.2 Abgrenzung des Betrachtungsbereiches .....	7
3.3 Forschungsdefizit.....	8
3.4 Forschungsziel.....	9
3.5 Vorgehensweise.....	11
4 Verkehrslogistik für Stückgüter .....	14
4.1 Abgrenzung der Transportsysteme .....	14
4.2 Betriebliche Praxis des Sammelladungsverkehrs .....	21
5 Netze in der Verkehrslogistik.....	29
5.1 Begriffsdefinitionen.....	29
5.2 Netzwerktypen .....	29
5.3 Effekte von H&S-Strukturen .....	32
5.4 Transportnetze in der Praxis .....	33
6 Ansätze zur Transportplanung.....	38
6.1 Bedeutung des Operations Research für die Transportplanung .....	38
6.2 Systematisierung der Planungsprobleme.....	39

---

6.3	Darstellung ausgewählter Transportprobleme .....	46
7	Modellkonzeption zur ganzheitlichen Transportplanung .....	62
7.1	Anforderungen an das Planungsmodell .....	62
7.2	Modellansatz .....	72
7.3	Beschreibung der Modelleingangsdaten .....	80
7.4	Gestaltung der Berechnungsschritte .....	88
7.5	Teilterminierung von Kanten .....	107
8	EDV-basierte Umsetzung .....	119
8.1	Implementierung in ein Datenbankmanagementsystem .....	119
8.2	Erleichterung der Datenpflege .....	120
8.3	Ergebnisdarstellung .....	126
8.4	Einbindung von MapPoint .....	132
8.5	Software-Validierung .....	135
9	Praktische Anwendbarkeit und weiterer Forschungsbedarf .....	142
9.1	Informationsverfügbarkeit .....	142
9.2	Informationssicherheit .....	143
9.3	Einsatzgebiete und Übertragbarkeit des Modells .....	143
9.4	Nutzung als Entscheidungsunterstützungssystem .....	145
9.5	Weiterer Forschungsbedarf .....	147
10	Zusammenfassung .....	148
11	Öffentlichkeitsarbeit .....	150
12	Schrifttum .....	152

**Abkürzungsverzeichnis**

CVRP	Capacitated-Vehicle-Routing-Problem
DNSD	Dynamic-Service-Network-Design
EDI	Electronic Data Interchange
EDIFACT	Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport
ERP	Enterprise Resource Planning
FAB	Früheste Abfahrt
FAN	Früheste Ankunft
FSND	Frequency-Service-Network-Design
GFT	Güterfernverkehrstarif
H&S	Hub-and-Spoke
JIT	Just-in-time
KEP-Dienste	Kurier-, Express- und Paketdienste
LE	Ladeeinheit
LHM	Ladehilfsmittel
LTL	Less-Than-Truckload
OR	Operations Research
SAB	Späteste Abfahrt
SAN	Späteste Ankunft
SNDP	Service-Network-Design-Problem
SPP	Shortest-Path-Problem
SPPTW	Shortest-Path-Problem with Time Windows
VRP	Vehicle-Routing-Problem
VRPTW	Vehicle-Routing-Problem with Time Windows
TE	Transporteinheit
TEU	Twenty-Foot-Equivalent-Unit
tkm	Tonnenkilometer
TSP	Travelling-Salesman-Problem

## Symbolverzeichnis

$\underline{B}$	Menge aller Verbindungen in Hubs
$c_{e(ij)}$	Bewertung von $e(ij)$
$c_{e(ij)}^{\text{aktuell}}$	Bewertung von $e(ij)$ inkl. der aktuellen Sendung
$c_{e(ij)}^{\text{dispo}}$	Bewertung von $e(ij)$ auf Basis der disponierten Sendungen
$c_{e(ij)}^k$	Bewertung von $e(ij)$ anhand von Merkmal $k$
$c_i$	Kosten an $i$
$c_{p(oi)}$	Kosten des Pfades von $o$ nach $i$
$c_{p(oi)}^k$	Bewertung des Pfades von $o$ nach $i$ anhand von Merkmal $k$
$D_{ij}$	Großkreisentfernung zwischen $i$ und $j$ auf Basis des Erdradius
$d$	Zielknoten
$E$	Menge der Kanten eines Netzwerkes
$e$	Kante des Graphen
$e^*$	Kante des Graphen
$E^{\text{FAB}}$	Menge aller Kanten, bei denen das FAB geändert wurde
$E^{\text{SAN}}$	Menge aller Kanten, bei denen das SAN geändert wurde
$E_i^{\text{Start}}$	Menge aller Kanten mit $i$ als Startknoten
$E_i^{\text{Ziel}}$	Menge aller Kanten mit $i$ als Zielknoten
$e(ij)$	Eindeutiger Index für eine gerichtete Kante von $i$ nach $j$
$\text{Eff}(L_i)$	Effiziente Teilmenge der Label für Knoten $i$
$e_n$	Kante an Position $n$ eines Pfades
$E^{\text{perm}}$	Menge der dauerhaften Kanten eines Graphen
$F_{e(ij)}$	Frequenz von $e(ij)$
$f_{e(ij)}^r$	Fixe Kosten des Transportes von $e(ij)$ im Nutzungsbereich $r$
$G$	Graph
$h_{e(ij)}$	Handlingkosten an $e(ij)$
$h_i$	Handlingkosten an Knoten $i$
$i$	Knoten des Graphen
$(ij)$	Gerichtete Kante von $i$ nach $j$

$[ij]$	Ungerichtete Kante zwischen $i$ und $j$
$j$	Knoten des Graphen
$k_{e(ij)}^m$	Kapazität von $e(ij)$ in Mengeneinheit $m$
$L$	Menge der Label
$\underline{L}$	Menge aller Kanten zwischen Terminals
$Lat_i$	Breitengrad von Knoten $i$
$Lon_i$	Längengrad von Knoten $i$
$L_i^{perm}$	Menge der permanenten Label für Knoten $i$
$L_i^{temp}$	Menge der temporären Label für Knoten $i$
$l_{p(oi)}$	Eindeutiges Label für den Pfad von $o$ nach $i$
$M_{ij}$	Mittelpunktswinkel zwischen $i$ und $j$ auf dem Großkreis
$\underline{N}$	Menge aller Knoten
$N(e)$	Menge aller Nachfolgerkanten von Kante $e$
$N(i)$	Menge aller Nachbarknoten von $i$
$n_{e(ij)}^{aktuell}$	Prozentuale Nutzung von $e(ij)$ inkl. der aktuellen Sendung
$n_{e(ij)}^{dispo}$	Prozentuale Nutzung von $e(ij)$ durch bereits disponierte Sendungen
$o$	Startknoten
$O_e^r$	Bereichsobergrenze für Bereich $r$ an Kante $e$
$P$	Menge der Knoten eines Graphen
$p(ij)$	Pfad von $i$ nach $j$
$Q$	Schlange
$R$	Menge der Bereiche $r$ einer Kostenfunktion
$s$	Sendung
$SE$	Schlangenende
$SK$	Schlangenkopf
$\underline{T}$	Menge aller Depots
$t_{e(ij)}^{AB}$	Abfahrt von $e(ij)$ an $i$
$t_{e(ij)}^{AN}$	Ankunft von $e(ij)$ an $j$
$t_{e(ij)}^{FAB}$	Frühesten Abfahrt der Kante $e(ij)$
$t_{e_n}^{FAB}$	Frühesten Abfahrt der Kante $e_n$

$\hat{t}_{e_n}^{FAB}$	Hilfsvariable zur Zwischenspeicherung einer FAB für eine Kante $e_n$
$\bar{t}_{e_n}^{FAB}$	Binärvariable, die anzeigt, wenn das FAB einer Kante verändert wurde
$t_{e(ij)}^{FAN}$	Früheste Ankunft von $e(ij)$
$t_{e_n}^{FAN}$	Früheste Ankunft von $e_n$
$t_{e(ij)}^{SAB}$	Späteste Abfahrt von $e(ij)$
$t_{e_n}^{SAB}$	Späteste Abfahrt von $e_n$
$t_{e(ij)}^{SAN}$	Späteste Ankunft von $e(ij)$
$t_{e_n}^{SAN}$	Späteste Ankunft von $e_n$
$\hat{t}_{e_n}^{SAN}$	Hilfsvariable zur Zwischenspeicherung einer SAN für $e_n$
$\bar{t}_{e_n}^{SAN}$	Binärvariable, die anzeigt, wenn das SAN einer Kante verändert wurde
$t_i^{FAB}$	Früheste Abfahrt an $i$
$t_i^{FAN}$	Früheste Ankunft an $i$
$t_i^{SAN}$	Späteste Ankunft an $i$
$t_s^{FAB}$	Früheste Abfahrt für Sendung $s$
$t_s^{SAN}$	Späteste Ankunft für Sendung $s$
$t_{\max}^{od}$	Maximal zulässige Transportzeit zwischen $o$ und $d$
$t_{p(oi)}^{Ankunft}$	Ankunftszeit an Knoten $i$ bei Nutzung von Pfad $p(oi)$
$U_{e(ij)}^r$	Bereichsuntergrenze für Bereich $r$ an $e(ij)$
$V(e)$	Menge aller Vorgängerkanten von $e$
$V(j)$	Menge der Vorgängerknoten von $j$
$v_{e(ij)}^r$	Variable Kosten des Transportes an $e(ij)$ im Nutzungsbereich $r$
$x_{e(ij)}$	Transportmenge an $e(ij)$
$x_{e(ij)}^{Anteil}$	Transportmenge an $e(ij)$ als Anteil der Kapazität von $e(ij)$
$X_{e(ij)}^m$	Gesamttransportmenge auf einer Kante $e(ij)$ in Mengeneinheit $m$
$x_{e(ij)}^{s,m}$	Transportmenge der Sendung $s$ an Kante $e(ij)$ in Mengeneinheit $m$
$x_i^s$	Handlingmenge der Sendung $s$ an Knoten $i$
$x^{s,m}$	Transportmenge der Sendung $s$ in Mengeneinheit $m$
$x^{od}$	Transportaufkommen zwischen Quelle $o$ und Senke $d$

---

$y_{e(ij)}^d$	Binärvariable für die Nutzung von $e(ij)$ für Fracht abgehend von $i$ zu einem Zielknoten $d$
$y_{e(ij)}^r$	Binärvariable zur Aktivierung von Kostenbereich $r$ für $e(ij)$
$\delta_{e(ij)}^{od}$	Binärvariable zur Aktivierung von $e(ij)$ als Teil des Pfades von $o$ nach $d$
$\delta_{e(ij)}^s$	Binärvariable zur Aktivierung von $e(ij)$ als Teil des Pfades von $s$
$\Delta t_{e(ij)}$	Gesamtdauer der Kante $e(ij)$
$\Delta t_{e_n}$	Gesamtdauer der Kante $e_n$
$\varepsilon$	Numerische Exzentrizität einer Ellipse



**Bildverzeichnis**

Bild 4.1: Planungsaufgabe des Ganzladungsverkehrs .....	15
Bild 4.2: Planungsaufgabe des Teilladungsverkehrs .....	17
Bild 4.3: Planungsaufgabe des Sammelladungsverkehrs.....	20
Bild 4.4: Alternativen der Transportdurchführung .....	25
Bild 5.1: Netzwerktypen für die Verkehrslogistik.....	30
Bild 6.1: Beispiele für Planungsprobleme eines Lkw-Transportunternehmens .....	40
Bild 6.2: Label in multikriteriellen Verfahren.....	59
Bild 7.1: Gängige Strukturen von Konditionen .....	65
Bild 7.2: Mengenstaffeln auf Basis von Nebenklassenzuschlägen .....	67
Bild 7.3: Ablauf der entwickelten Methodik zur ganzheitlichen Transportplanung ....	77
Bild 7.4: Zusammenhang des globalen Workflows und der Informationsbedarfe ....	80
Bild 7.5: Beispielhafte euklidische Entfernungen und Straßenverbindungen.....	92
Bild 7.6: Beispiele für die geografische Einschränkung des Transportnetzwerkes ...	94
Bild 7.7: Definition der Auswahlfläche .....	95
Bild 7.8: Zusammensetzung der Transportdauer.....	96
Bild 7.9: Approximation einer Tariftabelle durch ein Polynom zweiten Grades.....	99
Bild 7.10: Möglichkeiten der Zuordnung von Kunden und Depots .....	100
Bild 7.11: Zuordnung von Depots zu Kunden durch absolute Entfernungen .....	101
Bild 7.12: Zuordnung von Depots zu Kunden durch relative Entfernungen .....	102
Bild 7.13: Beispielhaftes Transportnetzwerk mit Aufträgen .....	108
Bild 7.14: Feste Terminierung der Kanten durch den ersten Auftrag.....	109
Bild 7.15: Schrittweise Terminierung von Kanten .....	111
Bild 7.16: Teilterminierung von Kanten .....	112
Bild 7.17: Relevanz der Berücksichtigung von Abhängigkeiten .....	113
Bild 7.18: Anpassungsnotwendigkeit bei abhängigen Kanten .....	117
Bild 8.1: Entwickelte Datenbankstruktur in Access .....	120
Bild 8.2: Hauptmenü der grafischen Oberfläche .....	121
Bild 8.3: Verwalten der Kunden- und der Depotdaten .....	122
Bild 8.4: Verwalten der Transportrelationen.....	124
Bild 8.5: Verwalten der Sendungen .....	126
Bild 8.6: Alternativen der Ergebnisausgabe.....	127
Bild 8.7: Visualisierungsmöglichkeiten.....	131

---

Bild 8.8: Automatisierte Bestimmung der Geokoordinaten .....	133
Bild 8.9: Routenplanung in MapPoint .....	134
Bild 8.10: Netzwerkvisualisierung im MapPoint Kartenwerk .....	135

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 7.1: Auszug der Güterfernverkehrsentgelte, Frachttafeln für Stückgut .....	63
Tabelle 8.1: Netzgrößen beispielhafter Stückgutkooperationen /STÖ-2007/ .....	119
Tabelle 8.2: Ausschnitt der Kantentabelle nach einem Berechnungslauf, Teil 1 ....	123
Tabelle 8.3: Ausschnitt der Kantentabelle nach einem Berechnungslauf, Teil 2 ....	123
Tabelle 8.4: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse für die Tourenplanung .....	128
Tabelle 8.5: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse für das Depothandling .....	128
Tabelle 8.6: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse als Ladeliste .....	129
Tabelle 8.7: Ausschnitt des zu Grunde gelegten Auftragspools .....	137
Tabelle 8.8: Ausschnitt einer beispielhaften Ergebnisliste .....	137
Tabelle 8.9: Auftragsortierungen für die Plausibilitätsprüfung .....	139

# 1 Allgemeine Angaben

## 1.1 Kurzbeschreibung des Forschungsprojekts

In heutigen Sammelladungsspeditionen ist die Disposition der Sendungen eine manuell durchgeführte Tätigkeit. In der Regel sind bestimmte Postleitzahlgebiete ausgewählten Gebietsspediteuren fest zugeordnet. Die Zuordnung von Sendungen zu Streckenverkehren wird anhand persönlicher Erfahrungen der Disponenten und momentan freier eigener Kapazitäten durchgeführt. Eine durchgängige Entscheidungsunterstützung durch EDV findet praktisch nicht statt. Daher ist auch die Auswahl möglicher Transportketten eingeschränkt: Ein Ausweichen auf Alternativen, die möglicherweise günstiger sind oder bei Engpässen als Ersatz genutzt werden können, ist nur schwer möglich und daher unüblich. In der derzeitigen betrieblichen Praxis sind kaum Einsparpotentiale zu heben, die über die normalen Netzwerkeffekte hinausgehen.

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojektes wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem ein Auftragspool von Sendungen multikriteriell durch ein bestehendes Netzwerk geroutet werden kann. Hierbei wird anhand von Sendungsparametern, wie Größe und Gewicht, eine Verteilung auf Linienverkehre und Fremdkapazitäten vorgenommen. Im Netz und bei den Sendungen werden darüber hinaus Zeitfenster berücksichtigt. Aufbauend auf die Modellentwicklung wird die Umsetzung des Modells in eine Software beschrieben. Die anschließende Validierung umfasst zum einen die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse und zum anderen eine Bewertung der eingesetzten Heuristik.

Das im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Modell ist in der Lage, eine automatische Disposition in Sammelladungsnetzen durchzuführen. Dabei liegen die Vorteile gegenüber einer manuellen Disposition vor allem in der Anzahl überprüfter Transportketten sowie der sehr hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit. Die entwickelte Automatisierung kann als Entscheidungsunterstützungssystem für Disponenten oder die Netzwerkanalyse sinnvoll eingesetzt werden.

## 1.2 Antragsteller und beteiligte Unternehmen

- o Forschungsstelle 1

Leibniz Universität Hannover

Fakultät für Maschinenbau

Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT)

Callinstraße 36

30167 Hannover

- o Forschungsstelle 2

Leibniz Universität Hannover

Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät

Institut für Wirtschaftsinformatik (IWI)

Königsworther Platz 1

30167 Hannover

- o Beteiligte Unternehmen

Georg Menell Transportunternehmen GmbH & Co. KG, Ronnenberg

Güterverkehrszentrum-Entwicklungsgesellschaft Wolfsburg mbH, Wolfsburg

Krage Speditionsgesellschaft mbH, Langenhagen

Kunzendorf Spedition GmbH, Hannover

L.I.T. Spedition GmbH, Brake

Schenker Deutschland AG, Hannover

Städtische Häfen Hannover, Hannover

VTL Vernetzte-Transport-Logistik, Fulda

## 2 Einleitung

Sowohl die Produktion von Investitions- als auch von Konsumgütern zeichnet sich durch eine immer geringere Fertigungstiefe und ein Bestreben zum Einsatz kompletter Baugruppen aus. Die Konsequenz ist ein hoher Grad an Arbeitsteilung und damit verbunden ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zwischen den Beteiligten einer Supply Chain. Der hiermit einhergehende hohe Transportaufwand wird darüber hinaus durch die räumliche Ausweitung der Beschaffungsmärkte und durch eine möglichst produktionssynchrone Materialversorgung, kurz JIT, signifikant verstärkt. Es sind aber nicht nur die kleineren Sendungsgrößen mit einer hohen Transportfrequenz, die besondere Anforderungen an die Transportlogistik stellen, sondern auch die gestiegenen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Qualität /ABE-2003/.

Durch steigende Energiekosten und öffentliche Abgaben wie auch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen stehen die Transportunternehmen nicht nur logistisch, sondern auch wirtschaftlich vor großen Herausforderungen. Kleine Sendungsgrößen führen zwangsläufig zu einem steigenden Dispositionsaufwand bei den Transportdienstleistern. Um bei den kurzen Laufzeiten, die heute alle Versender als selbstverständlich voraussetzen, noch mit einer wirtschaftlichen Auslastung arbeiten zu können, ist auch der Transportmarkt in den letzten Jahren einem deutlichen Konzentrationsprozess erlegen.

So haben sich bereits flächendeckende Netze in den Branchen Paketdienste, Sammelgutspeditionen und Luftfracht gebildet. Dominiert werden diese Bereiche von internationalen Transportkonzernen. Um den eigenen Kunden einen vergleichbaren Service anbieten zu können, haben sich kleine und mittlere Unternehmen in Allianzen zusammengeschlossen. Resultat ist ein Wettbewerb am Rande der Profitabilität, der die Unternehmen zur Optimierung ihrer Transportnetzstrukturen zwingt. Neben den physischen Strukturen mit Sammel- und Verteildepots, Hubs, der Verkehrsinfrastruktur sowie leistungsfähigen Verkehrsmitteln betrifft die Optimierung vor allem die Ablaufsteuerung.

Die im Rahmen der taktischen oder strategischen Planung eingesetzten Entscheidungsmodelle sind zumeist auf begrenzte Teilaspekte fokussiert und bieten keine durchgängige Entscheidungsunterstützung. Für den operativen Betrieb gilt, dass die

Lkw-Disponenten heute im Rahmen des Nahverkehrs mit seinen Sammel- und Verteiltouren von ausgereifter Software unterstützt werden. Die eingesetzten Lösungen tragen allen Anforderungen der Praxis Rechnung. Es wird allerdings keine Unterstützung der kompletten Transportkette geleistet. Vor- und Nachläufe werden isoliert betrachtet, während der Hauptlauf nur in der taktischen bzw. strategischen Planung Berücksichtigung findet.

Eine deutliche Verbesserung ist im Bereich der Informationsflüsse zu verzeichnen. Auf der einen Seite setzen sich Web-Anwendungen, wie die internetgestützte Erfassung von Transportaufträgen oder Frachtenbörsen, immer weiter durch. Auf der anderen Seite findet eine Standardisierung und Automatisierung im bilateralen Informationsaustausch statt. Ein Beispiel ist das Electronic Data Interchange, kurz EDI. Die hierdurch zur Verfügung stehenden Informationen können allerdings noch nicht automatisch in Transportketten umgesetzt werden. Der Disponent mit seiner Erfahrung bleibt also unersetzlich.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, im Rahmen eines ganzheitlichen Modells zur operativen Transportplanung in Sammelladungsnetzen die an den Grenzen der einzelnen Planungsansätze entstandenen Lücken zu schließen. Für einen Auftragspool wird in einem gegebenen Transportnetzwerk ein Vorschlag für die Durchführung der Transporte generiert. Das heuristische Modell wurde in erster Linie für den operativen Betrieb entwickelt, kann aber auch im Rahmen der taktischen und strategischen Planung zur Unterstützung herangezogen werden.

### 3 Ausgangssituation, Stand der Technik und Aufgabenstellung

Trotz der 2009 zu verzeichnenden Rückgänge ist die Logistikbranche durch ein überdurchschnittliches Wachstum geprägt. Neben einem starken Wachstum in der Lagerlogistik und bei logistischen Zusatzleistungen ist auch der Güterkraftverkehrsmarkt durch eine gute Auftrags- und Beschäftigungslage gekennzeichnet. Aktuell geben im Wesentlichen zwei Faktoren zu verstärkten Optimierungsbemühungen im Lkw-Güterverkehr Anlass. Zum einen verhindern der starke Wettbewerb und die Preisentwicklung beim Kraftstoff, dass steigende Kraftstoffkosten vollständig an die Versender weitergegeben werden können. Zum anderen stellen momentan sowohl der Mangel an qualifiziertem Personal als auch die Beschaffungszeiten von Equipment Expansionshemmnisse dar /DSL-2008/.

#### 3.1 Entwicklungen des Stückgutverkehrsmarktes

Auf Basis veröffentlichter Statistiken können kaum verlässliche Aussagen über die Entwicklung des nationalen Stückgutverkehrsmarktes getroffen werden. Aussagen über den Anteil, den der gewerbliche Verkehr ausmacht bzw. Aussagen zu den Produkten Teilladungen und Sammelladungen sind nicht möglich. Für palettiertes Gut und gebündelte Güter können folgende kurzfristige Trends aus den Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes abgeleitet werden /KBA-2008/:

- o Die Verkehrsleistung in Tonnenkilometern, kurz tkm, nimmt proportional zur Beförderungsleistung in Tonnen stetig zu. Dabei ist in den letzten vier Jahren bei palettiertem Gut ein Wachstum zwischen 1 % und 6 % zu verzeichnen. Der Bereich der gebündelten Güter, der vom Transportaufkommen deutlich weniger Relevanz aufweist, hat einen Mengeneinbruch von 2004 auf 2005 mit Wachstumsraten von ca. 14 % von 2005 auf 2006 und ca. 8 % von 2006 auf 2007 kompensiert.
- o Sowohl die realisierte Beförderungsleistung als auch die realisierte Verkehrsleistung sind weniger stark gewachsen als die durch die Verkehrsmittel zur Verfügung gestellte Gesamtkapazität. Damit ist die Auslastung der Verkehrsmittel, gemessen an der Zuladung in Tonnen leicht rückläufig.



Insbesondere die sinkende Auslastung lässt keine eindeutigen Rückschlüsse über die Effizienz der Leistungserbringung zu, da es sich um Gesamtverkehrsdaten handelt und zum anderen die Beförderungsleistung sowie die Gesamtkapazität der Beförderungsleistung lediglich in t gemessen werden. Ist es bspw. im Betrachtungszeitraum zu einer Mengenverschiebung vom Werkverkehr hin zum gewerblichen Güterverkehr gekommen, hat sich damit das System der Leistungserbringung wesentlich verändert. Eine derartige Strukturveränderung könnte eine mögliche Erklärung für eine schlechtere Auslastung sein.

Über alle Formen der Ladung wird in der Marktbeobachtung Güterverkehr, Jahresbericht 2007, des Bundesamtes für Güterverkehr seit 2003 eine deutliche Verschiebung in Richtung des gewerblichen Güterverkehrs aufgezeigt /BAG-2008/. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die Verschiebung im Bereich der Stückgüter noch deutlicher ausgefallen ist. Gab es weiterhin eine Verschiebung der Güterstruktur von Rohstoffen hin zu Halbfertigwaren oder Fertigprodukten, verschiebt sich auch die aufgrund von Volumenrestriktionen erreichbare Gesamtkapazität.

Grundsätzlich muss unabhängig von den vorliegenden Statistiken festgehalten werden, dass die Verkehrsmittelauslastung trotz nahezu flächendeckenden 24 h-Diensten und immer kleineren Sendungen sowie engen Anlieferzeitfenstern beinahe konstant gehalten werden konnte. Möglich wird dies durch einen starken Konzentrationsprozess in der Transportbranche sowie eine konsequente Organisation der kleinen und mittleren Sammelgutspeditionen in Kooperationen.

Durch den technischen Fortschritt werden Service- und Qualitätsstandards erreicht, die von den Auftraggebern als selbstverständlich angesehen werden. Einerseits lässt sich für diese Leistungen kein finanzieller Ausgleich erzielen, andererseits führt diese Standardisierung zu einem hohen Grad an Substituierbarkeit der einzelnen Logistikdienstleister. Um diesem entgegen zu wirken, versuchen die Transportunternehmen zur Kundenbindung vermehrt kundenspezifische Mehrwertdienstleistungen anzubieten. Dass diese Zusatzleistungen in Verbindung mit einem standardisierten Equipment und professionellem Fuhrparkmanagement zu einer besseren Auslastung führen können, zeigen Müller und Klaus für Anbieter im Bereich Advanced-Truck-Load, kurz ATL, in den USA. Die Verkehrsmittel dieser Anbieter legen nur 10 % bis 11 % ihrer Gesamt-Kilometerleistung als Leerkilometer zurück /KLA-2006/.

In der Summe ergibt sich für die Transportunternehmen eine Verschlechterung der Ertragslage. Zwar konnten Unternehmen im Sammelgutbereich durch ein gestiegenes Güteraufkommen Effizienzsteigerungen erreichen, jedoch konnten sie den Anstieg der Aufwendungen nicht ausgleichen. Als Folge davon sind die Unternehmen bemüht, die Fuhrparks zu modernisieren, unrentable Aufträge abzulehnen und sich im Markt zu spezialisieren. Auch Konzentrationstendenzen sind weiterhin zu beobachten, da Logistikkonzerne geeignete Unternehmen zur Ausweitung des Branchenportfolios und ihrer Transportnetze übernehmen.

Auch bei einer Automatisierung erkennen Transportdienstleister ihre Chancen. Anders als in Industrieunternehmen ist es aufgrund der fehlenden Standardisierung nicht die automatisierte Materialfluss- und Lagertechnik, die verstärkt zum Einsatz kommt. Viele Speditionen nutzen allerdings die Potentiale einer durchgängigen EDV-basierten Auftragsabwicklung und sind nicht nur die Endnutzer, sondern auch oftmals Dienstleister. Über Fahrzeugtelematik und Betriebsdatenerfassung hinaus, versuchen die Betreiber von Speditionsnetzen ihre Kunden besser an die eigenen EDV-Systeme anzubinden. Möglichkeiten, die für dieses Ziel genutzt werden, reichen von der Preisdifferenzierung der Dienstleistung über die Hilfestellung bei der Anpassung von Schnittstellen bis hin zur Gestellung von Datenerfassungsgeräten beim Versender.

### **3.2 Abgrenzung des Betrachtungsbereiches**

Transportgüter können nach einer Reihe von Kriterien strukturiert werden. Neben Gütereigenschaften, die besondere Anforderungen an den Transport oder auch die Lagerung stellen, wie bspw. bei Nahrungsmitteln, hängender Ware oder Gefahrgut, kann eine grundsätzliche Unterscheidung in Massengut und Stückgut vorgenommen werden. Während Fluide, Gase und Schüttgut als Untergruppen des Massengutes spezielle Anforderungen an Verkehrsmittel und Umschlagseinrichtungen stellen, handelt es sich bei Stückgut um Sendungen, die aus einer definierten Anzahl Kolli bestehen. Ein Kolli ist dabei als die kleinste Verpackungseinheit einer Warensendung definiert. Derartige Verpackungseinheiten können Kartons oder Kisten, Paletten oder Gitterboxen, Rollen sowie Coils und Fässer sein. Der Umschlag der Kolli erfolgt bspw. mit Flurförderzeugen oder Kranen.

Im gewerblichen Güterkraftverkehr erfolgt der Transport von Stückgütern mittels Kurier-, Express- und Paketdiensten, kurz KEP-Dienste, als speditionelles Sammelgut, in Teilladungen oder in Ganzladungen. Im Gegensatz zum Werkverkehr besteht im gewerblichen Güterkraftverkehr die Möglichkeit, Stückgutsendungen, die keiner Ganzladung entsprechen, zu konsolidieren, um dadurch eine Verringerung der Transportkilometer zu erreichen. So hat sich für den Transport von Stückgut das Sammelladungsprinzip entwickelt, bei dem die vier logistischen Aufgaben Sammeln, Sortieren, Transportieren und Verteilen organisiert werden /JAN-2003/.

Für die in dieser Arbeit betrachteten Ansätze hat der Werkverkehr, den ein Unternehmen einsetzt, um Ladung zwischen zwei eigenen Standorten zu transportieren, keine Bedeutung. Ebenso werden spezialisierte Verteilverkehre, die der Handel anwendet, um seine Ware flächendeckend zu verbreiten, nicht betrachtet. Allgemeine Ganzladungsverkehre, bei denen aufgrund der Ladungsgröße Güter ohne Umschlag und ohne Zuladung vom Versender zum Empfänger transportiert werden, bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

### **3.3 Forschungsdefizit**

Ähnlich wie in den USA haben auch Spediteure in Europa in den letzten Jahren große Transportnetzwerke errichtet /SCH-2004/. Diese Netzwerke resultieren einerseits aus Akquisitionen großer Spediteure bzw. Logistikkonzerne und andererseits aus strategischen Allianzen von kleinen und mittleren Spediteuren. Heute werden Sendungen auf festen Wegen über diese Netzwerke verschickt. Diese festen, direkten Relationen zwischen den Depots im Netzwerk und die feste Zuordnung von Ursendern und Endempfängern zu den Depots ermöglichen es, den Transport der Sendungen mit einfachen Mitteln zu planen. Mit der Festlegung von Versender und Empfänger steht die zu nutzende Transportkette für die Disposition in der Mehrheit der Fälle fest. Lediglich bei Überbuchung von Transportkapazitäten müssen die Disponenten korrigierend eingreifen.

Die feste Zuordnung führt allerdings dazu, dass die Anzahl realisierbarer Transportketten stark eingeschränkt ist. Das Planungsergebnis beinhaltet somit erhebliche Verbesserungspotentiale. Aus diesem Grund muss die Anbindung von Versender und Empfänger an das Netzwerk flexibel gestaltet werden. Unabhängig davon sollte

es möglich sein, in Abhängigkeit vom aktuellen Auftragspool zu entscheiden, ob bestimmte Relationen direkt gefahren werden oder ob ein oder mehrere Umschläge durchgeführt werden sollten.

Um die Allokation der zur Verfügung stehenden Ressourcen möglichst effizient zu gestalten, sind die folgenden Forderungen an eine ganzheitliche operative Transportplanung zu formulieren:

- o Die fixe Zuordnung von Versendern bzw. Empfängern zu Depots in Form sogenannter Leitwege ist aufzuheben.
- o Die Festlegung von Transportrelationen auf Direktverkehre bzw. festgelegte ein- oder mehrstufige Hub and Spoke-Verkehre, kurz H&S, ist aufzulösen.
- o Eine Funktionsunterscheidung in Depots und Hubs findet nicht statt.
- o Vor- und Nachläufe sowie die Hauptläufe sind ganzheitlich und im Sinne durchgängiger Transportketten zu betrachten.
- o Die Einflüsse von Transportmenge und -entfernung auf die Frachtpreise müssen realitätsnah abgebildet werden. Es sind abschnittsweise definierte stetige wie auch unstetige Kostenfunktionen abzubilden.
- o Es sind fahrplanmäßig organisierte Linienverkehre und Kapazitäten, die zeitlich flexibel sind, miteinander zu kombinieren.

Durch die Umsetzung der aufgeführten Forderungen wird der Planungsaufwand für Transportketten deutlich erhöht. Um das entstehende Planungsproblem lösen zu können, wird eine Methodik benötigt, die in ein rechnergestütztes Planungstool umgesetzt werden kann. Ein solches Tool ist für die beschriebene Aufgabenstellung bis jetzt nicht verfügbar. Auch die Grundlagen, also die Formulierung einer ganzheitlichen Methodik, sind in der einschlägigen Literatur nicht zu finden. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz schließt diese Lücke und bietet somit eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten in der Transportlogistik.

### **3.4 Forschungsziel**

Die Aufgaben der Transportplanung liegen in der Auswahl der geeigneten Verkehrsmittel, der richtigen Sammel- und Verteildepots sowie in der Ermittlung des günstigsten Weges durch das Transportnetzwerk. In jedem Fall sind die mit der Planungsaufgabe verbundenen Nebenbedingungen, wie bspw. Kapazitäts- und Zeitrestriktionen,

einzuhalten. Im Rahmen der operativen Planung werden taktische und strategische Aufgaben, wie die Erstellung von langfristigen Fahrplänen oder die Auswahl geeigneter Standorte für Depots, nicht behandelt.

Die Eingangsgrößen der Transportplanung umfassen die einzelnen Sendungen mit ihren individuellen Parametern. Dazu gehören Sendungsgewicht und -größe, Zeitrestriktionen sowie Informationen zum Versender und zum Empfänger. Aber auch Angaben zu den Depots und Hubs sowie den angebotenen Transportrelationen müssen vorliegen. Die Transportangebote können unterschiedlich gestaltet sein. Während durch Fahrpläne oder bei Restkapazitäten Transportangebote mit einer bestimmten Kapazität und einem fixen Abfahrtszeitpunkt vorliegen, können auch nicht verplante Verkehrsmittel mit flexiblen Abfahrtszeiten verfügbar sein. In diesem Fall wird eine Transportdauer geschätzt. In jedem Fall muss für die jeweilige Relation eine Kostenfunktion vorliegen.

Die Depots spannen zusammen mit den Hubs und den angebotenen Transportrelationen ein Netzwerk auf. Insbesondere bei großen Netzwerken ergibt sich bereits für jede einzelne Sendung ein großer Lösungsraum. Ein Gesamtoptimum ist damit für einen großen Sendungspool nicht realisierbar. Aus diesem Grund wird ein heuristischer Ansatz verfolgt. Die Sendungen werden nach dem Marginalprinzip durch das Netzwerk geroutet. Auf diese Weise wird zwar nur ein Teil der möglichen Wechselwirkungen der Aufträge abgebildet, jedoch werden bei jeder betrachteten Sendung die Einflüsse der vorherigen Sendungen berücksichtigt. Mit einem lokalen Suchverfahren zur Verbesserung dieser Basislösung wie auch mit ausführlichen Untersuchungen zur bestmöglichen Sortierung kann später auf diesen Ansatz aufgebaut werden.

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Generierung von Transportketten im Sammelladungsverkehr nach ganzheitlichen Kriterien. Das Modell soll dabei nicht die günstigste Transportkette für einen einzigen Transport ermitteln, sondern einen Pool von Transportaufträgen so aufeinander abstimmen, dass gesamthaft ein effizientes Ergebnis erzielt wird. Dazu ist es notwendig, Flächen- und Streckentransporte ganzheitlich zu betrachten. Das Modell muss dafür die Fragestellungen Hub-Auswahl, Verkehrsmittelwahl, Wegfin-

derung in Netzen und Verortung behandeln. Praxisrelevante Rahmenbedingungen, wie Zeitfenster, Kapazitäten und spezifische Preise, werden berücksichtigt.

Die Ergebnisse sind als Open-Source-Modell ausgelegt, so dass jedes interessierte Unternehmen das Modell nachvollziehen und seinen Anforderungen entsprechend anpassen kann. Sowohl Transportunternehmen als auch große Verlagerer können mit diesem Modell Effekte, die durch eine konsequente Bündelung und Verlagerung erreicht werden, identifizieren und bewerten. Des Weiteren kann das Modell eine Unterstützung für die zentrale Betriebsplanung in Transportnetzen sein. Neben großen Logistikkonzernen werden auch Allianzen aus kleinen und mittelständischen Unternehmen in die Lage versetzt, optimierte Transportketten computerunterstützt zu generieren. Um die Validierung des entwickelten Modells zu realisieren, erfolgt die Softwareumsetzung als Demonstrator.

### **3.5 Vorgehensweise**

Mit den zahlreichen Umschlagspunkten von Transportdienstleistern, wie Bahnhöfen, Häfen, Flughäfen oder Transshipment-Punkten für Lkw, sowie den zwischen den Punkten angebotenen Transportrelationen ist ein flächendeckendes Transportnetzwerk gegeben. Ein solches Transportnetzwerk kann in Form eines Graphen dargestellt werden. Um von einem Punkt mit einem solchen Graphen zu einem anderen Punkt zu gelangen, können Verfahren eingesetzt werden, die das Single-Pair-Shortest-Path-Problem lösen. Hiermit können allerdings nur in den Graphen aufgenommene Knoten behandelt werden. In der Praxis ist durch eine beliebig große Anzahl an Versendern und Empfängern eine diskrete Betrachtungsweise nicht möglich.

Um beliebige Punkte miteinander zu verbinden, wird der Betrachtungsbereich für die Optimierung ähnlich aufgeteilt wie bei der tatsächlichen Transportausführung. Im Sammelladungsverkehr wird im Gegensatz zum Ganzladungsverkehr der Transport in der Regel in die Abschnitte Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf unterteilt. Die Verbindungen zwischen Umschlagspunkten sind typisch für Hauptläufe. Vor- und Nachlauf, also die so genannten Sammel- und Verteilfahrten, sind in einem Graphen, wie oben beschrieben, noch nicht abgebildet.

Um den kostengünstigsten Weg von einer beliebigen Quelle zu einer beliebigen Senke zu finden, müssen Quelle und Senke zunächst an das bestehende Transportnetzwerk angeschlossen werden. Dazu werden die Punkte temporär über Kanten mit dem Netzwerk verbunden. Da die Transportkosten von Sammel- und Verteilfahrten in der Praxis verhältnismäßig hoch sind, kann darauf verzichtet werden, Verbindungen der Quelle zu allen möglichen Umschlagspunkten einzurichten. Es ist hinreichend, die umliegenden Knoten mit Quelle und Senke zu verbinden. Die Kantenbewertung kann dabei aus der tatsächlichen Entfernung und einer mengenabhängigen, standortspezifischen Kilometerpauschale abgeleitet werden.

Diese temporären Verbindungen werden nach dem Finden des kürzesten Weges aus dem Transportnetz entfernt, um die Rechenzeit für die Algorithmen zu begrenzen. In Abhängigkeit von der Größe des Transportnetzes müssen so genannte Speedup-Techniken zum Einsatz kommen, um die Rechenzeiten zu verkürzen. Dabei kann beispielsweise nur eine bestimmte Menge an Knoten zugelassen werden, oder der Graph wird hierarchisch gegliedert. Hierbei ist es auch denkbar, vor der Wegsuche kritische Abfahrtszeiten an den einzelnen Knoten festzulegen.

Um Skaleneffekte bei der Planung mehrerer Transportaufträge zu berücksichtigen, werden die Mengen, die gemeinsam über bestimmte Kanten abgewickelt werden können, dokumentiert. Auf diese Weise wird bei den nächsten Aufträgen die zu transportierende Gesamtmenge berücksichtigt. Die zu transportierende Gesamtmenge ist dabei nicht nur preisrelevant, sondern ermöglicht auch eine Überprüfung der Kapazität für die angebotene Relation. Die optimale Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge und Kriterien zur Feststellung der Sendungen, die das Verfahren erneut durchlaufen müssen, werden durch Testläufe ermittelt.

Das Vorgehen gliedert sich in die folgenden elf Arbeitsschritte:

- o Arbeitsschritt 01: Ermittlung der aus verkehrslogistischer Sicht relevanten Ausgangsgrößen sowie der benötigten Eingangsgrößen.
- o Arbeitsschritt 02: Aufsplittung der Problemstellung in Teilbereiche und Definition von Schnittstellen.
- o Arbeitsschritt 03: Stärken-/Schwächenanalyse von Methoden vor dem Hintergrund des Methodennetzwerkes.

- o Arbeitsschritt 04: Zuordnung vorhandener Lösungsansätze sowie Adaption der gewählten Methoden für das Methodennetzwerk.
- o Arbeitsschritt 05: Aufbau eines konsistenten Datenmodells für Modellaufbau und -testung.
- o Arbeitsschritt 06: Abbildung des entwickelten Modells in einer pilothaften Softwareumsetzung.
- o Arbeitsschritt 07: Modellierung des übergeordneten Informationsmanagements zur Integration der Bausteine.
- o Arbeitsschritt 08: Testung der entwickelten Vorgehensweise vor dem Hintergrund realer Transportaufträge.
- o Arbeitsschritt 09: Durchführung einer Potentialanalyse von Praxislösung und Modelllösung.
- o Arbeitsschritt 10: Aufbau einer Internetplattform zur Verbreitung und Erläuterung des Modells.
- o Arbeitsschritt 11: Zusammenfassung der Ergebnisse im Schlussbericht.



## 4 Verkehrslogistik für Stückgüter

Im Rahmen dieser Arbeit werden Stückgüter als Gegenstände definiert, die während des Transportierens, Umschlagens und Lagerns als Einheit behandelt werden können. Während dieser Vorgänge verändert sich ihre Gestalt und Form nicht. Neben festen Körpern unterschiedlicher Abmessungen, wie bspw. Maschinen oder Anlagenteilen, sind hierzu auch Ladeeinheiten, kurz LE, die aus mehreren Kartons oder Kisten bestehen können und auf einem Ladehilfsmittel, kurz LHM, zusammengefasst sind, zu zählen. Schüttgüter, zu denen stückige, körnige und staubförmige Güter zählen, sowie Gase und Flüssigkeiten gehören nur dann zu den Stückgütern, wenn sie sich in Behältnissen befinden. Leere LHM und Verpackungen gehören ebenfalls zu den Stückgütern /PFO-1995/.

Für Stückgüter, die nach Rauminhalt und Gewicht mit den üblichen Fördermitteln, wie bspw. Gabelstaplern, zu transportieren sind, werden in diesem Abschnitt zunächst verkehrslogistische Systeme abgegrenzt, um im Anschluss die Handhabung von Stückgütern in Sammelladungssystemen zu beschreiben.

### 4.1 Abgrenzung der Transportsysteme

Neben einer Unterscheidung des Güterkraftverkehrsgesetzes in gewerblichen Güterkraftverkehr und Werkverkehr, der nur für die eigenen Zwecke eines Unternehmens durchgeführt werden darf, ist hinsichtlich der definierten Planungsaufgabe eine Einteilung der Transportleistungen nach der anteiligen Nutzung der Ladekapazität durch einen Transportauftrag von Interesse. Man unterscheidet die Kategorien Ganzladung, Teilladung und Sammelladung.

#### 4.1.1 Ganzladung

Der Begriff der Ganzladung oder Komplettladung wird sowohl in der Schifffahrt als auch im Schienengüterverkehr und im Straßengüterverkehr genutzt. Charakteristisch ist, dass das zu befördernde Gut das Verkehrsmittel gewichts- oder volumenmäßig nahezu oder sogar vollständig auslastet. Der Transport einer solchen geschlossenen Gütermenge, die als geschlossene Ladung in einem Frachtbrief aufgegeben wird, findet zwischen Versender und Empfänger ohne ein Umladen des Transportgutes

von einem Verkehrsmittel auf ein anderes statt. Im Falle gebrochener Verkehre wird das gesamte Verkehrsmittel oder Transporthilfsmittel, wie etwa ein Container oder Wechselbehälter, umgeschlagen /BAU-1997a/.

## Sendungen

Nr.	Quelle	Senke	TE
1	1	2	10
2	2	3	9
3	2	4	8
4	3	5	9
5	4	5	8
6	4	1	10
7	5	2	10
8	3	1	9

## Fahrzeuge

Kennung	Basis	TE
Rot	1	10
Grün	2	10
Blau	3	10

## Tourenplan

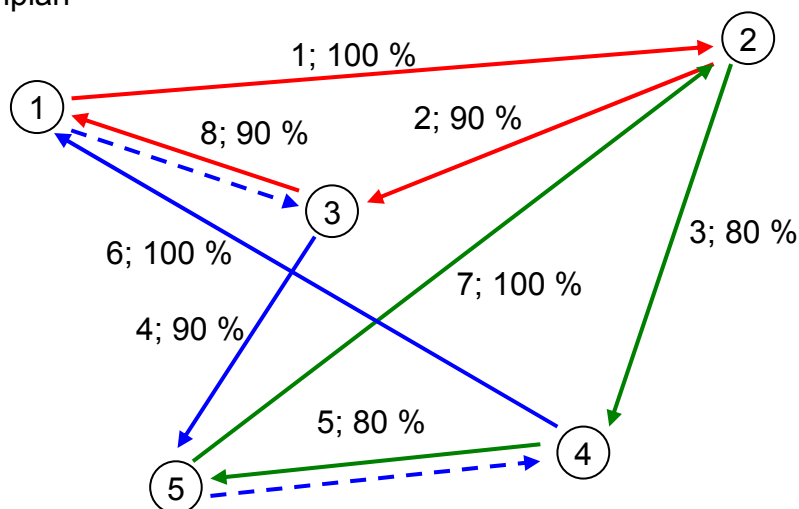


Bild 4.1: Planungsaufgabe des Ganzladungsverkehrs

Bezogen auf die Abläufe bei der Durchführung von Ladungsverkehren wird deutlich, dass durch die direkten Verkehre eine verhältnismäßig einfache Disposition der Verkehrsmittel gegeben ist. Die geringe Anzahl von Lade- und Abladestellen macht eine Tourenplanung im engeren Sinne überflüssig /EIK-1998/.

Als Planungsaufgaben bleiben allerdings die Zuordnung von Verkehrsmitteln und Fahrern zu Transportaufträgen, die bestmögliche Verknüpfung von Verkehren zu

Rundläufen bzw. der sinnvolle Einsatz von Begegnungsverkehren oder Wechselfahrern. Im dargestellten Beispiel (Bild 4.1) stellen die Farben Rundläufe von drei Verkehrsmitteln mit definierten Transportkapazitäten dar. Die Zahlen an den Pfeilen repräsentieren dabei die Nummer der Sendung und die genutzte Kapazität der Verkehrsmittel. Für die folgenden einfachen Beispiele wird die dimensionslose Größe Transporteinheit, kurz TE, eingeführt. Die genutzte Kapazität ergibt sich aus dem Verhältnis von Sendungsmenge in TE und Verkehrsmittelkapazität in TE.

### 4.1.2 Teilladung

Die Beförderung von Sendungen im Straßengüterverkehr und im Schienengüterverkehr, die aufgrund ihrer Größe nicht umgeschlagen werden sollen, gleichzeitig aber das Verkehrsmittel nicht vollständig auslasten, wird als Teilladungsverkehr bezeichnet. Um eine wirtschaftliche Beförderung durchführen zu können, werden diese Teilladungen mit anderen Teilladungen oder ggf. Sammelladungen zusammen befördert. Das wesentliche Kennzeichen des Teilladungsverkehrs ist, dass die Teilladungen ohne Umladen befördert werden. Abholung und Zustellung erfolgen mit dem Verkehrsmittel für den Hauptlauf, was dazu führt, dass die personalintensiven Be- und Entladevorgänge an einem Depot entfallen /BAU-1997b/.

Heimes nennt als Kriterium der Teilladung die Herkunft der Teilsendungen von mindestens drei Versendern mit dem Ziel von mindestens drei Empfängern. Dabei darf das Gewicht der Sendungen eines Versenders höchstens 80 % des Gesamtgewichtes der Sendungen und höchstens 8 t betragen /HEI-1983/.

Wie bei den Ladungsverkehren können auch bei den Teilladungsverkehren mittelständische Frachtführer und Speditionen konkurrenzfähig agieren, da ein flächendeckendes Netzwerk von Depots und Hubs nicht notwendig ist. Allerdings hat das Sendungsaufkommen im Verhältnis zum Operationsgebiet einen wesentlichen Einfluss auf die Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Leistungserbringung. Die Bedeutung einer computergestützten Tourenplanung ist groß, da erst durch die optimale Verknüpfung einzelner Sendungen zu Rundläufen ein effizienter Ressourceneinsatz möglich wird.

Im dargestellten Beispiel wird der Sendungspool auf zwei Teilladungsverkehre verteilt, die als sogenannte Pick-up-and-Delivery-Touren durchgeführt werden (Bild 4.2).

In diesem Fall werden an den Pfeilen die Nummern von bis zu drei Sendungen aufgeführt, sowie die Summe der in Anspruch genommenen Verkehrsmittelkapazität.

Sendungen

Nr.	Quelle	Senke	TE
1	1	2	5
2	2	3	4
3	1	3	5
4	5	3	3
5	3	2	3
6	4	3	5
7	5	2	2
8	2	4	4

Fahrzeuge

Kennung	Basis	TE
Rot	1	10
Grün	2	10

Tourenplan

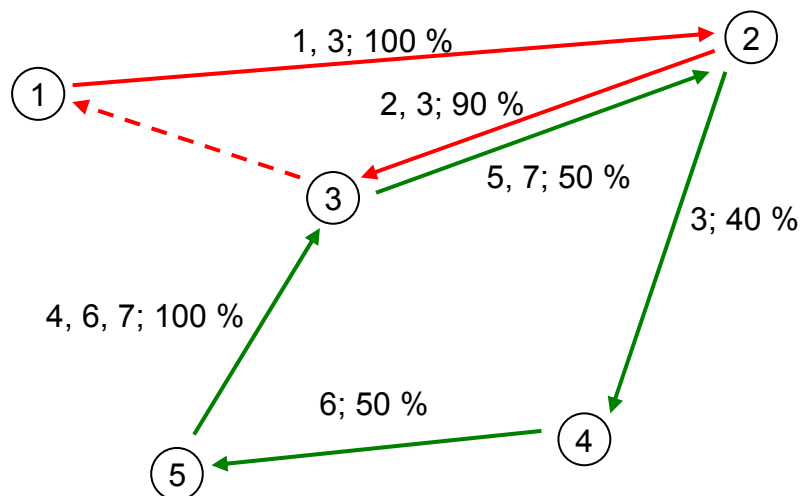


Bild 4.2: Planungsaufgabe des Teilladungsverkehrs

### 4.1.3 Sammelladung

Weder in der Literatur noch bei den Speditionen und Transportunternehmen lässt sich eine einheitliche Bezeichnung für Ladungen finden, die kleiner als eine Komplettladung sind und standardmäßig umgeschlagen werden. Für den englischen Begriff Less-Than-Truckload, kurz LTL, werden im Deutschen, je nach Geschäftsausrichtung des Spediteurs, die Synonyme „Stückgut“ und „Sammelgut“ verwendet. Bezogen auf das System zur Leistungserbringung werden Begriffe wie

Stückgutverkehr, Sammelgutverkehr, Systemverkehr und Sammelladungsverkehr genutzt. Dabei ist insbesondere die Nutzung der Begriffe „Stückgut“ und „Stückgutverkehr“ im logistischen Gesamtkontext aufgrund der bereits aufgeführten Definition für Stückgut nicht eindeutig.

In der Literatur sind unterschiedliche Einteilungen von Stückgütern für Sammelladungsverkehre zu finden. In der deutschen Literatur reichen die Angaben zur Untergrenze für Sendungen in Sammelladungsverkehren von 30 kg bis 50 kg. Bis 20 kg Einzelgewicht sind Pakete im Postgesetz definiert. Daran schließt sich noch eine Bandbreite an, die sonstige KEP-Dienste mit abdecken. Die Obergrenzen für KEP-Dienste liegen zum einen in den Grenzen der Automatisierung, wie beispielsweise durch Sortieranlagen, zum anderen in der Zustellung. So werden auch Pakete mit einem Gewicht von weniger 30 kg durch Speditionen zugestellt. Teilweise geschieht dies auch dann, wenn KEP-konforme Abmessungen vorliegen. Der Grund für die Abwicklung über ein Sammelgutnetz ist dann meist der Wunsch des Versenders alle Warenausgänge über das gleiche System abzuwickeln.

Kritischer als die Untergrenzen sind für die Planung allerdings die Obergrenzen, die sich in einem Bereich von 1.500 kg bis über 3.000 kg bewegen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Obergrenzen nicht durch Gesetze o. ä. geregelt sind. Ein Blick auf die derzeitige betriebliche Praxis von Spediteuren zeigt, dass ab einer Sendungsgröße von mehr als 3.000 kg aufgrund des hohen Aufwandes beim Umschlag nur in Ausnahmefällen ein Sammelladungsnetzwerk genutzt wird.

Die Wahl eines Teil- oder eines Sammelladungsverkehrs sollte in jedem Fall ausschließlich von wirtschaftlichen Überlegungen abhängen. Bei einer Verschiebung des Verhältnisses von Transport- und Umschlagskosten kommt es zwangsläufig zu einer Verschiebung der Wirtschaftlichkeit dieser beiden Systeme. Wird diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht für das Gesamtnetzwerk, sondern für einzelne Relationen vorgenommen, kann es sogar zwischen den Relationen zu deutlich unterschiedlichen Grenzwerten kommen. Ein weiterer Aspekt, der diese willkürlich vorgenommene Einteilung als nicht zweckmäßig erscheinen lässt, ist die unzureichende Beschreibung der Kapazitätsnutzung durch das Gewicht. Mit den Sendungsmaßen ist ein weiterer wesentlicher Entscheidungsfaktor vorhanden.

Sammelladungsverkehre sind dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Sendungen durch einen Spediteur gebündelt werden, um sie einem Frachtführer für den Hauptlauf geschlossen zu übergeben. Hierbei entstehen im Hauptlauf Größenvorteile, indem großräumige Verkehrsmittel eingesetzt werden, die so den längsten Streckenabschnitt des Transportweges effizient ausgelastet bewältigen. Die betriebswirtschaftliche Grundlage liegt in der preislichen Differenzierung zwischen Sammelgut- und Ladungsfracht. Im Normalfall besteht der Sammelladungsverkehr aus einer dreigliedrigen Transportkette mit Vor-, Haupt- und Nachlauf und ist damit zweifach gebrochen. Während im Vor- und Nachlauf ausschließlich straßengebundene Verkehrsmittel eingesetzt werden, können für den Hauptlauf je nach Art des Gutes auch Flugzeuge, Schiffe oder Schienenfahrzeuge eingesetzt werden. In Systemen, die nach dem Prinzip H&S arbeiten, wird der direkte Verkehr im Hauptlauf durch ein- oder mehrfach gebrochene Verkehre ersetzt /LOR-2001/, /BAU-1997c/.

Durch die Trennung der einzelnen Transportstrecken und die damit verbundenen Umladeprozesse muss die zu transportierende Ladung bestimmten Anforderungen genügen. Damit eine LE von einem Flurförderzeug effizient aufzunehmen und zu transportieren ist, sind definierte Abmessungen bzw. maximale Gewichte der Packstücke einzuhalten. Darüber hinaus werden Stückgüter unter Zuhilfenahme von LHM meist auf Paletten oder in Gitterboxen transportiert. Neben der Vereinfachung der Handhabung sollte eine geeignete Verpackungsart gegen äußere Einflüsse schützen, die während des Transportes und der Umladung wirken.

Für ein flächendeckendes Angebot werden die verschiedenen Regionen für den Vor- und den Nachlauf in einzelne Tourengebiete unterteilt, die die Verkehrsmittel im Nahverkehr abfahren. Dabei werden Vor- und Nachläufe in einer so genannten Pick-up-and-Delivery-Tour miteinander verbunden, bei der typischerweise der Anteil Verteilungen im Tagesverlauf abnimmt und der Anteil Sammlungen zunimmt.

Sendungen

Fahrzeuge

Nr.	Quelle	Senke	TE	Nr.	Quelle	Senke	TE	Kennung	TE
1	1	12	4	9	6	14	3	Rot	10
2	2	10	4	10	1	15	2	Grün	10
3	7	3	3	11	2	14	3	Blau	10
4	8	15	2	12	9	15	3	Gelb	10
5	1	14	1	13	6	3	4	Braun	10
6	13	10	1	14	8	16	2	Schwarz	5
7	13	3	2	15	4	14	1		
8	7	15	2	16	5	11	3		

Tourenplan

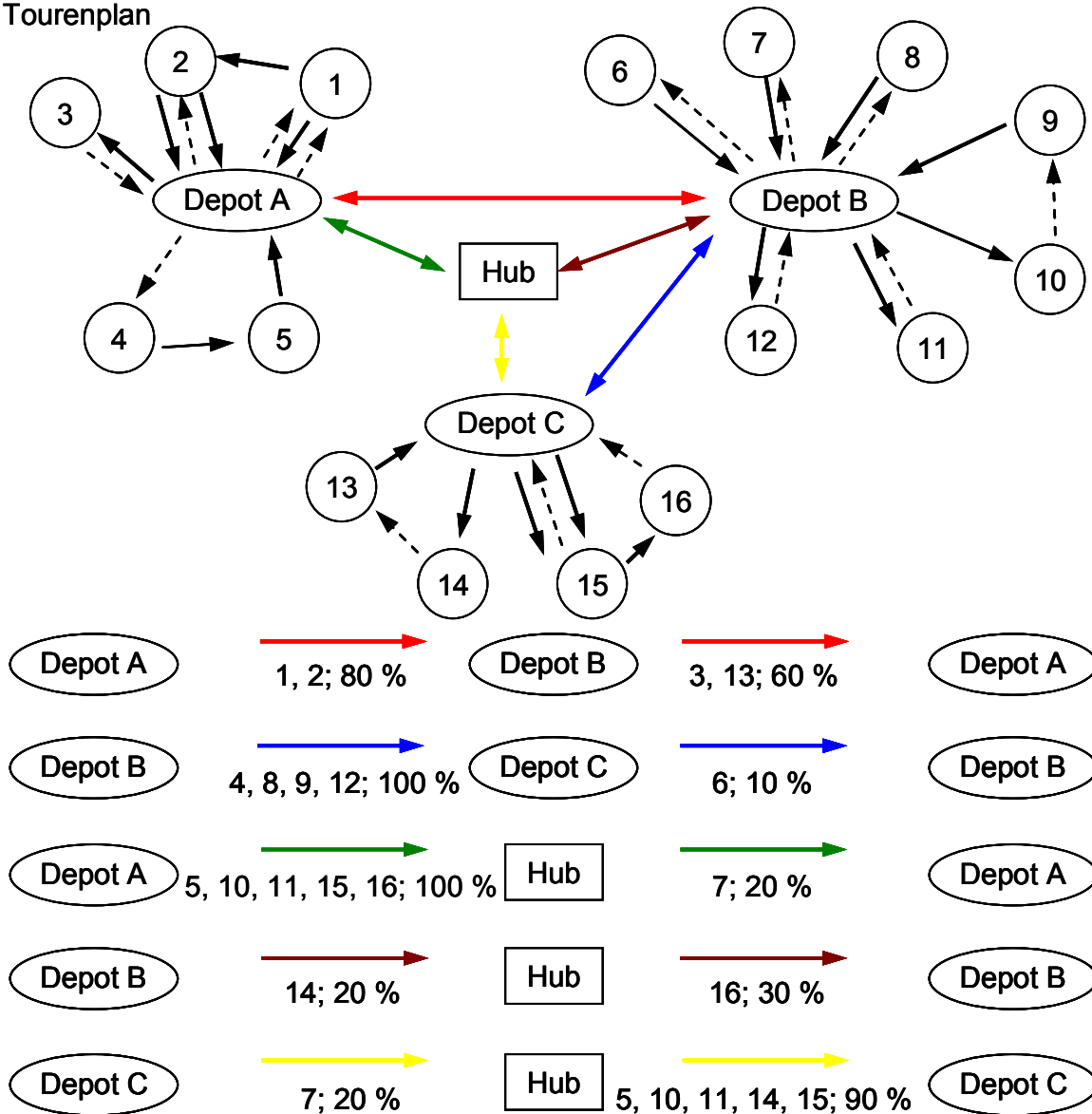


Bild 4.3: Planungsaufgabe des Sammelladungsverkehrs

Die im Beispiel dargestellten Hauptläufe werden entweder als Direktverkehre oder Hubverkehre ausgeführt (Bild 4.3). Die Motivation für die Hubverkehre ist dabei in der Regel in einer zu geringen Transportmenge zwischen zwei Depots begründet /VAH-2007a/. Weiterhin können über das Hub Überhangmengen abgewickelt werden. Während die Direktverkehre in Abhängigkeit von der Entfernung als Rundläufe, Pendel- oder Begegnungsverkehre ausgeführt sein können, muss für die Hubverkehre eine möglichst frühe Anlieferung an den Hub und ein möglichst später Weitertransport zu den Depots realisiert werden. Im nationalen Transport in Deutschland kann auf Begegnungsverkehre bei geographisch zentraler Lage des Hubs verzichtet werden.

Über den Fernverkehr hinaus sind beim Sammelladungsverkehr auch die Pick-up-and-Delivery-Touren zu planen. Mit der Lage und Ausrüstung der Depots und Hubs kommen im Rahmen der strategischen Planung weitere Planungsaufgaben hinzu.

## **4.2 Betriebliche Praxis des Sammelladungsverkehrs**

Für den Sammelladungsverkehr in Deutschland hat sich als marktübliches Ziel die Realisierung einer Haus-zu-Haus-Beförderung innerhalb von 24 Stunden etabliert. Die Standardorganisationsform zur Durchführung ist eine dreigliedrige Transportkette, deren Transporte über Umschlagsvorgänge beim Versand- und beim Empfangsspediteur verknüpft werden /LUB-1998/.

Um einen solchen Service mit einer hohen Zuverlässigkeit anbieten zu können, wird die erforderliche Organisation einer dreigliedrigen Transportkette lediglich durch einfache H&S-Systeme durchbrochen. Das bedeutet, dass für den nationalen Transport einfache Strukturen bestehen, bei denen Transporte im Hauptlauf entweder aus direkten Verkehren zwischen den Versand- und Empfangsspediteuren bestehen oder in Form einfach gebrochener Verkehre durchgeführt werden. Im zweiten Fall findet ein zusätzlicher Umschlag über einen zentralen Hub statt. Dies kommt in erster Linie dann zum Tragen, wenn das Transportvolumen auf einzelnen Relationen Direktverkehre nicht rechtfertigt /OST-1999/.



### 4.2.1 Planungsaufgaben

Langfristig muss die Anzahl und Lage der Depots und Hubs bestimmt werden. Zur Gestaltung der Umschlagspunkte gehört die Dimensionierung in Bezug auf Hof- und Umschlagsflächen sowie der Anzahl an Verladetoren. Darüber hinaus müssen die Materialflüsse in den Umschlagspunkten gestaltet werden. Auch die Entscheidung zur Flottengröße ist aufgrund der Kapitalbindung und der Beschaffungszeiten als langfristig anzusehen. Bei der Technikauswahl gilt es vor allem, die Vor- bzw. Nachteile von beispielsweise Gliederzügen, Sattelzügen und Trägerfahrzeugen für Wechselbehälter gegeneinander abzuwägen. Während im internationalen Fernverkehr schwerpunktmäßig Sattelzüge zum Einsatz kommen, haben sich insbesondere im nationalen Sammelladungsverkehr auch Wechselbehälter, die mittlerweile auch in „Jumbo“ oder „Mega“ Ausführung, also mit erhöhtem lichten Innenmaß und in verschiedenen Längen, zur Verfügung stehen, etabliert. Der Nachteil einer fehlenden Durchladbarkeit gegenüber den Sattelaufliegern wird vor allem durch die Entkopplung von Transporthilfsmittel und Verkehrsmittel beim Verladen und bei Begegnungsverkehren kompensiert.

Im Rahmen des so genannten Service-Network-Design-Problems, kurz SNDP, muss die Transportdurchführung der Hauptläufe mittelfristig determiniert werden. Neben einem definierten Service Level bestimmen vor allem erwartete Transportvolumina zwischen den Depots die Struktur der optimalen Linienverkehre. Relationen, die aufgrund des Sendungsaufkommens keine wirtschaftliche und zugleich servicegerechte Einrichtung eines Linienverkehrs gestatten, können als Mitnahmeverkehre gestaltet werden oder werden über Hubverkehre abgewickelt.

Bei der Planung der eigentlichen Transportdurchführung ist die erste Entscheidung, ob die Transportanfrage eines Versenders angenommen werden soll. Für jede akzeptierte Kundenanfrage müssen anschließend die Aufgaben des Sammelns, des Streckentransportes und des Verteilens geplant werden /SCH-2005/. In den Fällen, in denen Rahmenvereinbarungen zwischen Spediteur und Versender bestehen, wird über die Annahme eines Transportauftrages nicht mehr entschieden. Das üblicher Weise regelmäßige und große Sendungsaufkommen dieser Kunden wird in jedem Fall abgewickelt.

Jede Sendung wird den Depots für das Sammeln und das Verteilen zugeordnet. Diese Zuordnung ist fix und resultiert aus der Festlegung der Depots eines Netzwerkes, deren nicht überlappende Einzugsgebiete bspw. über Postleitzahlen festgelegt sind /GRA-1998/. Diese Zuordnung erleichtert zugleich die Planung des Hauptlaufes im Linienverkehr, auf den die jeweilige Sendung gebucht werden muss. Der theoretische Ansatz dieser Problemzerlegung ist schon früh bei Leung zu finden /LEU-1988/.

Im Hauptlauf muss der Disponent vor allem dann korrigierend eingreifen, wenn Kapazitäten ausgelastet sind und somit eine planmäßige Durchführung einer Sendung nicht möglich ist. In diesem Fall muss der Disponent abwägen, ob Sendungen auf eine spätere Abfahrt verschoben werden können, oder ob zusätzliche Kapazitäten eingesetzt werden müssen. Die Verschiebbarkeit von Sendungen auf eine spätere Abfahrt ist dabei im Regelfall nur dann möglich, wenn der angebotene bzw. vom Kunden bestellte Service dies zulässt. Ein weiterer Faktor, der im Ermessen des Disponenten liegt, ist die Zumutbarkeit einer Verzögerung im Hinblick auf den einzelnen Kunden.

Zusätzliche Kapazitäten für eine Relation können theoretisch aus eigenen Verkehrsmitteln bestehen, müssen aber in der Regel am Markt eingekauft werden, da aus wirtschaftlichen Gründen keine Leerkapazitäten vorgehalten werden können. In einem H&S-System kann bei einem ausgelasteten Direktverkehr ggf. ein Bypass über einen zentralen oder regionalen Hub genutzt werden.

Die Vor- bzw. Nachläufe werden heute auch mit der Unterstützung von Tourenplanungssystemen geplant. Die verfügbaren Systeme sind dabei in der Lage, Touren für heterogene Fahrzeugflotten unter Berücksichtigung von Zeitfensterrestriktionen der Versender und Empfänger zu generieren.

Auch wenn die zur Planung notwendigen Sendungsinformationen beim Versender im Regelfall frühzeitig und oftmals sogar in digitaler Form vorhanden sind, stehen diese Informationen den Spediteuren zur Planung meistens nicht zur Verfügung. Findet bspw. bei großen Kunden die Avisierung der Sendungen per EDI statt, so erfolgt dies oftmals erst während der Abholung beim Versender. Insbesondere Versender mit geringem Sendungsaufkommen sind mit ihren Systemen häufig nicht an die Dienstleister angeschlossen, so dass Papier noch die Standardschnittstelle darstellt.

Der Depotbetrieb in Sammelladungsnetzwerken bedarf weiterer Planungsaufgaben. Hier sind vor allem die Torbelegung und die Personaleinsatzplanung zu nennen. Vor eine besondere Herausforderung wird die Planung des Umschlages am Depot, vor allem vor dem Hintergrund der systembedingten Stoßzeiten am frühen Morgen und späten Nachmittag, gestellt.

Die Strukturen im Sammelladungsverkehr in den USA weichen von den für Deutschland beschriebenen Strukturen ab. Aufgrund der wesentlich größeren Transportentfernungen haben sich in den USA Strukturen gebildet, die neben den Direktverkehren nicht nur einfach, sondern auch mehrfach gebrochene Hauptläufe, im Regelfall mit zwei so genannten „Breakbulk-Terminals“, beinhalten. Sowohl für den Fall Deutschland als auch für den Fall USA gilt allerdings, dass die Transportdurchführung für die Hauptläufe im Rahmen der mittelfristigen Planung festgelegt wird und somit für die operative Planung nur zu einem geringen Aufwand führt.

#### **4.2.2 Transportdurchführung**

Für das Sammeln und Verteilen werden den Gebieten einzelne Touren zugeteilt, die Verkehrsmittel im Nahverkehr, dazu zählen Entfernungen unter 100 km, durchführen. Während Sammelgutspeditionen für den Streckenverkehr oftmals einen eigenen Fuhrpark vorhalten, werden Sammel- und Verteiltouren in der Regel von Subunternehmen übernommen. Oftmals handelt es sich hierbei um Unternehmen mit drei bis zehn Fahrzeugen, die für die komplette Leistungserbringung von der Tourenplanung über den Transport bis zur Verladung beim Kunden und am Depot verantwortlich sind. Die Hauptläufe werden in der Nacht durchgeführt, so dass die Fernverkehr-Lkw tagsüber zusätzlich zur Disposition im Nahverkehr für Sammel- und Verteilungsaufgaben zur Verfügung stehen bzw. für Ganz- oder Teilladungsverkehre eingesetzt werden.

Ein Hauptlauf kann, je nach Gestaltung des Netzes, z. B. bei H&S-Systemen, nochmals unterteilt sein. In den Schnittpunkten zwischen den einzelnen Transportstrecken findet stets ein Umladen mit Sortiervorgang statt, bei dem das Sammelgut von einem Verkehrsmittel durch eine Halle hindurch auf ein anderes Verkehrsmittel entsprechend der vorgesehenen Zielrelation verladen wird.

Zur Durchführung der Streckenverkehre kommen einfache Pendelverkehre zwischen den Depots und Hubs zum Einsatz. Weiterhin werden Relationen zu Umläufen bzw. zu Mitnahmeverkehren zusammengesetzt (Bild 4.4). Das Ziel ist es, unter Gewährleistung des Servicelevels einen möglichst geringen Leerfahrtanteil zu realisieren. Für diese Planungsaufgabe kommen die Lenk- und Ruhezeiten in Deutschland bzw. in Europa hinzu. Unter Einhaltung dieser Zeiten soll in der Regel für alle Relationen gleichermaßen erreicht werden, dass die Fahrer am Schichtende wieder am Ausgangsort ankommen.

Um sicherzustellen, dass die Fahrer am Ende der Schicht wieder zurück am Ausgangsort sind, werden in Lkw-Sammelladungsnetzen oftmals Begegnungsverkehre mit Wechselbehältern eingerichtet (Bild 4.4). So treffen sich die beiden Fahrzeuge zweier Depots auf der Hälfte der Strecke, laden dort ihre Sendungen um, bzw. tauschen im Idealfall nur Transporthilfsmittel in Form der Wechselbehälter, und fahren anschließend jeweils wieder zu ihrem Ausgangsdepot zurück /BUG-1999/.

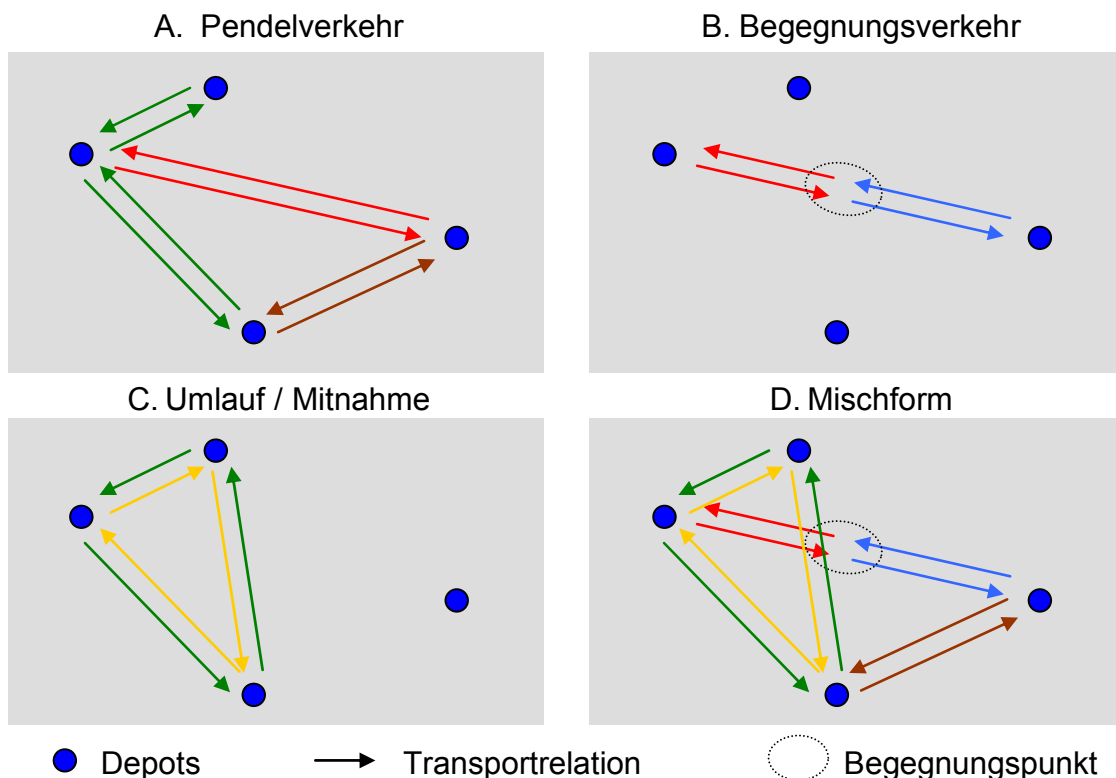


Bild 4.4: Alternativen der Transportdurchführung

Für das Be- und Entladen an den Depots und Hubs und für die Materialflüsse in diesen Umschlagsanlagen kommen in der Regel Flurförderzeuge zum Einsatz. Die Spanne reicht von Handgabelhubwagen über Elektrodeichselgeräte mit und ohne

Fahrerplattform bis hin zu Gegengewichtsstaplern. Die LE werden zunächst vom Fahrzeug einzeln entladen und gescannt. Mit der Scannung wird dem Mitarbeiter das Ausgangstor mitgeteilt. Für den Fall, dass ein vollständig manueller Materialfluss realisiert wird, werden die LE mit dem Flurförderzeug direkt am Ausgangstor bereitgestellt. Bei der Verladung auf das abgehende Verkehrsmittel findet ein abschließendes Scannen statt.

Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen und Ausführungen der transportierten LE, der fallweisen Stapelung von LE sowie der teilweise schlechten Palettenqualität ist eine Automatisierung der Be- und Entladevorgänge auch in näherer Zukunft nicht realisierbar. Die für diesen Einsatzfall notwendigen Anforderungen, die bspw. an Fahrerlose Transportsysteme, kurz FTS, zu stellen sind, sind nur mit erheblichen Investitionen realisierbar. Damit ist hier ein wirtschaftliches Einsatzgebiet für FTS noch nicht gegeben. Hinzu kommt, dass in Depots über die Schichten kein gleichverteiltes Transportaufkommen gegeben ist, bei dem automatische Fördersysteme am wirtschaftlichsten arbeiten können. In den Stoßzeiten wird stattdessen mit größerem Personaleinsatz und günstigen manuellen Geräten gearbeitet. Für den Materialfluss werden teilweise bereits stetige Fördertechniken, wie Unterflurschleppkettenförderer, eingesetzt.

Bei Unterflurschleppkettenförderern werden in der Umschlagshalle ein oder mehrere Transportkreise eingerichtet, bei denen in einer Bodeninstallation Ketten umlaufen. In diese Ketten können Handgabelhubwagen am Entladetor manuell eingeklinkt und nach einer Identifikation meist mit Handscannern am Ausgangstor wieder manuell ausgeklinkt werden. Auf diese Weise kann in der Umschlagsanlage das Kreuzen von Flurförderzeugen reduziert werden, was zu einer wesentlichen Beruhigung des Materialflusses führt. Leistungsspitzen lassen sich über diese Systeme jedoch nicht abfangen.

### **4.2.3 Systembedingte Optimierungspotentiale**

Eine Reihe von Standardisierungen haben viele Transportnetze überhaupt erst möglich gemacht. Ohne die Verbreitung des ISO-Containers /DIN-1999/, /ISO-1998/, wäre die effiziente Abwicklung von Sammelladungen im Seeverkehr überhaupt nicht möglich. Durch den Seetransport werden hohe Schutzanforderungen an die Verpa-

ckung von Gütern gestellt. Den Schutz der Güter übernehmen Container. Außerdem senkt die Verwendung von Standardcontainern durch einen vereinfachten Umschlag an den vielen Schnittstellen im Seeverkehr die Kosten.

In den Sammelladungsnetzen der Speditionen haben sich standardisierte Wechselbehälter durchgesetzt, die mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln transportiert werden können. Wechselbehälter sind modifizierte Lkw-Aufbauten /DIN-2007/, die bei Bedarf auf ausklappbare Stützen gestellt werden können, und somit ohne Umschlagstechnik vom Verkehrsmittel bzw. vom Anhänger getrennt werden können /DIN-1977/. Lkw für den Einsatz von Wechselbehältern benötigen luftgefederte Achsen. Sie haben im nicht kombinierten Verkehr aufgrund des Eigengewichtes des Wechselbehälters eine reduzierte Zuladung. Diese Tatsachen führen zu einer Erhöhung der Betriebskosten, die aber durch die zeitliche Entkoppelung des Verkehrsmittels von Beladevorgängen überkompensiert werden kann. Müssen bspw. bei einem Großkunden mehrere Stückgutsendungen gleichzeitig abgeholt werden, wird in der Praxis ein kompletter Wechselbehälter zum Beladen zur Verfügung gestellt.

Die starke Verbreitung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Verbindung mit standardisierten Datenaustauschformaten, wie beispielsweise Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport, kurz EDIFACT, mit seinen Subsets, ermöglicht einen effizienten Informationsfluss zwischen Versendern, Spediteuren und Frachtführern. Dabei wird durch den elektronischen Datenaustausch die bei papier- oder sprachgebundenen Medien notwendige Mehrfacheingabe von Daten vermieden. Neben einer deutlichen Reduzierung des Erfassungsaufwandes sinkt damit auch die Fehlerquote deutlich.

Standardisierte Nummernsysteme, wie bspw. die Nummer der Versandeinheit, kurz NVE, oder der EAN 128 sowie deren Codierung in maschinenlesbaren Strichcodes ermöglichen in Verbindung mit der elektronischen Sendungsavisierung einen durchgängigen Informationsfluss und eine sichere Steuerung des Warenflusses. Insbesondere in den automatisierten Depots der KEP-Dienste könnte auch der Einsatz von Transponderetiketten eine interessante Alternative darstellen.

Teilladungen werden vorteilhaft in den Sammelladungsverkehr mit eingebunden, aber aufgrund ihrer Größe nicht in Depots umgeladen. Die freien Kapazitäten können mit Sammelladungen aufgefüllt werden, dabei dienen die Depots als Versender und

Empfänger von Teilladungen, die aus einzelnen Sendungen konsolidiert werden. Hieraus ergibt sich der Vorteil, dass die Teilladung als Basis für eine Direktverbindung zwischen zwei Depots dienen kann.

Erfolgt die Durchführung eines Transportes über mehrere Verkehrsträger ohne Wechsel des Transporthilfsmittels, so handelt es sich um einen multimodalen Transport. In Deutschland ist der sog. kombinierte Verkehr, bspw. angeboten durch die DB Schenker Logistics und DB Schenker Rail als Bahndienstleister, das typische Beispiel für die Ausnutzung der jeweiligen verkehrsträgerspezifischen Vorteile. Bei der Bahn sind dies die niedrigen Kosten auf Langstrecken durch Bündelung großer Mengen und beim Lkw die Flächendeckung im Nahverkehr.

Möglich wird die Kombination durch standardisierte Transporthilfsmittel, wie Container, Wechselbehälter und Sattelaufleger, damit ein Umschlag kostengünstig und mit geringer Dauer erfolgen kann. Zur Entlastung des Straßenverkehrsnetzes wird von Umweltverbänden und Politikern eine verstärkte Verlagerung der Langstrecken auf die Schiene oder auch das Binnenschiff gefordert, während die Verwendung des Straßenverkehrs wegen seiner Flächigkeit im Nahverkehr unverzichtbar bleibt.

Die Verkehrsträgerwahl im Hauptlauf beinhaltet einen Trade-Off zwischen hoher Netzqualität in Form von Geschwindigkeit und niedrigen Netzkosten. Bei der Planung kann eine Anordnung der Verkehrsträger mit steigender Geschwindigkeit und damit auch steigenden Kosten angewendet werden. Gelingt eine Durchführung des Transportes mit dem kostengünstigsten Verkehrsträger nicht innerhalb des geforderten Zeitfensters, wird der Hauptlauf wiederholend mit dem jeweils nächstschnelleren Verkehrsträger berechnet, bis das Ergebnis den Zeitanforderungen genügt.

Es muss allerdings sichergestellt sein, dass die jeweiligen Verkehrsträger auch zur Verfügung stehen. Oftmals sind Abfahrtszeiten der Verkehrsträger extern vorgegeben, wie es bei Bahn und Flugzeug der Fall ist. Dadurch erreichen diese das Ziel nicht unbedingt früher als vergleichsweise langsamere, aber dafür flexiblere Verkehrsträger. Darüber hinaus spielt die Erreichbarkeit eine Rolle. Auf Grund der Infrastruktur kann nicht jeder Verkehrsträger jedes Depot bzw. jeden Zielpunkt direkt anfahren.

## 5 Netze in der Verkehrslogistik

In diesem Kapitel werden Transportnetze betrachtet, um die für die Leistungserbringung von Systemverkehren zu Grunde liegenden Strukturen zu erläutern. Dazu werden zunächst Begriffe und grundlegende Netzwerktypen definiert. Anschließend werden einige Transportnetze aus der Praxis vorgestellt. Die erkennbaren Gemeinsamkeiten und Unterschiede dienen auch dazu, die Relevanz von Optimierungsansätzen für Systemverkehre zu unterstreichen. Am Ende des Kapitels wird kurz auf die formale Abbildung von Transportnetzen eingegangen.

### 5.1 Begriffsdefinitionen

Ein Depot, teilweise auch mit dem englischen Begriff „Terminal“ oder „End of Line Terminal“ bezeichnet, dient zum Umladen und Sortieren von Sendungen. Eine Lagerung von Gütern findet nur in Ausnahmefällen und dann lediglich über einen kurzen Zeitraum statt. In einem Depot werden durch den Nahverkehr eingesammelte Sendungen aus der umliegenden Region für den anschließenden Weitertransport zusammengefasst und mit dem Fernverkehr weitergeleitet. In umgekehrter Richtung werden die von anderen Depots erhaltenen Sendungen zur Auslieferung auf Nahverkehrs-Lkw verteilt. Die Depots bilden somit die Quellen und Senken des Streckentransportes.

Ein Hub ist der verbindende Knoten zwischen mehreren Depots. Eine Verteilung auf Fahrzeuge des Nahverkehrs ist nur bei einer Doppelfunktion mit direkt angeschlossenen Depot vorgesehen. Ein Lager zur Vorratshaltung von Waren und Gütern und weitere Einrichtungen für bspw. Kommissionieraufgaben können einem Depot angeschlossen sein. In reinen Transportnetzen haben derartige Zusatzdienstleistungen allerdings keine Relevanz. Mit Ausnahme einer kurzfristigen Pufferung arbeiten Depots und Hubs grundsätzlich bestandslos.

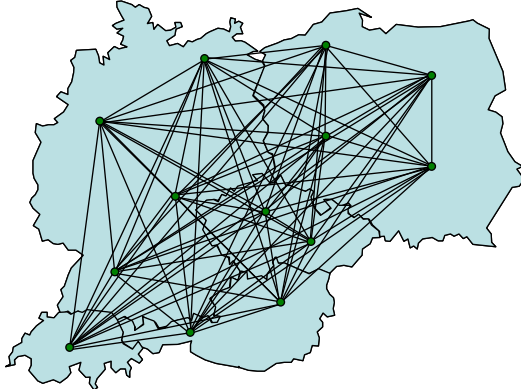
### 5.2 Netzwerktypen

Wie die Gestaltung eines Netzes ausfällt, hängt von der Anzahl direkter Verbindungen zwischen den angeschlossenen Depots ab. Ein Direktverkehrsnetz verbindet alle Depots ohne Umladevorgänge miteinander, wodurch eine hohe Qualität bereitgestellt

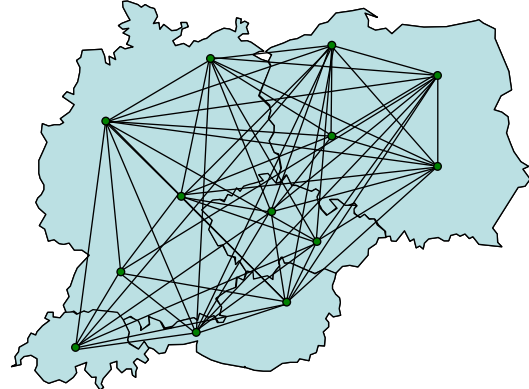


wird. Ein solches Direktverkehrsnetz ist aufgrund der Vielzahl von Kombinationen allerdings auch mit hohen Kosten verbunden und lohnt sich nur bei einem hohen Ladungsaufkommen auf allen Verbindungen und einer daraus resultierend effizienten Auslastung aller Kanten.

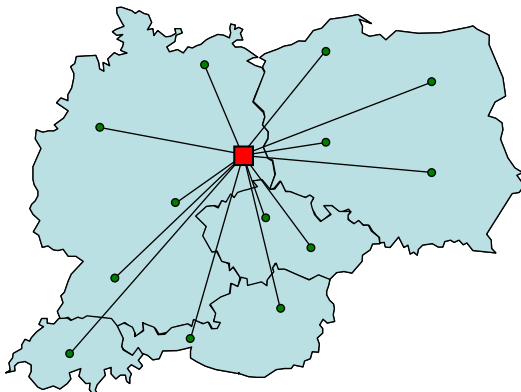
Direktverkehrsnetz



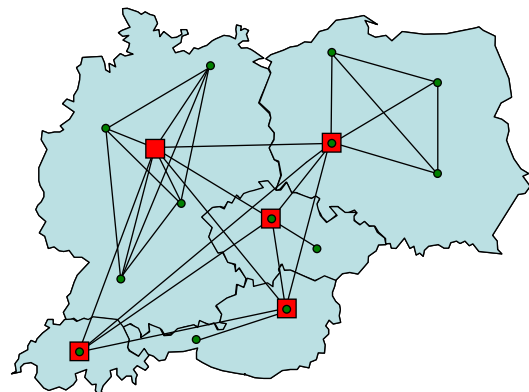
Rasternetz



Hub&amp;Spoke-Netz



Gatenetz



• Depot

■ Hub bzw. Gate

■ Depot mit Hubfunktion

Bild 5.1: Netzwerktypen für die Verkehrslogistik

Wird ein Direktverkehrsnetz um ineffiziente Verbindungen ausgedünnt, spricht man von einem Rasternetz. Ziel eines Rasternetzes ist es, Auslastungsgrad und Servicelevel in wirtschaftlichen Einklang zu bringen. Mangels Direktverbindung erfolgt in einigen Fällen ein gebrochener Transport zwischen Quelle und Senke über mehrere Kanten und Knoten. Wird der Transportfluss dabei durch einen Umladevorgang in den Depots unterbrochen, spricht man von einem mehrstufigen Transportnetz.

Ohne Direktverbindungen kommt das reine H&S-Netz aus. Dieses System wird in bildlicher Anlehnung an ein Wagenrad im Deutschen auch als Nabe-Speiche-System bezeichnet. Den räumlichen Mittelpunkt dieses radialen Verkehrsnetzes stellt ein

zentraler Knoten, das Hub, das, der sternförmig mit den übrigen Knoten, den Depots, durch Kanten, engl. Spoke, verbunden ist. In Warentransportnetzen bildet das Hub den zentralen Umschlagspunkt für alle konsolidierten Sendungen aus den Versanddepots und leitet die Güter an die Empfangsdepots weiter. Entscheidend ist die zeitliche Synchronisation der Ankunfts- und Abfahrzeiten am Hub, damit Güter von allen Relationen bereits eingetroffen und sortiert sind, sobald das erste Fahrzeug das Hub in Richtung Zieldepot wieder verlässt. In reinen H&S-Netzen finden keine Direktverkehre zwischen den einzelnen Depots statt. Die Verwendung eines einzelnen Hubs, dem sog. Single-Hub, bildet ein zweistufiges Transportnetz.

Die logische Erweiterung des Single-Hub Prinzips ist ein mehrstufiges Multi-Hub-Netz, bei dem mehrere Hubs miteinander verbunden sind und in Wechselbeziehung zueinander stehen. Diese Systeme können weitergehend in Einfachzuordnung und Mehrfachzuordnung unterschieden werden. Bei Einfachzuordnung besitzt jedes Depot genau eine Verbindung zu einem Hub. Bei Mehrfachzuordnung können Depots zu mehreren Hubs Verbindungen aufbauen.

Verbreitung fanden H&S-Systeme in den 1970er Jahren nach der Liberalisierung des amerikanischen Luftverkehrsmarktes, da die Luftverkehrsgesellschaften in dieser Netzform eine Möglichkeit entdeckten, um mit geringen Kosten das Angebot von Flugverbindungen in der Fläche auszudehnen. Obwohl sich auch im europäischen Flugverkehrsnetz ähnliche Strukturen gebildet haben, ist diese nach Mayer eher auf die historisch gewachsenen Strukturen der nationalen Fluggesellschaften und protektionistischem Verhalten begründet /MAY-2001/.

Zwei Teilnetze lassen sich durch Tore, engl. Gateways, miteinander verbinden, um den Austausch der Ströme besser kontrollieren zu können. Eine solche Form ist vor allem im grenzüberschreitenden Verkehr anzutreffen, wenn die einzelnen Netze noch nicht integriert werden können oder ihre Eigenständigkeit beibehalten sollen.

Um die spezifischen Vor- und Nachteile aufzuwiegen, dominieren in der Praxis im Regelfall Mischformen, Jacquemin spricht von hybriden H&S-Systemen /JAC-2006/. So können in ein Netzwerk mit einigen Direktverkehrslinien, für die ausreichendes Ladungsaufkommen vorhanden ist, ein oder mehrere Hubs integriert sein, um auch die Relationen mit weniger Sendungsaufkommen wirtschaftlich bedienen zu können. Kommt es auf den Strecken mit Direktverkehren zu einem höheren Sendungsauf-

kommen als Kapazitäten zur Verfügung stehen, können Sendungen zusätzlich über die Hubverbindung verschickt werden. Diese Mischformen bieten auf der einen Seite eine hohe Flexibilität durch die großen Gestaltungsspielräume, auf der anderen Seite besteht hier auch der größte Planungsbedarf für eine optimale Gestaltung der Transportketten.

### 5.3 Effekte von H&S-Strukturen

Da Netze mit H&S-Verkehren in der Praxis am häufigsten anzutreffen sind, werden im Folgenden die Vor- und Nachteile kurz angeführt. Mayer listet hierzu die Vorteile von H&S-Systemen für den Personenluftverkehr auf /MAY-2001/. Diese lassen sich teilweise auch auf Sammelladungsverkehre übertragen.

Für die Verbindung aller Depots werden im H&S System wesentlich weniger Verbindungen benötigt als in einem Direktverkehrsnetz. Um alle Depots in beiden Richtungen miteinander zu verknüpfen, sind bei einer Anzahl von  $P$  Depots, im H&S-Netz nur  $2 * P$  Verbindungen notwendig, während ein Direktverkehrsnetz  $P^2 - P$  Strecken erfordert /BLU-2005/.

Durch die Konsolidierung der Ladungsflüsse kommt es zu einem höheren Sendungsaufkommen auf den Speichen des Netzes. Transportunternehmen können dadurch mit einer Steigerung der Transportfrequenzen ihr Serviceangebot für die Kunden verbessern /HAR-1991/. Jacquemin weist außerdem auf „eine Glättung der betriebsmittelbezogenen Kapazitätsinanspruchnahme im Sinne eines Portfolioeffekts“ hin, da sich auftretende Schwankungen im Frachtaufkommen auf Teilmärkten durch das H&S-System besser ausgleichen lassen /JAC-2006/.

Durch das Zusammenfassen der Sendungsströme kommt es zu einer besseren Auslastung der vorhandenen Betriebsmittel, zu denen Verkehrsmittel, Umschlagseinrichtungen, Personal etc. zu zählen sind. Weiter kann das Transportunternehmen sogar veranlasst werden, größere Kapazitäten, z. B. bei den Verkehrsmitteln, mit zwar höheren Fixkosten aber gleichzeitig auch geringeren variablen Kosten einzusetzen. Beides führt zu einem Sinken der Stückkosten, da die Fixkosten nun auf größere Stückzahlen verteilt werden können. Dieser Effekt ist die sog. Fixkostendegression /CUL-2000/. Darüber hinaus können dynamische Skalenerträge durch

Lerneffekte auftreten, wenn sich bspw. durch die sich wiederholenden Beladungsvorgänge eine bessere Beladung ergibt.

Um aus den genannten Vorteilen einzelne Strategien ableiten zu können, unterteilt Kloster die Netzeffekte weiter nach Angebotsseite und Nachfrageseite /KLO-2001/. Kostensenkungspotentiale ergeben sich auf der Angebotsseite durch den Betriebsgrößennetzeffekt in Form von Fixkostendegression durch den Einsatz von größeren Verkehrsmitteln, sowie dem Betriebsdichtenetzeffekt durch die Integration von Netzen mit einer danach verbesserten Auslastung der Kapazitäten. Auf der Nachfrageseite wird eine höhere Zahlungsbereitschaft durch den Netzgrößennetzeffekt und den Netzdichtenetzeffekt erzielt.

Negativ wirkt sich im H&S-System die Verlängerung der allgemeinen Transportdauer und den damit verbundenen höheren Streckenkosten aus. Auch der Umschlag der Güter erzeugt zusätzliche Kosten, die im Direktverkehr nicht anfallen. Weiter hat eine Überlastung des Hubs große Auswirkung auf alle angeschlossenen Depots. Durch die zentrale Verknüpfung entsteht ein sensibles System, bei dem sich eine Verzögerung während des Umschlages auf alle angeschlossenen Speichen übertragen und eine Kettenreaktion auslösen kann /BLU-2005/.

## **5.4 Transportnetze in der Praxis**

Begriffe in Verbindung mit dem Wort „System“ können eine Vielzahl von Bedeutungen annehmen. So findet der Begriff Systemverkehr sowohl in der Distributionslogistik des Handels als auch in der Transportlogistik der Speditionen Verwendung. In dieser Arbeit verstehen sich Systemverkehre als geschlossene Einheit einer standardisierten Transportlösung von vielen Quellpunkten zu vielen Zielpunkten. Bei einer solchen weitestgehend standardisierten Transportdienstleistung entsprechen alle Komponenten gewissen Normen, die eine Handhabung erleichtern bzw. deren Automatisierung ermöglichen.

### **5.4.1 KEP-Dienste**

Eine besondere Form der Ausrichtung findet bei KEP-Diensten statt. Eine Abgrenzung zu den Systemverkehren der Spediteure hinsichtlich des Leistungsspektrums ist wegen einiger Überschneidungen nicht eindeutig möglich. KEP-Anbieter wie

FedEx, TNT und UPS haben ihre Aktivitäten längst um expeditionelle Dienste erweitert. Im Kerngeschäft transportieren KEP-Dienste typischerweise Kleingutsendungen mit bis zu ca. 30 kg Gewicht nach dem Many-To-Many-Prinzip, also von vielen Sendern zu vielen Empfängern, im Haus-zu-Haus-Verkehr.

Die transportierten Sendungen sind hohen Restriktionen bezüglich der Größe und Verpackungsart unterworfen. Überwiegend besteht der Inhalt aus hochwertigen Waren oder Dokumenten, die mit hoher Zuverlässigkeit zugestellt werden müssen. Die Transportnetze haben eine komplexe Struktur und um dem hohen Serviceniveau hinsichtlich Zuverlässigkeit und geringer Transportzeiten gerecht zu werden, sind an die Abwicklung und Sendungsbeschaffenheit besondere Anforderungen durch Standardisierung gestellt.

Oftmals beinhaltet das Leistungsangebot Zusatzleistungen, wie Verzollung oder Inkasso und deckt so alle Bereiche der Transportkette ab. Daher wird in diesem Zusammenhang auch von Integratoren gesprochen. Eine genaue Unterscheidung zwischen KEP-Diensten nehmen Vastag und Blunk vor /VAS-1998/, /BLU-2005/.

#### **5.4.2 Systemverkehre für Sammelladungen**

Durch die Nachfrage der verladenen Wirtschaft nach sinkenden Transportkosten bei steigender Qualität in Form kürzerer Transportdauer, lückenloser und zeitnaher Dokumentation des Transportverlaufes sowie verbindlicher Lieferzusagen hat sich in Verbindung mit dem erhöhten Wettbewerbsdruck im Bereich der Stückgüter aus den Sammelverkehren mehr und mehr das entwickelt, was allgemein unter Systemverkehren verstanden wird.

Expeditionelle Sammelladungsverkehre fertigen den Transport der Warenströme auf eine den KEP-Unternehmen vergleichbare Weise ab, vollziehen diese Entwicklung aber erst mit einiger Zeitverzögerung. Dabei haben sich die Transportnetzstrukturen vor allem in dem weitläufigen Wirtschaftsraum Nordamerikas parallel entwickelt und bilden sich nach der Schaffung des EU-Binnenmarktes in vergleichbarer Größe nun auch in Europa. Darüber hinaus befinden sich die Qualitätsansprüche der Kunden schon auf ähnlich hohem Niveau. So sind national 24 Stunden zwischen Abholung und Auslieferung mittlerweile ebenso selbstverständlich wie eine lückenlose Sendungsverfolgung in Echtzeit.

Im Vergleich zu den Paketdiensten lässt sich die Verladung und Sortierung der LE der Sammelgutsendungen schlechter automatisieren. Somit liegt das Optimierungspotential im Stückgutverkehr weniger in der Automatisierung in den Depots und Hubs als bei der Verbesserung der Auslastung von vorhandenen Transportkapazitäten, die wegen der umfangreicheren Sendungsgröße des Stückguts einen wesentlichen Einfluss ausüben.

Aus diesem Grund haben sich bei den Landverkehren regionaltätige Speditionen zu Kooperationen, wie IDS, 24plus oder Cargoline, zusammengeschlossen, um zum einen gegenseitig Kapazitäten der Bündnispartner zu nutzen und auszulasten, zum anderen dabei gleichzeitig das Flächenangebot erweitern zu können. Im Rahmen der Partnerschaft werden Direktverkehre im Fahrplanbetrieb bzw. ein zentrales Hub eingerichtet. Über diese Verbindungen tauschen die angeschlossenen Speditionen ihre Ladung entsprechend ihrer Einzugsgebiete miteinander aus. Dadurch entstehen Kooperationsnetze, die denen der Speditionskonzerne in der Leistungsfähigkeit ähnlich sind.

### **5.4.3 Seecontainerverkehr und Luftfracht**

Die Containerlinienreedereien setzen mittlerweile Schiffe, wie die Emma Mærsk, mit einer Kapazität von über 11.000 TEU, einer Länge von ca. 400 m und einem Tiefgang von ca. 20 m ein /NIC-2006/. Dabei entspricht ein Twenty-Foot-Equivalent-Unit, kurz TEU, einem 20-Fuß-Isocontainer. Durch die Restriktionen vieler Wasserstraßen, wie dem Suez- und Panamakanal, können diese Schiffe nicht mehr alle Häfen direkt miteinander verbinden. Daher gehen die Reedereien dazu über, einige Häfen als Hub zu benutzen und setzen kleinere Containerschiffe, die sog. Feederschiffe, in Zubringerdiensten ein. Heymann stellt die aktuelle Situation in der Containerschiffahrt dar und zeigt, dass der Containerumschlag wesentlich stärker gestiegen ist als der reine Containertransport /HEY-2006/.

Diese Entwicklung ist auf den sog. Transshipment-Verkehr zurückzuführen, dessen Anteil am Containerumschlag von 11 % im Jahr 1980 auf über 27 % im Jahr 2005 angestiegen ist. Momentan befinden sich die größten Container-Hubs in Asien, dazu gehören u. a. die Häfen Singapur, Hongkong, und Shanghai. Aufgrund der geografischen Lage erwartet Heymann eine zunehmende Bedeutung der Häfen im Nahen

und Mittleren Osten, wie bspw. Dubai /HEY-2006/. In Europa ist das spanische Algeciras an der Straße von Gibraltar ein bedeutender Umschlagshafen, dort macht Transshipment bereits 84,7 % des Gesamtumschlages aus.

Auf den damit einhergehenden Strukturwandel im Containerverkehr, hin zu multi-modalen Netzen verweist Crainic /CRA-2006/. Da die modernen Containerschiffe der sog. Post-Panamax-Klasse den Panamakanal nicht mehr passieren können, bilden sich in den USA transkontinentale Eisenbahnverbindungen mit Containerwaggons in Doppelstockbeladung zwischen der Ost- und Westküste. Für diese Entwicklungen zeigt Crainic sowohl für die strategische, als auch taktische Planung Automatisierungsmöglichkeiten für Containerverkehrsnetze auf /CRA-2006/.

Die Netze im Containerverkehr enthalten eine Vielzahl an Elementen der verschiedenen Netzstrukturen und sind daher besonders interessant. So erfolgt die Konsolidierung der Containerströme im Feedertransport vom Abgangshafen zum Hubseehafen durch Mitnahme. Bspw. fährt ein Feederschiff nacheinander die Häfen der Nordsee an, und verteilt und sammelt die Container des Hubs in Algeciras. Dieses Vorgehen ist zwar mit dem Pick-Up-Delivery-Verfahren im Vorlauf durch den Lkw-Nahverkehr vergleichbar, allerdings erfolgt der erste Umladevorgang nicht in einem Depot, sondern direkt am Hub. Das Hub übernimmt damit die Funktion eines Gateways.

Grundsätzliche Unterschiede weist die Entwicklung der Luftfracht auf. Der allgemeine Luftverkehr hat nach der Liberalisierung in den USA von Effizienzsteigerungen profitiert, allerdings haben sich Luftverkehrsnetze primär aus Anforderungen des Passagiertransportes entwickelt, bei dem die Luftfracht lediglich als ein Kuppelprodukt in Form der sogenannten Belly Fracht anfällt /VAH-2005/. Durch die Konsolidierung von Fracht und Passagieren und die damit verbundene Nutzung des Liniennetzes für Passagierluftfahrt können auch Relationen mit schwachem Frachtaufkommen bedient werden.

Gleichzeitig sind die Frachttransporte aber auch an die Flugpläne der Passagierlinienflüge gebunden und somit wenig flexibel hinsichtlich einer Optimierung. Eine Entkoppelung ist nur unter Verwendung von reinen Frachtflugzeugen möglich, die allerdings ausschließlich von Gesellschaften eingesetzt werden, bei denen Luftfracht ein eigenständiges Geschäftsfeld darstellt. Um die typischen Netzvorteile zu erzeu-

gen, haben sich auch im Luftfrachtverkehr Allianzen gebildet. Auch in der Luftfracht herrscht das H&S-System vor. Eine seltene Erscheinung bilden spezielle Frachthubs, zu denen das von FedEx genutzte Memphis in den USA zu zählen ist. Die Mehrzahl der integrierten Luftfrachthubs sind zugleich auch die Passagierhubs der Fluggesellschaften.

Durch die Vielzahl von Schnittstellen, die in der Transportkette der Luftfracht auftreten, kommt es vor allem in Europa zur unmittelbaren Konkurrenz zwischen Flugzeugen und Lkw-Verkehr. Sogenannte Lkw-Road-Feeder-Verkehre der Luftverkehrsgesellschaften und die Lkw-Sammelsysteme der Speditionen übernehmen den Transport von kleineren Flughäfen zum zentralen Hubflughafen. Dies führt vermehrt zu einer Verschmelzung der Systemverkehre der beiden Verkehrsträger, bei der sich in den letzten Jahren im Kern eine Konzentration auf wenige Hubflughäfen zu Lasten der kleinen regionalen Flughäfen gezeigt hat.

Eingesetzt wird die Luftfracht aufgrund kurzer Transportzeiten, hoher Pünktlichkeit, niedrigen Kosten für die Transportverpackung und geringen Transportversicherungsprämien vor allem zur Notlösung bei Produktionsstörungen oder Reparaturen, für Güter mit geringen Produktlebenszyklen, wie bspw. High-Tech-Produkte oder Bekleidungsartikel.



## **6 Ansätze zur Transportplanung**

Für die Beantwortung logistischer Fragestellungen sind im Rahmen des Operations Research eine Reihe von Ansätzen entwickelt worden. Ein Teil dieser Ansätze beschäftigt sich direkt mit der Transportplanung. Während einige Fragestellungen auf der strategischen oder taktischen Planungsebene ansetzen, behandeln andere Ansätze Fragestellungen, die für die operative Entscheidungsfindung von Bedeutung sind. Im Falle der Planung von Transporten im Sammelladungsbereich betrifft dies die tägliche Planung. Im Folgenden wird die Bedeutung des Operations Researchs für die Transportplanung dargestellt. Anschließend wird eine Reihe von Planungsansätzen aus der Literatur für die unterschiedlichen Planungsebenen skizziert. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Vorstellung von zwei Problemen, die für die hier behandelte zentrale Fragestellung von besonderer Bedeutung sind.

### **6.1 Bedeutung des Operations Research für die Transportplanung**

Die Optimierung von Produktionsabläufen und Verfahren wird durch angewandte Mathematik im Gebiet des Operations Researchs unterstützt. Dabei werden mit Hilfe von Daten operationale Ziele formuliert und in mathematische Modelle übertragen, um anschließend aus der berechneten Lösung eine Entscheidung begründen zu können /DOM-2003/.

Das Operations Research hilft, Problemstellungen in Modellen abzubilden und mit mathematischen Verfahren zu lösen. In der Unterstützung der Entscheidungsfindung durch Software lassen sich auf diese Weise Planungsprozesse automatisieren. Durch die immer höheren Rechenleistungen von Computern, ist es mittlerweile möglich, auch sehr komplexe Probleme zu lösen.

Der Einsatz von Optimierungsmodellen zur Lösung von Planungsproblemen in der betrieblichen Praxis von Transportunternehmen ist durch den rasanten Fortschritt der Computerhardware und Software möglich geworden. Auf diese Weise ist es zu einer starken Durchdringung des operativen Geschäftes mit Systemen des Enterprise Resource Planning, kurz ERP, gekommen. So stehen heute Daten in digitaler Form zur Verfügung, die vor wenigen Jahren für eine Optimierung hätten extra erfasst werden müssen. Zum Durchbruch von OR-Methoden als Bestandteil von computer-

basierten Entscheidungsunterstützungssystemen haben neben der hohen Leistungsfähigkeit handelsüblicher PC auch Verbesserungen bei den Optimierungsmethoden sowie die Unterstützung durch geografische Informationssysteme beigetragen /GRÜ-2005b/.

Die im Folgenden dargestellten Problembereiche der Transportlogistik wurden im Operations Research umfangreich diskutiert. Zu den wesentlichen Lösungsverfahren im diesem Bereich zählen beispielsweise die lineare Optimierung, Branch-and-Bound-Verfahren, Greedy Heuristiken und verschiedene Metaheuristiken, zu denen das Simulated Annealing, das Tabu Search sowie genetische Algorithmen zählen. Einen Überblick hierzu und weitere Definitionen zum Operations Research erhält man bei Domschke /DOM-2003/.

Ein Teilgebiet des Operations Researchs ist die Graphentheorie, die sich mit Weg- und Flussoptimierung beschäftigt und daher vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Logistik bietet. So lassen sich Transportnetzwerke in Graphen darstellen, die aus Knoten und Kanten bestehen. Dabei stellen Knoten die Depots, Hubs und sonstige Umschlagspunkte dar, während diese von Kanten miteinander verbunden werden. Praktische Verwendung finden die Algorithmen der Graphentheorie, wie das Dijkstra-Verfahren oder der A-Stern-Algorithmus, täglich in Routenplanern.

## **6.2 Systematisierung der Planungsprobleme**

Die Planungselemente für Einrichtung und Betrieb von Transportsystemen können nach Wichtigkeit, Zeithorizont und Betrachtungsbereich unterschieden werden. In Bezug auf den Zeithorizont wird von strategischer, taktischer sowie operativer Planung gesprochen. Die Real-time Planung, die grundsätzlich als Bestandteil der operativen Planung zu verstehen ist, kann für eine Systematisierung zusätzlich aufgeführt werden. Für die Einteilung in Betrachtungsbereiche bietet sich im Bereich der Systemverkehre vor allem eine Unterscheidung nach ortsfesten Einrichtungen, wie Depots und Hubs, dem Transportnetz, also den Streckenverkehren, sowie dem Flächenverkehr an (Bild 6.1) /ROY-2001/, /IRN-2002/.

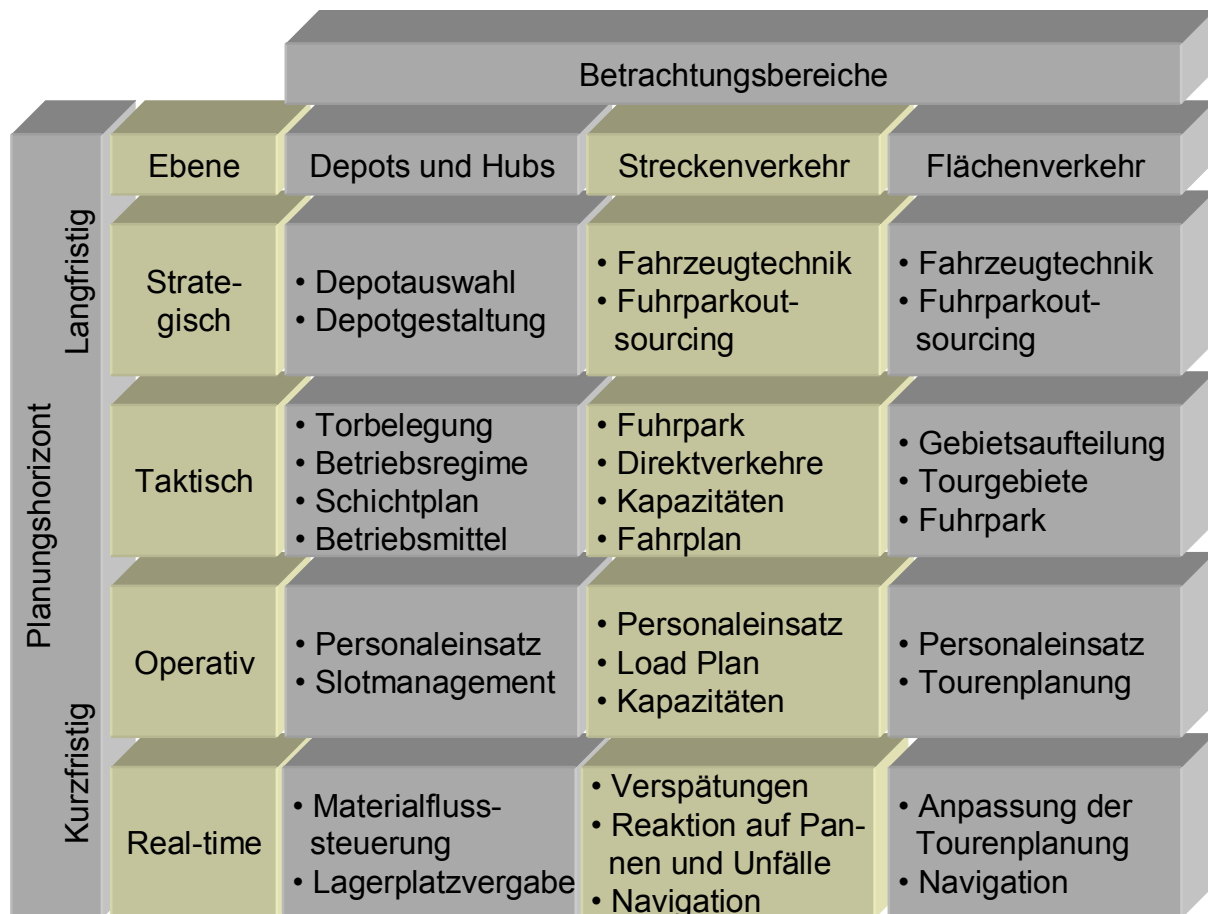


Bild 6.1: Beispiele für Planungsprobleme eines Lkw-Transportunternehmens

### 6.2.1 Strategische Planung

Die Ebene der strategischen Planung umfasst Entscheidungen über den Aufbau der Infrastruktur des physischen Transportnetzes [IRN-2002]. Gegenstand sind zum einen die Ausrichtung und Art der Geschäftstätigkeit, dazu zählen die Art der Transportleistungen, Zielmärkte, Laufzeiten und Zuverlässigkeit etc. Zum anderen gehört die Beschaffung der wesentlichen Ressourcen, wie Standorte, Immobilien, Verkehrsmittel und Personal zu diesem Feld. Die Ergebnisse der strategischen Planung bilden damit die Rahmenbedingungen für die taktische Planung.

Die Hub-Location-Probleme gehören zu den statischen Modellen der Lokalisations-theorie und helfen bei der Gestaltung eines Transport-Netzes. Sie sind Bestandteil der strategischen Planung und teilen sich in zwei Entscheidungsprobleme. Das erste Entscheidungsproblem ist das Lokationsproblem und befasst sich mit der Standortbestimmung für die einzurichtenden Hubs. Das Zweite ist das Allokationsproblem,

das sich der Zuordnung der einzelnen Quell- und Zielorte zu geeigneten Hubs widmet.

Ziel ist oftmals die Kostenminimierung der drei Kostenarten Transportkosten, Kosten für Einrichtung und Betrieb eines Hubs sowie Kosten aus Serviceverletzungen. Bei der Lösung wird angenommen, dass neben allen Transportkosten auch die als konstant angenommene Nachfrage bekannt ist. Volkswirtschaftlich wird dabei die mangelhafte Berücksichtigung einer fallenden Nachfragekurve kritisiert.

Die Hub-Location-Probleme lassen sich folgende Klassen unterteilen /BLU-2005/, /MAY-2001/, /JAC-2006/:

- o Das p-Hub Median Problem hat die Zielsetzung, ein Netz mit der vorgegebenen Anzahl Hubs gesamtkostenminimal einzurichten. Entscheidungsrelevant sind hierbei nur die Transportkosten.
- o Bei den Hub-Location-Problemen i. e. S. gilt es, die richtige Anzahl an Hubs zu bestimmen, so dass die Gesamtkosten, die um die Fixkosten für die Hubeinrichtung erweitert sind, minimiert werden.
- o p-Hub Zentren Probleme arbeiten mit einer vorgegebenen Anzahl von Hubs. Ziel ist die Minimierung der maximalen Kosten der teuersten Route. Dieses Problem tritt bei der Standortplanung von Krankenhäusern auf, wenn für den Weg von einem Einsatzort zurück zum Krankenhaus eine gewisse Fahrzeit entscheidend ist.
- o Hub-Covering-Probleme beschäftigen sich mit der Ermittlung der minimalen Anzahl an Hubs, die notwendig ist, alle Quell- und Zielpunkte zu überdecken. Eine Überdeckung liegt vor, sobald ein Quell- und Zielpunkt in einer vorher festgelegten Distanz zum Hub liegt.
- o Im Mittelpunkt der Hub-Arc-Location-Probleme steht die Minimierung der Transportkosten durch Aktivierung einer vorgegebenen Anzahl an Pfeilen, die potentielle Hubs miteinander verbinden. Die Aktivierung der Verbindungen bestimmt simultan die Hubstandorte in den Start- und Endpunkten und somit das komplette Netzwerk-Design. Im optimierten Netzwerk müssen nicht notwendigerweise alle Knoten miteinander verbunden sein.

Weitere Problemstellungen beziehen sich auf die Gestaltung des Fuhrparks und der Umschlagspunkte. Im Rahmen der Gestaltung des Fuhrparks ist bei einer Spedition

zunächst die grundsätzliche Frage zu klären, ob der Transport im Selbsteintritt stattfinden soll. Diese Frage ist gegebenenfalls für Nah- und Fernverkehrsfahrzeuge getrennt zu beantworten. Wenn mit einem eigenen Fuhrpark gearbeitet werden soll, muss neben der Frage zur Fahrzeuganzahl vor allem auch die einzusetzende Technik bestimmt werden. Für die Dimensionierung von Umschlagspunkten kann zum einen eine rein spielzeitorientierte statische Berechnung zum Einsatz kommen. Zum anderen können ereignisorientierte Simulationsmodelle Anwendung finden, um in der Dimensionierung die Dynamik eines Materialflusssystems abzubilden. Auf diese Weise lassen sich Zeitanteile für Blockungen experimentell nachweisen.

### **6.2.2 Taktische Planung**

Die taktische Planung beschäftigt sich jeweils mit einer optimalen Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Dazu gehören die Gestaltung des Netzwerks, die Fahrplangestaltung, die Verkehrsmittelverwendung, die Einzugs- bzw. Tourgebietsplanung etc. Eine Planungsperiode umfasst typischerweise ein Geschäfts- oder Kalenderjahr, aber auch unterjährige Anpassungen aufgrund von saisonalen Schwankungen erfolgen im Rahmen der taktischen Planung. Das Grundproblem, das oftmals in der Distributionslogistik von produzierenden Unternehmen sowie Handelsunternehmen auftritt, ist das klassische Transportproblem, da es einen kostenminimalen Transportplan erstellen muss, durch den alle Bedarfe befriedigt werden /DOM-2003/, /VAH-2007b/.

Nach Grünert baut die taktische Planung von Frachttransporten auf den Ergebnissen der strategischen Planung auf. Ihre Aufgabe besteht darin, die festgelegten Personal-, Netzwerk- und Fahrzeugressourcen zur Bearbeitung einer prognostizierten Verkehrsnachfrage optimal einzusetzen. Es wird dabei in zwei wesentlichen Modellklassen unterschieden, nämlich die für terminierte und für nicht-terminierte Dienste. Zur Gruppe der terminierten Dienste zählt Grünert kombinierte Netzwerk-Design und Routing/Scheduling Modelle mit einer sehr hohen Komplexität, die aus der Klassifikation als deterministische, dynamische Modelle mit niedrigem Aggregationsgrad resultieren. Unter den nicht-terminierten Diensten versteht Grünert Dienste, die nur der Häufigkeit nach festgelegt werden bzw. für die ein bestimmter Verkehrsträger festgelegt wird. Die Netzwerke dieser SNDP sind aufgrund der fehlenden zeitlichen Dimension wesentlich kleiner /GRÜ-1999/.

Powell erkennt sehr früh die zwei Hauptprobleme, denen sich Sammelgutunternehmen bei der Installation eines Transportnetzes gegenübersehen: zwischen welchen Depots soll ein Fernverkehr stattfinden und wie soll ein Routing über das Netzwerk erfolgen /POW-1986/. Welche Probleme sich im Detail bei der Planung des Netzwerk Design ergeben, erläutern Grünert und Sebastian anhand eines weltweiten Transportnetzes für Post- und Expressdienstanbieter /GRÜ-2000/. In Anlehnung an Crainic und Laporte müssen durch das Network-Design-Problem fünf taktische Planungsaufgaben gelöst werden: Das SNDP, Routingverfahren, Festlegen der Depotaufgaben, Repositionierung der leeren Transporthilfsmittel und Verwendung von Ressourcen, wie Material und Personal /CRA-1997/.

### 6.2.3 Operative Planung

Die operative Planung betrifft abschließend vor allem die Organisation des Tagesgeschäfts. Die wesentlichen Fragestellungen sind hierbei Personaleinsatzpläne, kurzfristige Tourenanpassungen und die Ladungsplanung.

Beim Frachtoptimierungsproblem handelt es sich um ein kombinatorisches Problem, das aus der bis zum 01.01.1994 gültigen Regulierung des Güterfernverkehrs resultiert. Der vom Bundesverband des deutschen Güterverkehrs herausgegebene Güterfernverkehrstarif, kurz GFT, regelte die Mindestfracht, die für die gewerbliche Durchführung einer Beförderungsleistung zu entrichten war. Während der GFT aus Sicht des Frachtführers das Entgelt für die von ihm erbrachte Beförderungsleistung regelte, bestimmte der GFT für den Spediteur im Falle der Fremdvergabe ebenfalls die Frachtausgaben.

Aus Sicht der Spediteure lag das wesentliche Optimierungspotential in der Bündelung von Aufträgen unterschiedlicher Frachtzahler und der gemeinsamen Vergabe an einen Frachtführer, so dass die zu zahlenden Frachtkosten möglichst gering ausfallen /KOP-1992/. Mit der Deregulierung des Güterverkehrsmarktes sind zwar die verbindlichen Tarife und die vorgegebene Einteilung in Güterklassen verschwunden, die Optimierungsaufgabe im Falle von Teilladungen ist damit aber nicht entfallen. Sie hat sich allerdings, wie beim nachfolgenden Groupage-Problem dargestellt, verändert.

Durch den Konzentrationsprozess in der Transportbranche sind mittelständische Speditionen gezwungen, Kooperation einzugehen, um gegenüber dem Serviceangebot der Logistikkonzerne wettbewerbsfähig zu bleiben /BAG-2008/. Diese Kooperationen unterscheiden sich in den Problemstellungen erheblich von denen der integrierten Konzerne. Kopfer beschreibt diesen Unterschied als das „Groupage Problem kooperierender Verkehrsträger“ /KOP-1999/.

Die Aufgabenstellung im Groupage-Problem wird in der möglichst günstigen Zuordnung der sukzessiv und unregelmäßig eintreffenden Transportaufträge auf die freien Kapazitäten von Kooperationsteilnehmern gesehen. Das speditionelle Dispositionsproblem wird in diesem Fall auf eingliedrige, unimodale Transportketten reduziert. Dabei werden betriebseigene Verkehrsmittel mit spezifischen Kapazitäten und Kostenfunktionen sowie selbstständige Frachtführer und deren spezifische Tariffunktionen berücksichtigt. Auf Tagesbasis entlohnte Frachtführer sind dabei ähnlich den betriebseigenen Verkehrsmitteln zu behandeln /KOP-2006/.

Bei der Planungssituation im Selbsteintritt handelt es sich um ein erweitertes dynamisches Pickup-and-Delivery Problem mit Zeitfensterrestriktionen, also ein Rundreiseproblem. Der dabei entwickelte Tourenplan wird auf der Basis variabler Selbstkosten bewertet. Bei der Fremdvergabe von Aufträgen sind die frachtführerspezifischen Tarife entscheidungsrelevant. Hierbei wird von einem in der Regel mit der entgeltbestimmenden Größe degressiv ansteigenden Frachtbetrag ausgegangen. Durch eine geschickte Sendungsgestaltung lassen sich bei Ausnutzung der Tarifdegression deutliche Einsparungen gegenüber der Einzelabrechnung erzielen /PAN-2001/.

Zu den weiterführenden Problemen eines Transportunternehmens gehört das Feld der Tourenplanung. Ziel ist es, Sammel- und Verteilenaufträge optimal auf die vorhandenen Transportkapazitäten aufzuteilen. Den Ausgangspunkt aller Tourenplanungsmodelle bildet das Traveling-Salesman-Problem, kurz TSP, ein klassisches Optimierungsproblem. Beim TSP steht ein Handlungsreisender vor der Aufgabe, den kürzesten Weg zu finden, um alle Kunden einmal zu besuchen und anschließend wieder an seinen Startort zurückzukehren. Hieraus lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle zur Tourenplanung, auch als Vehicle-Routing-Probleme, kurz VRP, bezeichnet, ableiten /DOM-1997/, /ZIE-1988/.

Die Erweiterung des VRP zum Pick-Up-Delivery-Problem oder auch Capacitated-Vehicle-Routing-Problem, kurz CVRP, erfährt das VRP durch die Ergänzung mehrerer Fahrzeuge, Kapazitätsbeschränkungen etc. Bräysy fügt dem CVRP eine weitere Komponente durch ein vorgeschriebenes Zeitfenster für Abholung und Auslieferung hinzu /BRÄ-2005/. Nicht zuletzt wegen solchen Nebenbedingungen gehört die Tourenplanung zu den NP-vollständigen Problemen. Für solche Probleme aus der Komplexitätsklasse NP, also non-deterministic polynomial-time, gilt, dass alle bekannten deterministischen Algorithmen einen exponentiellen Rechenaufwand erfordern. Die Erstellung einer nicht optimalen guten Lösung in einer akzeptablen Rechenzeit ist aber durch Heuristiken und Metaheuristiken möglich. Grünert und Irnich beschäftigen sich ausführlich mit diesen Problemstellungen und deren Lösungsansätzen /GRÜ-2005a/. Eine Aufstellung softwaregestützter Tourenplanungssysteme hat Janz erstellt /JAN-2003/.

Das Kürzeste-Wege-Problem, das auch als Shortest-Path-Problem, kurz SPP, bezeichnet wird, ist eines der logistischen Grundprobleme. Neben der Anwendung in Navigationssystemen, finden die Algorithmen vor allem überall dort Anwendung, wo Personen, Materialien und Verkehrsmittel sowie Informationen in einem Netzwerk von einem oder mehreren Startknoten zu einem oder mehreren Zielknoten gelangen sollen. Die Herausforderung besteht dabei meistens darin, den Transport möglichst kostengünstig oder schnell zu gestalten /GRÜ-2005a/.

Diese Optimierung von Wegen kann als reiner Selbstzweck erfolgen, wie es bei der Routenoptimierung in Navigationssystemen, in Auskunftssystemen des öffentlichen Personenverkehrs oder bei Buchungssystemen von Fluggesellschaften der Fall ist. Die Lösung des SPP kann aber auch im Rahmen einer übergeordneten Problemstellung, wie etwa dem SNDP oder dem VRP, erfolgen. Weiterhin lassen sich auch andere Probleme mit Kürzesten-Wege-Algorithmen lösen, wie etwa die Bestimmung längster und kürzester Wege in Netzplänen.

#### **6.2.4 Real-Time-Planung**

Als vierte Ebene nutzt Roy die Real-Time-Planung. Dort sind Informationsgewinnung und -weiterverarbeitung durch Informations- und Kommunikationssysteme während der Transportabwicklung eingeordnet /ROY-2001/. Die täglichen Auftragseingänge



sind überwiegend unregelmäßig und somit nicht planbar, darüber hinaus sind Sammelfahrzeuge im Nahverkehr häufig schon unterwegs, wenn ein Auftrag eintrifft. Nach Roy hilft die Real-Time-Planung bei der Zuordnung eines Kundenauftrages zu einem geeigneten Fahrzeug, das sich in einer kostengünstigen Entfernung zum Ladeort aufhält, ein vorgegebenes Zeitfenster zum Laden einhalten kann und über eine ausreichende Ladekapazität verfügt. Nach der Fahrzeugbestimmung kann im nächsten Schritt bereits eine Vorplanung für die Weiterbehandlung im Depot erfolgen: Rampen werden den Fahrzeugen zugewiesen, Lagerpersonal eingeteilt und Ladelisten für den Hauptlauf erstellt.

Von Freitag wird ein Ansatz mit Multiagentensystemen aufgegriffen, um einen Paradigmenwechsel von der zentralen zur dezentralen Steuerung zu entwerfen, da der Aufwand für eine Optimierung durch eine zentrale Instanz mit zunehmend komplexeren Netzen überproportional steigt. Die Entwicklung von mobilen Kommunikationsgeräten, Ortungssystemen und intelligenten Funkchips soll intelligente Transportgüter ermöglichen, die sich permanent identifizieren und lokalisieren lassen und mit anderen Objekten innerhalb der Transportkette kommunizieren können. Diese Eigenschaften bilden die Basis für eine Selbststeuerung der einzelnen Sendungen /FRE-2004/.

### **6.3 Darstellung ausgewählter Transportprobleme**

In den nachfolgenden Abschnitten werden zwei ausgewählte Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Transportprobleme präsentiert und mit in der Literatur diskutierten Lösungsansätzen dargestellt. Dabei handelt es sich in Abschnitt 6.3.1 um das SNDP, das der taktischen Planungsebene zugeordnet ist. Das SNDP führt bei realistischen Aufgabenstellungen zu Probleminstanzen, die nur schwierig zu lösen sind. Die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Modellformulierungen schaffen dabei eine gute Übersicht der zu berücksichtigenden Abhängigkeiten.

In Abschnitt 6.3.2 wird das SPP dargestellt. Wird es für das reine Fahrzeugrouting eingesetzt, ist das SPP der operativen Planungsebene zuzuordnen. Handelt es sich beim Routing nur um einen Teilaspekt einer umfassenderen Planungsaufgabe, wie etwa dem SNDP, kann es auch in anderen Planungsebenen eingesetzt werden.

Um im Rahmen dieser Arbeit einheitliche Symbole zu verwenden, wurden die Modelle aus der Literatur angepasst. Auch für die Modelle des SPP, die zwischen zwei Knoten nicht in parallelen Kanten unterscheiden, wird schon an dieser Stelle auf die Spezifizierung  $e(ij)$ , also Pfeil  $e$  zwischen den Knoten  $i$  und  $j$ , zurückgegriffen.

### **6.3.1 Service-Network-Design-Problem**

Das Spannungsfeld aus der Nachfrage nach zuverlässigen und qualitativ hochwertigen Transportdienstleistungen und den aus dem starken Wettbewerb resultierenden niedrigen Gewinnmargen zwingt die Dienstleister dazu, ihre Ressourcen effizient einzusetzen. Das in der Literatur vielfach diskutierte SNDP wird in Abschnitt 6.3.1.1 zunächst beschrieben und kurz klassifiziert, bevor in den weiterführenden Abschnitten eine mögliche Modellformulierung und Modellerweiterungen vorgestellt werden.

#### **6.3.1.1 Problembeschreibung**

Um den Herausforderungen gerecht zu werden, müssen die Dienstleister die Strategien der Konsolidierung und Standardisierung hinsichtlich der Verkehrsmittel und der Ausrüstung verfolgen. Mit der Ausnahme von Ganzladungsverkehren wird die Fracht in Depots und Hubs konsolidiert. Die Planungsaufgaben, die hieraus resultieren sind Transportfrequenz, Transportmodus, Netzwerkrouting sowie die zugehörige Fahrplangestaltung. Darüber hinaus sind Zuordnungen für Personal und Verkehrsmittel vorzunehmen und der Umgang mit Leercontainern bzw. Leerfahrzeugen ist zu planen. Die beschriebene Aufgabenstellung lässt sich sowohl für Eisenbahnen, Sammeladungsspeditionen, KEP-Dienste, Brief-Dienste als auch für Fluggesellschaften und Behälterverkehre formulieren. Die Schwierigkeit der Planungsaufgabe resultiert zum einen aus dem hohen Grad gegenseitiger Abhängigkeiten der Einzelentscheidungen und zum anderen aus dem Umfang praxisrelevanter Probleminstanzen /WIE-2008/.

Die Bereitstellung eines Services, also einer Transportverbindung, führt auf der einen Seite zu Fixkosten, stellt aber auf der anderen Seite eine begrenzte Transportkapazität bereit, die einen Güterfluss durch das Netzwerk ermöglicht. Das Entscheidungsproblem des SNDP besteht im Trade-Off zwischen Servicequalität und Kosten.

### 6.3.1.2 Service-Network-Design Formulierungen

Die Möglichkeiten bei der Formulierung von Zielfunktionen und Nebenbedingungen sind so vielfältig, wie die Anwendungen, für die sie aufgestellt werden. In Abhängigkeit von der Netzstruktur und den Anforderungen an die Leistungserbringung werden die Modelle individuell formuliert. In diesem Abschnitt sollen lediglich die Möglichkeiten der Modellformulierung dargestellt werden. Für die entwickelten Lösungsansätze wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Unter der Bezeichnung „Load-Planning-Problem“ diskutiert Powell bereits 1983 die Zusammenhänge, die heute als Frequency-Service-Network-Design, kurz FSND, Problem bekannt sind. Er stellt dabei die im Folgenden dargestellte Zielfunktion mit Nebenbedingungen auf und verweist auf eine heuristische Vorgehensweise zur Lösung des Problems. Der Ansatz konzentriert sich auf indirekte Verkehre. Das bedeutet, dass keine direkten Verbindungen zwischen den Depots eingerichtet werden. Alle Transporte werden über einen oder mehrere Hubs abgewickelt. Zur Lösung des formulierten Problems schlägt Powell ein lokales Verbesserungsverfahren vor, bei dem, ausgehend von einer zulässigen Basislösung, iterationsweise Veränderungen an den Verbindungen zwischen Depots und Hubs sowie zwischen den Hubs vorgenommen werden /POW-1983/.

$$\min_{x_{e(ij)}} \sum_{e(ij) \in L} c_{e(ij)} F_{e(ij)}(x_{e(ij)}) + \sum_{e(ij) \in B} h_{e(ij)} x_{e(ij)} \quad 6.1$$

Beim ersten Teil der Zielfunktion (Formel 6.1) handelt es sich um die Fixkosten, die mit der Einrichtung eines Services mit einer bestimmten Frequenz zwischen den Knoten des Netzwerkes entstehen. Der zweite Teil der Zielfunktion beschreibt die Handlingkosten, die für die an einer Kante anfallende Menge entstehen, sobald es sich bei den Knoten um Hubs handelt. Ein Hub wird dabei durch einen Eingangsknoten und einen Ausgangsknoten modelliert.

Nebenbedingungen:

$$F_{e(ij)}(x_{e(ij)}) = \begin{cases} 0 & x_{e(ij)} = 0 \\ F_{\min} & 0 < x_{e(ij)} \leq F_{\min} \\ x_{e(ij)} & x_{e(ij)} > F_{\min} \end{cases} \quad \forall e(ij) \quad 6.2$$

$$\sum_j y_{e(ij)}^d = 1 \quad \forall d \in \underline{T}, \forall i \in \underline{N} \quad 6.3$$

$$x_{e(ij)} = \sum_{o \in \underline{T}} \sum_{d \in \underline{T}} x^{od} \delta_{e(ij)}^{od} \quad 6.4$$

$$\sum_{e(ij)} \Delta t_{e(ij)}(x_{e(ij)}) \delta_{e(ij)}^{od} \leq t_{\max}^{od} \quad \forall od \quad 6.5$$

$$y_{e(ij)}^d = \begin{cases} 1 & \text{für } e(ij) \in p(id) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall e(ij) \in \underline{L}, i, d \in \underline{T} \quad 6.6$$

### Variablen

- $\underline{L}$  Menge aller Kanten zwischen Terminals
- $c_{e(ij)}$  Bewertung von  $e(ij) \in \underline{L}$ , hier als Fixkosten pro Fahrzeug
- $x_{e(ij)}$  Gesamtes Sendungsaufkommen auf  $e(ij)$ , hier in Wagenladungen
- $F_{e(ij)}$  Frequenz von  $e(ij)$  als Funktion von  $x_{e(ij)}$
- $\underline{B}$  Menge aller Verbindungen in Hubs
- $h_{e(ij)}$  Handlingkosten pro Fahrzeugladung auf  $e(ij) \in \underline{B}$
- $y_{e(ij)}^d$  Binärvariable für die Nutzung von  $e(ij)$  für Fracht abgehend von  $i$  zu einem Zielknoten  $d$
- $d$  Zielknoten
- $p(ij)$  Pfad von  $i$  nach  $j$
- $\underline{T}$  Menge aller Terminals
- $\underline{N}$  Menge aller Knoten
- $o$  Startknoten
- $x^{od}$  Sendungsaufkommen zwischen  $o$  und  $d$
- $\delta_{e(ij)}^{od}$  Binärvariable für die Nutzung von  $e(ij)$  auf dem Pfad von  $o$  nach  $d$ .
- $\Delta t_{e(ij)}$  Zeitbedarf von  $e(ij)$  als Funktion von  $x_{e(ij)}$
- $t_{\max}^{od}$  Zulässige maximale Belieferungsdauer zwischen  $o$  und  $d$

Die erste Nebenbedingung (Formel 6.2) definiert die Frequenz einer Kante anhand des Sendungsaufkommens. Die Frequenz kann im Falle fehlender Sendungen den Wert null annehmen. Sind nur wenige Sendungen vorhanden, wird eine Mindestfre-

quenz angesetzt. Die zweite Nebenbedingung (Formel 6.3) stellt für jeden Knoten des Netzwerkes sicher, dass für ein bestimmtes Ziel nur ein Nachbarknoten genutzt wird. Formel 6.4 definiert die Flussmenge auf einer Kante  $e(ij)$  als die Summe aller kumulierten Flüsse von Quell-Knoten  $o$  zu Ziel-Knoten  $d$  für die gilt, dass Kante  $e(ij)$  Teil des Pfades von  $o$  nach  $d$  ist. Formel 6.5 gewährleistet, dass die Summe der Zeitbedarfe eines zwischen  $o$  und  $d$  genutzten Pfades die maximal zulässige Belieferungsdauer für diese Verbindung nicht übersteigt. Die Zeitbedarfe der Verbindungen sind dabei eine Funktion der Frequenz, also des Sendungsaufkommens der einzelnen Relation.

Die Concave-Cost-Network-Flow-Formulierung von Balakrishnan arbeitet nicht mit einer Frequenz, stattdessen werden einzelne Services über Binärvariablen aktiviert. In der Zielfunktion werden diese Services mit Fixkosten und zusätzlich einzelne Güterflüsse, die die Relationen nutzen, mit variablen Kosten bewertet. Darüber hinaus werden die einzelnen Services in Abschnitte eingeteilt, für die separate variable und fixe Kosten hinterlegt werden. Auf diese Weise kann für die Relationen eine konkave Kostenfunktion abgebildet werden /BAL-1989/. Eine ähnliche Formulierung, allerdings mit einer linearen Kostenfunktion, findet sich auch unter der Bezeichnung Freight-Network-Design-Problem bei Miyamoto /MIY-2003/. Eine pfadorientierte Formulierung findet sich bei Crainic. Er hält in diesem Zusammenhang auch fest, dass multicommodity Network-Design-Modelle „capacitated multicommodity minimum cost network flow“ Probleme beinhalten, die durch Weglassen der Kapazitätsrestriktion in  $n$  Kürzeste-Wege-Probleme zerfallen /CRA-2003/.

In einem Modell für LTL-Netze formuliert Crainic zwei zusätzliche Terme /CRA-1988/. Der Erste drückt Strafkosten für Verspätungen in der Transportkette aus. Hierzu muss allerdings für jeden Transportweg zu einem Markt eine erwartete Verspätung und deren Standardabweichung festgelegt werden. Diese Vorgehensweise stößt insbesondere bei dichten Netzen mit vielen möglichen Transportwegen an Grenzen, da die Verspätungen wiederum von den Transportfrequenzen und der zeitlichen Anordnung der Transportrelationen abhängen.

Die Transportkapazitäten werden über den zweiten Term abgebildet. In diesem Modell wird die Transportkapazität nicht aus einer Frequenz und einer Fahrzeugkapazität abgeleitet, womit sie automatisch eingehalten wird. Es wird darüber hinaus

auch keine Kapazitätsrestriktion aus den aktivierten Fahrzeugen abgeleitet /CRA-2000/. Vielmehr werden Kapazitätsüberschreitungen durch zusätzliche Kosten bestraft. Diese Vorgehensweise kann dadurch begründet werden, dass Überhänge durch freie Kapazitäten am Markt abgefangen werden.

### 6.3.1.3 Dynamische Erweiterungen

Das Ergebnis von FSND-Modellen ist der sogenannte „Load Plan“, der die Netzwerkstruktur determiniert. Die Modelle können darüber hinaus auch zur Analyse von Szenarien in der strategischen Planung genutzt werden. Demgegenüber sind dynamische Formulierungen dichter an der operativen Wirklichkeit der Praxis. Ihr Ziel ist die Planung von Fahrplänen und die Unterstützung bei der Terminierung einzelner Relationen /CRA-2000/.

Mit dieser Zielsetzung sind die Dynamic-Service-Network-Design-Modelle, kurz DSND-Modelle, vor allem auch bezogen auf die deutschen Sammelladungsnetzwerke geeigneter. Aufgrund des üblichen Angebotes von 24 h und 48 h Diensten wird fast ausschließlich mit fahrplanmäßigen Liniendiensten anstatt mit einer „go when full“ Strategie gearbeitet.

In DSND-Modellen wird die Zeitdimension mit in die Modellformulierung aufgenommen. Dies wird normalerweise dadurch realisiert, dass die Operationen des Systems über eine bestimmte Anzahl von Perioden in einem Raum-Zeit-Netzwerk abgebildet werden. Das physische Netzwerk wird dafür in jeder Periode repliziert. Relationen zwischen zwei Depots sind somit in unterschiedlichen Perioden verfügbar. Hinzu kommen temporale Verbindungen zweier Repräsentanten desselben Depots /GRÜ-2000/, /DAL-2004/.

Neben dem Zeitverbrauch von Handling-Aktivitäten am Depot wird auch das Warten einer Sendung auf die nächste Abfahrt abgebildet. Mit ganzzahligen Entscheidungsvariablen wird angezeigt, ob eine Relation zu einem bestimmten Zeitpunkt startet. So lange keine zeitlich parallelen Abfahrten stattfinden, bzw. wenn die Zeitintervalle hinreichend klein sind, ist es möglich, dies mit Binärvariablen abzubilden. Die resultierenden Formulierungen sind Modelle ähnlich den FSND-Modellen, jedoch mit signifikant größeren Graphen /CRA-2000/.

### 6.3.2 Shortest-Path-Probleme

Formal beschreibt das Problem der kürzesten Wege in Graphen die Suche der kürzesten Entfernungen von  $o$  zu allen anderen Knoten oder zu einer Teilmenge  $P'$  der Knotenmenge  $P$  eines bewerteten, gerichteten Graphen. Mit den Verfahren wird im Regelfall vom Startknoten  $o$  ein kürzester Weg zu jedem erreichbaren Knoten  $i \in P$  ermittelt, womit ein spannender Wurzelbaum mit der Wurzel  $o$  gebildet wird. Aus dieser Eigenschaft der im Nachfolgenden vorgestellten Verfahren resultiert die Bezeichnung Baumalgorithmus /DOM-1995/. Anhand der Vorgehensweise bei der Überprüfung besuchter Knoten können die Verfahren in die Kategorien Label-Correcting-Verfahren und Label-Setting-Verfahren eingeteilt werden. Entgegen dem Standardfall des SPP wird in Abschnitt 6.3.2.3 die Vorgehensweise bei der Notwendigkeit der Berücksichtigung mehrerer Ressourcen vorgestellt.

#### 6.3.2.1 Label-Setting-Verfahren

Bei Label-Setting-Verfahren, kurz LS-Verfahren, wird jeder von  $o$  aus erreichbare Knoten genau einmal überprüft und danach aus der Menge der markierten Knoten entfernt. Um die korrekte Funktionsweise sicherzustellen, muss jeder Knoten  $i$  bei seiner Überprüfung die absolut geringsten Kosten  $c_i$  zum Startknoten  $o$  aufweisen. Dazu ist es entweder notwendig, dass der Graph azyklisch ist und sich die Knoten somit topologisch sortieren lassen oder es wird die Forderung nach nicht-negativen Kantenbewertungen formuliert. Bei azyklischen Graphen kann mit dem Pulling- oder Reaching-Algorithmus gearbeitet werden /GRÜ-2005a/. Der bekannteste Kürzeste-Wege-Algorithmus für zyklische Graphen mit nicht-negativen Kantenbewertungen ist der Dijkstra-Algorithmus. Ein Algorithmus in ähnlicher Form ist auch bei Dantzig zu finden /DAN-1960/. Um hierbei die korrekte Funktionsweise sicherzustellen, wird eine Sortierung der markierten Knoten nach aufsteigender Entfernung vorgenommen.

Ursprünglich spricht Dijkstra im Zusammenhang mit seinem Algorithmus von den Knotenmengen „Set A“, „Set B“ und „Set C“ sowie von den Kantenmengen „Set I“, „Set II“ und „Set III“. Menge A beinhaltet die Knoten  $i$ , für die die geringsten Kosten  $c_i$  zum Startknoten  $o$  bekannt sind. Menge B beinhaltet die Knoten, aus denen der nächste Knoten, der der Menge A hinzugefügt werden soll, ausgesucht wird. Alle

Knoten aus Menge B sind mit wenigstens einem Knoten aus Menge A verbunden, gehören aber noch nicht zur Menge A. Menge C beinhaltet alle übrigen Knoten.

Die Kantenmenge I umfasst die Kanten auf den minimalen Pfaden zu den einzelnen Knoten in Menge A. Aus Menge II werden die nächsten Kanten für Menge I ausgesucht. Nur eine Kante aus Menge II führt zu den einzelnen Knoten aus Menge B. Menge III umfasst alle verworfenen oder noch nicht betrachteten Kanten /DIJ-1959/.

Für die Implementierung wird in späteren Veröffentlichungen nur noch von der Menge der „markierten Knoten“  $L$  gesprochen. Da für den Algorithmus tatsächlich die drei bei Dijkstra aufgeführten Mengen benötigt werden, werden die Mengen aus einer Kombination aus  $c_i$  sowie einer Labelmenge  $L$  definiert. Bei der Initialisierung werden in der Regel alle  $c_i$  auf  $\infty$  gesetzt. Die so gekennzeichneten Knoten entsprechen der Menge C. Sobald einem Knoten im Verlaufe des Algorithmus ein  $c_i < \infty$  zugewiesen wird, bekommt er darüber hinaus eine Markierung und befindet sich damit in Menge B.

In jeder Iteration des Dijkstra-Algorithmus wird ein Knoten aus Menge B, der die aktuell kürzeste Distanz zum Startknoten aufweist, untersucht. Die Nachfolger  $N(i)$  des untersuchten Knotens bekommen entweder erstmalig eine Distanz und eine Markierung zugeordnet, womit sie aus Menge C in Menge B wechseln, oder erhalten eine Aktualisierung der Distanz, womit sie in Menge B verbleiben. Eine Aktualisierung der Distanz wird nur vorgenommen, wenn die neu ermittelte Distanz geringer ist. Nach der Untersuchung verliert der untersuchte Knoten die Markierung und wird damit Menge A zugeordnet. Als weitere Information wird für jeden Knoten in Menge B der jeweilige Vorgänger gespeichert.

Eine Unterscheidung in Kantenmengen, wie sie bei Dijkstra durchgeführt wurde, ist für die Implementierung nicht zwangsläufig notwendig und fällt damit im Regelfall weg. Nachfolgend wird die Umsetzung des Dijkstra-Algorithmus im Pseudocode dargestellt (Algorithmus 6.1). Die Umsetzung enthält dabei das von Dijkstra formulierte Abbruchkriterium der Aufnahme von Zielknoten  $d$  in Menge A, also das Entfernen von Knoten  $d$  aus  $L$ . Für den Fall, dass  $G$  kein vollständiger Graph ist, wird mit dem Abbruch bei Erreichen einer leeren Menge der markierten Knoten eine Endlos-



schleife vermieden. Nach Erreichen des Zielknotens kann der zugehörige kürzeste Weg durch ein Durchlaufen der Vorgänger  $V(j)$  rekonstruiert werden.

```

(Initialisierung)
   $c_o := 0; L := \{o\}; V(o) := \{0\}; c_i := \infty \forall i \in P \setminus \{o\}$ 
(Schleife)
  do until  $L = \{\}$ 
    wähle  $i \in L$  mit  $c_i = \min_{k \in L} c_k$ 
    if  $i = d$  then
      end do
    for  $j \in N(i)$  do
      if  $j \notin L$  mit  $c_j = \infty$  then
         $c_j := c_i + c_{e(ij)}; V(j) := \{i\}; L := L \cup \{j\}$ 
      next for
      if  $j \notin L$  mit  $c_j < \infty$  then
        next for
        if  $j \in L$  mit  $c_j > c_i + c_{e(ij)}$  then
           $c_j := c_i + c_{e(ij)}; V(j) := \{i\}$ 
        next for
      next for
       $L := L \setminus \{i\}$ 
    loop
  
```

#### Algorithmus 6.1: Pseudo-Code des Dijkstra-Algorithmus

Bei der Entwicklung des sogenannten A-Stern-Algorithmus stand die Idee im Fokus, die kleinstmögliche Anzahl an Knoten zu untersuchen, so dass gerade noch eine optimale Lösung gefunden wird. Beim Abwegen der kleinstmöglichen Anzahl an zu untersuchenden Knoten ist dabei zwischen Knoten zu unterscheiden, die offensichtlich nicht Teil des kürzesten Weges sein können und Knoten, die eventuell Teil des kürzesten Weges sein können.

Ein effizienter Algorithmus, der dem Dijkstra-Algorithmus sehr ähnlich ist, benötigt eine Möglichkeit, einschätzen zu können, welcher Knoten als nächstes untersucht werden soll. Dazu arbeitet der A-Stern-Algorithmus mit einer Schätzfunktion, anhand derer die Menge der markierten Knoten sortiert wird. Die Schätzfunktion für einen Knoten setzt sich dabei aus zwei Bestandteilen zusammen. Der erste Summand ist die Summe der Kantengewichte des für diesen Knoten bis jetzt gefundenen kürzesten Weges. Der zweite Summand ist eine Abschätzung der minimalen Restkosten vom aktuellen Knoten zum Zielknoten. Ist der Zielknoten markiert und weist die

aktuell geringste Schätzfunktion auf, so kann der Algorithmus beendet werden /HAR-1968/.

Ist die Abschätzung der minimalen Restkosten eine untere Schranke der tatsächlichen Restkosten, wird der A-Stern-Algorithmus eine optimale Lösung liefern. Die Gestaltung der Schätzfunktion ist im A-Stern-Algorithmus die eigentliche Herausforderung und hängt stark vom Einsatzgebiet ab. Für das Auffinden eines kürzesten Weges durch ein Straßennetz kann als Schätzung für den minimalen Restweg die Luftlinie herangezogen werden. Soll der kürzeste Weg auf der Basis von Reisezeiten gefunden werden, kann die Luftlinie mit einer maximalen Reisegeschwindigkeit multipliziert werden.

Die in jeder Iteration notwendige Sortierung der Liste der markierten Knoten ist die wesentliche Schwäche des Dijkstra-Algorithmus. Um den Suchaufwand zu verringern, wurden effizientere Datenstrukturen entwickelt. So ist die Idee von Buckets, die vorläufigen Marken in Teilmengen aufzuteilen und statt der aufwendigen Minimumbestimmung die Elemente des kleinsten Buckets in beliebiger Reihenfolge abzuarbeiten. Da auch bei dieser Vorgehensweise sichergestellt werden muss, dass für einen untersuchten Knoten der kürzeste Weg bekannt ist, darf durch keinen Knoten eines Buckets eine Verbesserung eines anderen Knotens desselben Buckets erreicht werden.

Eine derartige Prämisse stellt bestimmte Anforderungen an die Größe der einzurichtenden Buckets und damit auch an deren Anzahl. Die Größe der Buckets wird durch die kleinste Kantenbewertung bestimmt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Nachfolger eines untersuchten Knotens nicht in dasselbe Bucket einsortiert werden können. Die Anzahl Buckets, die gleichzeitig mit Knoten belegt sein kann, wird durch das Verhältnis aus maximaler zu minimaler Kantenbewertung bestimmt. Damit ist die Effizienz dieser Datenstruktur im Wesentlichen von der Struktur des Netzwerkes abhängig /GRÜ-2005a/.

### **6.3.2.2 Label-Correcting-Verfahren**

Im Gegensatz zu den Label-Setting-Verfahren, können bei den Label-Correcting-Verfahren einmal geprüfte Knoten erneut markiert werden, wenn eine bereits gefundene kürzeste Entfernung weiter verringert werden konnte. Während bei einem

Label-Setting-Verfahren bei der Überprüfung eines Labels sicher gestellt sein muss, dass für den Knoten bereits der kürzeste Weg bekannt ist, kann bei Label-Correcting-Verfahren auf diese Forderung verzichtet werden. Da die aktuelle Entfernung bei der Auswahl der zu überprüfenden Knoten keine Berücksichtigung finden muss, entfällt bei den Label-Correcting-Verfahren eine Sortierung, die beispielsweise im Dijkstra-Algorithmus in jeder Iteration vorgenommen werden muss. Der Nachteil liegt in einer u. U. wiederholten Prüfung von bereits überprüften Knoten.

Die Grundformulierung der EDV-Prozedur von Ford ist, ein Netzwerk mit ausschließlich positiven Kantenbewertungen nach Knoten-Paaren zu durchsuchen, für die  $c_i + c_{e(ij)} < c_j$  gilt. Für den Fall, dass ein solches Knotenpaar gefunden wird, ist  $c_j$  durch  $c_i + c_{e(ij)}$  zu ersetzen. Dabei wird das Netzwerk mit  $c_o = 0$  und  $c_i = \infty$  für alle  $j \in P \setminus \{o\}$  initialisiert. Wenn keine Kanten  $e(ij)$  mehr gefunden werden, die die o. g. Bedingung erfüllen, ist für alle  $c_j$  der minimale Wert gefunden und der Algorithmus wird beendet /FOR-1956/.

```

(Initialisierung)
   $c_o := 0; V(o) := \{0\}; c_i := \infty \forall i \in P \setminus \{o\}; Q := \{o\};$ 
(Schleife)
  do until  $Q = \{\}$ 
     $i := Q[SK]$ 
     $Q := Q \setminus \{i\}$ 
    for  $j \in N(i)$  mit  $c_j > c_i + c_{e(ij)}$  do
       $c_j := c_i + c_{e(ij)}; V(j) := \{i\}$ 
      if  $j \notin Q$  then
         $Q := Q \cup \{j\}$  mit  $j = Q[SE]$ 
    next for
  loop

```

#### Algorithmus 6.2: Pseudo-Code des FIFO-Algorithmus

Die Implementierung eines Label-Correcting-Verfahrens kann unter anderem mit der Speicherung der so genannten Kandidaten in einer Queue  $Q$  erfolgen. Bei einer solchen Queue oder auch Schlange besteht der Zugriff am Schlangenkopf  $SK$  und am Schlangenende. Neu ermittelte Knoten werden am Schlangenende  $SE$  eingefügt. Der als nächstes zu überprüfende Knoten wird am Schlangenkopf entnommen /BRA-1971/. Die Zugriffsweise auf die Kandidaten erfolgt somit nach dem FIFO-Prinzip (Algorithmus 6.2).

Die Verwaltung der Kandidatenliste kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Neben der Nutzung einer einfachen Queue, wie im FIFO-Algorithmus, kann die Speicherung der Kandidaten auch in einer so genannten Dequeue erfolgen. Hierbei handelt es sich um eine double-ended Queue, in die die Nachfolger entweder am Schlangenanende oder am Schlangenkopf eingefügt werden können. Die Nachfolger, für die erneut eine Reduzierung erreicht werden konnte, werden am Schlangenkopf eingefügt. Der Grund für diese Vorgehensweise liegt darin, dass es sinnvoll erscheint, nach der Verbesserung eines bereits entwickelten Baumes auch die Entfernung der Nachfolger zu korrigieren. Eine Variante dieser Vorgehensweise wird erreicht, wenn statt einer Dequeue eine 2-queue verwendet wird. Damit werden die zum wiederholten Male in die Kandidatenliste aufgenommenen Knoten nicht am Schlangenkopf einer Dequeue eingefügt, sondern am Schlangenanende der ersten Schlange. Die erstmals markierten Knoten werden weiterhin am Schlangenanende der zweiten Schlange platziert /DOM-1995/.

Weitere Möglichkeiten bei der Gestaltung der Kandidatenliste ergeben sich, wenn die Bewertung der Knoten mit einbezogen wird. Im TRESH-Algorithmus nach Glover werden die Kandidaten in den beiden Listen „NOW“ and „NEXT“ gespeichert. Die Überprüfung der Kandidaten erfolgt aus der NOW-Liste nach dem FIFO-Prinzip. Die Einsortierung wird anhand der ermittelten Kosten des Knotens vorgenommen. Hierbei bestehen die beiden Alternativen, entweder neu in die Kandidatenliste aufgenommene Knoten grundsätzlich in der NEXT-Liste oder bei Unterschreiten eines Grenzwertes in der NOW-Liste zu speichern. Die NOW-Liste wird so lange abgearbeitet, bis sie leer ist. Dann wird ein neuer Grenzwert bestimmt und anhand dieses Grenzwertes werden die Werte der Kandidaten aus der NEXT-Liste in die NOW-Liste überführt /GLO-1984/.

### 6.3.2.3 Multikriterielle Verfahren

Bei der Bestimmung kürzester Wege ist eine eindimensionale Lösungssuche in praktischen Problemstellungen oftmals nicht hinreichend. So findet bei der Nutzung einer Kante  $e(ij)$  oftmals ein Verbrauch mehrerer Ressourcen statt. Neben den Kosten, die häufig die zu minimierende Zielfunktion darstellen, sind in der Regel auch Zeiten, Kapazitäten, Entfernungen etc. zu berücksichtigen. Insbesondere die Res-

source Zeit stellt eine besonders wichtige Nebenbedingung in Transportsystemen dar.

Kürzeste-Wege-Probleme mit Zeitfenstern, kurz SPPTW, spielen eine wichtige Rolle als Subroutine bei Tourenplanungsverfahren mit harten Zeitfensterrestriktionen /VAH-2003/. Hier wird Zeit als eine beschränkt vorhandene Ressource betrachtet. Jede Kante hat einen Zeitverbrauch von  $\Delta t_{e(ij)}$ , der immer positiv ist. Darüber hinaus wird jedem Knoten des Netzwerkes ein Zeitfenster aus frühester Ankunft  $t_i^{FAN}$  und spätester Ankunft  $t_i^{SAN}$  zugeordnet. Es kann zwischen zwei Knoten  $i$  und  $j$  nur dann eine gültige Kante existieren, wenn die Bedingung  $t_i^{FAN} + \Delta t_{e(ij)} \leq t_j^{SAN}$  eingehalten wird. Das Warten vor dem Besuch an einem Knoten ist dabei zulässig. Die Aufgabenstellung, die sich in diesem Falle stellt, ist die Bestimmung des kürzesten Weges unter Nutzung einer zulässigen zeitlichen Kantenfolge.

Im Standardfall des Kürzeste-Wege-Problems wurden negative Zyklen ausgeschlossen, da in diesem Fall keine Lösung generiert wird. Aufgrund der Tatsache, dass die Zeiten immer positiv sind, können dieselben Knoten nur in zeitlich aufsteigender Folge erneut besucht werden. Bei der Vorgabe von Zeitfenstern gibt es damit keine beliebig langen zulässigen Kantenfolgen. Die besondere Schwierigkeit des SPPTW liegt in der Unvergleichbarkeit von Wegen. Da nur im Falle einer eindeutigen Dominanz zweier Wege, der dominierte Weg vernachlässigt werden kann, müssen beim SPPTW verschiedene zulässige Wege zu einem Knoten abgespeichert und zu längeren Wegen erweitert werden. Der Begriff der Marke darf vor diesem Hintergrund nicht länger auf einen Knoten bezogen werden, sondern muss sich stattdessen auf einen konkreten Weg beziehen /GRÜ-2005a/.

Die für die Marken notwendige Differenzierung in Knoten und Pfade führt dazu, dass die für den mehrdimensionalen Fall zur Verfügung stehenden Verfahren ein weiteres Unterscheidungskriterium aufweisen. Während die so genannten Label-Selection-Verfahren in jeder Iteration ein bestimmtes Label auswählen und für dieses Label alle zulässigen, nicht dominierten Nachfolger ausgesucht werden, orientieren sich die Node-Selection-Verfahren an den Knoten. In diesem Fall wird in jeder Iteration ein Knoten aus einer Kandidatenliste ausgewählt. Anschließend werden alle Marken, die

mit diesem Knoten assoziiert sind, genutzt, um die Marken der benachbarten Knoten zu verbessern /GUE-2001/.

Bei der Suche eines optimalen Pfades im zweidimensionalen Fall kann nach dem Pfad zwischen  $o$  und  $d$  gesucht werden, der kosten- und zeitminimal ist. Da die beiden Zielfunktionen in den meisten Fällen jedoch in Konflikt geraten, wird die Schnittmenge aus kosten- und zeitminimalem Pfad in der Regel leer sein. Im eigentlichen Sinn ist damit keine optimale Lösung gegeben. Für diesen Fall kann aber mit einer Menge pareto-optimaler Pfade gearbeitet werden. Die zu dieser Menge gehörenden Pfade erfüllen die Eigenschaft, dass es für sie keinen Vergleichspfad gibt, der früher oder zu geringeren Kosten ankommt, ohne gleichzeitig beim jeweils anderen Kriterium zu einer Verschlechterung zu führen. Bei einer Optimierung müssen diese nicht dominierten Lösungen berücksichtigt werden /CLI-1982/. Es wird auch von der effizienten Teilmenge der Marken  $Eff(L_i)$  gesprochen.

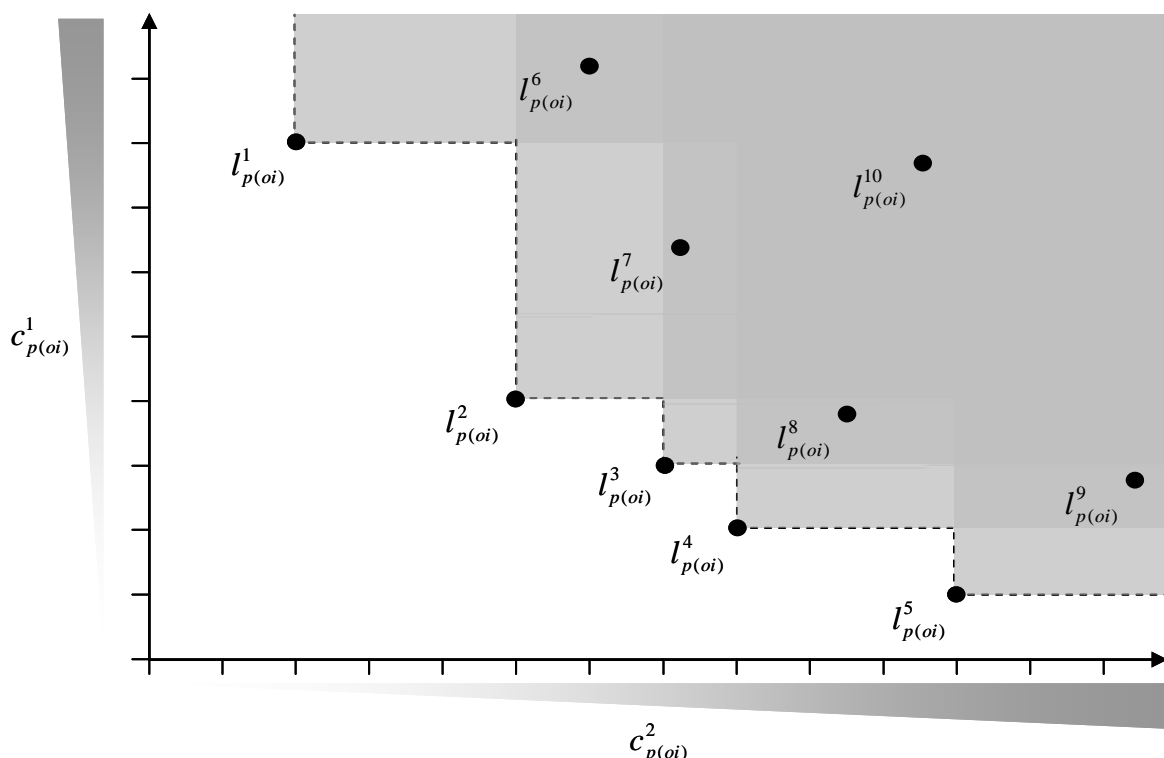


Bild 6.2: Label in multikriteriellen Verfahren

Die eindeutige Marke eines Pfades erfolgt über die Darstellung  $l_{p(oi)}$ . Die Bewertung der Marke erfolgt mit einem Vektor, wobei  $c_{p(oi)}^k$  die einzelnen Bewertungen anhand von Merkmal  $k$  sind, die sich aus den Bewertungen  $c_{e(ij)}^k$  der genutzten Kanten

ergeben. Im dargestellten Beispiel sind die Label eins bis fünf pareto-optimal (Bild 6.2). In multikriteriellen Verfahren müssen diese Label weiter untersucht werden. Eine Untersuchung der Label sechs bis zehn kann hingegen zu keiner Verbesserung führen. Aus diesem Grund können diese Zwischenlösungen gelöscht werden.

Trotz der Unvergleichbarkeit von Marken, die zur Menge der pareto-optimalen Marken gehören, kann für die Marken mit Hilfe der lexikografischen Ordnung eine eindeutige Rangfolge gebildet werden. Eine Marke  $l_{p(o_i)}(c_{p(o_i)}^1, \dots, c_{p(o_i)}^r)$  ist dann lexikografisch kleiner als eine Marke  $l_{p'(o_i)}(c_{p'(o_i)}^1, \dots, c_{p'(o_i)}^r)$ , wenn für ein bestimmtes  $k \in \{1, \dots, r\}$   $c_p^k < c_{p'}^k$  gilt, während für alle in der Ordnung vorgelagerten Paare gilt, dass sie gleich sind, also  $c_p^1 = c_{p'}^1, \dots, c_p^{k-1} = c_{p'}^{k-1}$ .

Die lexikografische Ordnung, wie sie auch von Martins angewendet wird (Algorithmus 6.1), wird auch im mehrdimensionalen Fall durch ein Label-Setting-Algorithmus, ähnlich dem Algorithmus nach Dijkstra, erreicht. Hierbei wird allerdings zum einen zwischen permanenten  $L_i^{perm}$  und vorläufigen Marken  $L_i^{temp}$  unterschieden, des Weiteren wird in den Marken neben dem jeweiligen Vorläuferknoten auch dessen eindeutige Markennummer mitgeführt. Nur auf diese Weise kann im Anschluss an den Algorithmus der zugehörige Pfad eindeutig rekonstruiert werden /MAR-1984/.

(Initialisierung)

$$L_o^{temp} := \{[(0,0,\dots,0), (o,-,-)]\}$$

(Schleife)

do until  $L^{temp} = \{ \}$

wähle  $l_{p(o_i)}$  mit  $l_{p(o_i)} = \min_{l_{p(o_i)} \in L^{temp}} c_{p(o_i)}^k$

$$L_i^{perm} := L_i^{perm} \cup \{l_{p(o_i)}\}$$

for  $j \in N(i)$  do

$$c_{p(o_j)}^k = c_{p(o_i)}^k + c_{e(ij)}^k \text{ für alle } k \in \{1, \dots, r\}$$

$$L_j^{temp} := L_j^{temp} \cup \{[(c_{p(o_j)}^1, \dots, c_{p(o_j)}^r), (j, i, l)]\}$$

$$L_j^{temp} := \text{Eff}(L_j^{temp})$$

next for

$$L^{temp} := L^{temp} \setminus \{l_{p(o_i)}\}$$

loop

Algorithmus 6.3: Multikriterielles SPP

Desrochers beschreibt in seinem Algorithmus für das SPPTW ein ähnliches Vorgehen unter Nutzung von Buckets, um den Suchaufwand des lexikografischen Minimums zu verringern. In seinem Algorithmus muss nicht bei jeder Untersuchung einer vorläufigen Marke das lexikografische Minimum bestimmt werden. Zu Beginn einer Hauptschleife wird ein lexikografisches Minimum der vorläufigen Marken ermittelt. Dann wird die obere Schranke des aktuellen Buckets berechnet, in dem bei positiven Zeitverbräuchen sichergestellt ist, dass es innerhalb des Buckets zu keinen Verbesserungen kommen kann.

Auf diese Weise können die vorläufigen Marken des Buckets ohne weitere lexikografische Sortierung abgearbeitet werden. Eine Variante der Vorgehensweise stellt die Einteilung der Datenstruktur in zeitfensterorientierte Buckets und knotenorientierte Untermengen dar. In diesem Fall müssen bei der Effizienzbestimmung nur die den Knoten betreffenden Untermengen durchsucht werden. Dies stellt insbesondere bei großen Netzen eine Verbesserung dar /DES-1988/.



## **7 Modellkonzeption zur ganzheitlichen Transportplanung**

In diesem Abschnitt wird die Modellkonzeption zur Transportplanung entwickelt. Die für die Umsetzung in einem rechnergestützten Planungsmodell notwendigen Grundlagen werden ausführlich hergeleitet und dargestellt. Dazu werden die wesentlichen Anforderungen und Planungsaufgaben definiert. Anschließend wird die Struktur des Problems formuliert und die Idee des entwickelten Planungsansatzes dargestellt, bevor die Eingangsgrößen und die einzelnen Module im Detail erläutert werden. Dieses Kapitel endet mit der Darstellung einer Alternative für den Einsatz zeitexpanderter Graphen, die durch die gewählte Heuristik möglich wird.

### **7.1 Anforderungen an das Planungsmodell**

Für eine große Anzahl von Aufträgen soll der kostenminimale Weg von Quellen zu Senken durch ein vollständig beschriebenes Netzwerk ermittelt werden. Das Optimierungsproblem wird aus Sicht einer Spedition angegangen, die das Netzwerk steuert. Die Transportnachfrage wird durch die Kunden exogen vorgegeben. Die den Kunden offerierten Preise für den Transport sind unabhängig von der ermittelten Lösung. Damit steht in der Zielformulierung dieses operativen Planungsproblems die Kostenminimierung im Mittelpunkt.

Im ersten Schritt besteht das Netzwerk aus zeitlich festgelegten Linienverkehren. Die hierfür eingesetzten Fahrzeuge dürfen heterogene Kapazitäten aufweisen. Für eine realitätsnahe Betrachtung sollen mehrere Kapazitätsdimensionen berücksichtigt werden, die Aufteilung der Transporte auf mehrere Verkehrsmittel wird nicht zugelassen weiterhin können die Transporte mehrfach gebrochen erfolgen.

Darüber hinaus kann das Sammeln und Verteilen der Sendungen über verschiedene Depots erfolgen. Die Größe der Sendungen variiert. Die Sendungen sind aber in jedem Fall kleiner als die Fahrzeugkapazitäten, so dass eine Konsolidierung von Sendungen erfolgen kann. Die Sendungen weisen individuelle Zeitfenster auf, die zwingend eingehalten werden müssen. Die Repositionierung von Verkehrsmitteln oder Transporthilfsmitteln ist nicht Bestandteil des vorliegenden Modells. In den nachfolgenden Abschnitten werden einige wesentliche Anforderungen detailliert beschrieben.

### 7.1.1 Kostenorientierung

Gängige Strukturen von Konditionen in der speditionellen Praxis sind im Regelfall eine Funktion von Entfernung und Sendungsgröße. Um eine Handhabbarkeit in der Praxis zu gewährleisten, wurden abschnittsweise definierte lineare Funktionen eingeführt. Diese Funktionen resultieren aus Tariftabellen, in denen klassenweise für definierte Entfernungen und Sendungsgrößen Frachtraten angegeben werden. Die Entfernungsklassen haben im Nahbereich eine geringe Klassengröße, beispielsweise von 5 km, während die Klassengröße im Fernbereich bei 50 km bis 100 km liegen kann. Die Klassifizierung der Sendungsgröße erfolgt nach Lademetern oder häufiger nach Sendungsgewicht.

Nach dem Wegfallen des GFT, der in dieser Form definiert war, mussten die Speditionen eigene Haustarife definieren, die oftmals eine ähnliche Struktur aufweisen. Es gibt allerdings auch weiterhin unverbindliche Tabellenwerke, wie die „Kostensätze Gütertransport Straße“ oder „Güterfernverkehrsentgelte“, die eine dem GFT ähnliche, gewichtsabhängige Struktur aufweisen bzw. sogar auf ihm beruhen /KGS-2007/.

Tabelle 7.1: Auszug der Güterfernverkehrsentgelte, Frachttafeln für Stückgut

Entfernung in km		Ausgerechnete Frachten in € im Frachtpflichtigen Gewicht von Kilogramm				
von	bis	1 bis 20	101 bis 120	201 bis 220	551 bis 600	901 bis 1.000
1	30	5,98	10,49	15,19	30,10	43,37
101	120	7,42	18,26	29,74	61,77	91,72
301	320	10,13	32,88	57,06	121,96	182,66
501	525	12,05	43,51	76,89	164,47	248,00
1.001	1.100	14,83	57,92	103,93	232,24	338,58
1.401	1.500	16,41	66,54	120,11	258,77	393,00

Die in Tabelle 7.1 exemplarisch aufgeführten Frachten sind den Güterfernverkehrsentgelten des Jahres 2008 entnommen, wobei es sich um eine Sammlung unverbindlicher Frachtvereinbarungstabellen für den Güterfernverkehr handelt. In den Frachttafeln für Stückgut werden Frachten ausgewiesen und jährlich fortgeschrieben, die auf dem GFT basieren. Für das Jahr 2008 wurde gegenüber dem letzten Stand des GFT vom 01.01.1992 eine allgemeine Preissteigerung von 39,5 % zugrunde gelegt /GVE-2008/.

Die konkrete Gestaltung von Tarifen kann von der in Tabelle 7.1 dargestellten Form abweichen. So nutzt z. B. die Spedition Herbert Voigt GmbH & Co. KG, die als Gesellschafter von Unitrans Sammelladungen über eine Speditionskooperation abwickelt, in der auf ihrer Internetseite veröffentlichten Tariftabelle für Stückgut eine Einteilung in kg und Versandzonen. Die nationalen Postleitzahlenbereiche von 01 bis 99 wurden dafür in zehn Zonen eingeteilt /VOI-2008a/. Für Teil- und Ganzladungen nutzt dieselbe Spedition 18 Versandzonen, teilt aber die Sendungsgrößen nach Anzahl Paletten bzw. Lademetern ein /VOI-2008b/.

Grundsätzlich können zonenbasierte Tabellen nur für Sendungen mit Versandort in der Nähe eines Depots des Versandspediteurs gelten. Die ausgewiesenen Tarife sind darüber hinaus in der Regel zzgl. Maut und neuerdings teilweise auch zzgl. eines Dieselszuschlages zu verstehen. Anstatt eines statischen Dieselszuschlages wird vor dem Hintergrund der hohen Dynamik bei der Entwicklung des Kraftstoffpreises wieder mit Floater-Modellen gearbeitet, die es bereits während der Energiekrise in den 70er Jahren gegeben hat. Hierbei wird der Kraftstoffzuschlag monatlich an die Preisentwicklung des Kraftstoffes angepasst /LUD-2008/.

Abschnittsweise linear definierte Kosten- oder Preisfunktionen für die Transportwirtschaft bestehen aus einer Menge an Bereichen  $R$ . Sie können unterschiedliche Verläufe aufweisen (Bild 7.1). Bei Typ A handelt es sich um eine grafische Darstellung von Tariftabellen. Bei der Darstellung wurde die Unterscheidung in tatsächliches Gewicht und frachtpflichtiges Gewicht vernachlässigt und eine Verstetigung der Frachtfunktion innerhalb der Klasse unterstellt. Das bedeutet, dass das tatsächliche Gewicht in jeder zugehörigen Klasse mit einem Frachtsatz pro Gewichtseinheit multipliziert wird. Die Frachtfunktion ist damit nicht stetig. Da die Frachtsätze im Regelfall mit zunehmendem Gewicht abnehmen, kommt es bei den Klassengrenzen dazu, dass der Frachtsatz für Relation  $e$  an der Untergrenze  $U_e^r$  von Klasse  $r$  unter dem Frachtsatz mit der Obergrenze  $O_e^{r-1}$  von Klasse  $r-1$  liegt. Aus diesem Grund findet diese einfach zu handhabende Struktur oftmals keine Akzeptanz bei Versendern.

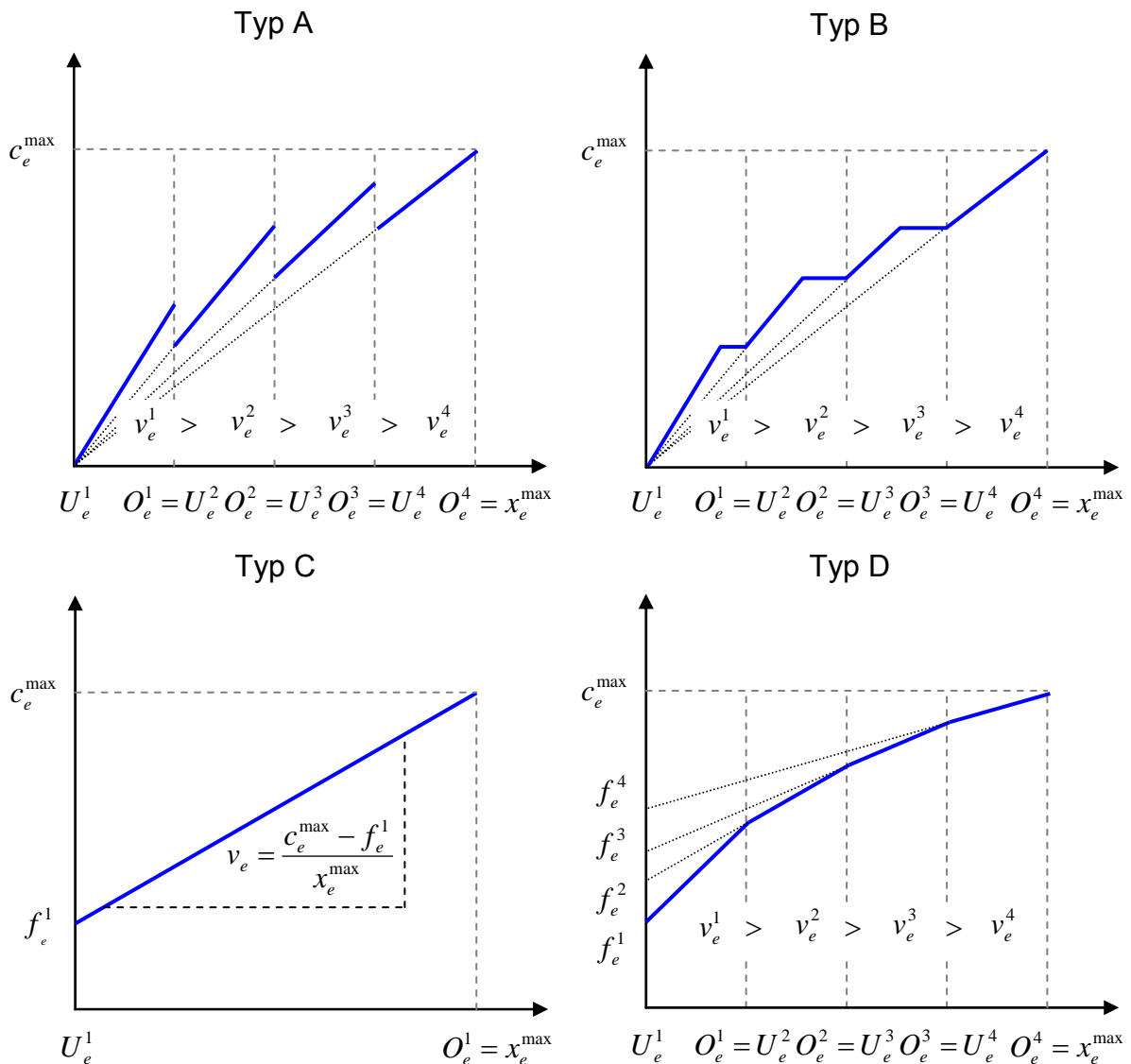


Bild 7.1: Gängige Strukturen von Konditionen

Darüber hinaus führt eine solche Kostenstruktur bei der seriellen Abarbeitung eines Auftragspools auch vor dem Hintergrund der einzusetzenden Algorithmen zu Problemen. In den Klassenübergangsbereichen kann es für zusätzliche Sendungen zu negativen Kantenbewertungen kommen. Bei negativen Kantenbewertungen führen zum einen Abbruchbedingungen wie beim Dijkstra-Algorithmus zu Fehlern. Zum anderen kann es zu negativen Zyklen kommen.

Typ B trägt dem schwerwiegenden Mangel von Typ A Rechnung, indem sogenannte Schnittgewichte eingeführt werden. Das Schnittgewicht einer Klasse  $r$  ist so bestimmt, dass das Produkt aus Schnittgewicht und Frachtsatz pro Gewichtseinheit der Klasse dem Frachtsatz der Untergrenze von Klasse  $r + 1$  entspricht. Ab dem Schnitt-

gewicht von Klasse  $r$  bis zur Untergrenze von Klasse  $r+1$  wird lediglich das Schnittgewicht abgerechnet.

Bei Typ C handelt es sich um eine einfache lineare Funktion mit einem Fixkostenanteil, in dem beispielsweise Abschreibungen des Fahrzeuges oder die Personalkosten enthalten sind. Weiterhin ist ein gewichtsabhängiger Anteil gegeben, der in einem Mehrverbrauch an Kraftstoff oder erhöhten Abschreibungen des Fahrzeuges begründet sein kann. In der betrieblichen Praxis wird in der Regel von einem hohen Fixkostenanteil und einer geringen Steigung des variablen Anteils ausgegangen. Bei Typ C handelt es sich um einen Spezialfall von Typ D mit der Klassenanzahl eins.

Bei Typ D handelt es sich um eine abschnittsweise definierte, konkave Kostenfunktion /BAL-1989/. Sie ist von den hier vorgestellten Funktionen für die Versender die schlüssigste, da für alle Gewichte positive Grenzkosten gegeben sind. Darüber hinaus kann mit dieser Funktion aus Sicht des Frachtführers auch das Risiko eines Leeranteils abgebildet werden und ein Anreiz für die Sendungsbündelung gegeben werden. Da für jede Klasse nicht nur ein Frachtsatz pro Gewichtseinheit, sondern auch ein Fixkostensatz berücksichtigt werden muss, ist dieser Typ aufwendiger zu berechnen und in der Praxis nicht gebräuchlich.

Die Art der Kostenfunktion muss in Abhängigkeit vom Planungshorizont ausgewählt werden. Für Planungsaufgaben auf der taktischen Planungsebene müssen Vollkosten angesetzt werden. Bezieht man sich auf operative Planungsaufgaben, dürfen nur die Kostenbestandteile angesetzt werden, die kurzfristig auch beeinflussbar sind. Bei der Planung eigener Fahrzeuge spielen zeitliche Abschreibungen keine Rolle. Nutzungsabhängige Abschreibungen bezogen auf die Laufleistung in km oder eventuell tkm sind allerdings zu berücksichtigen. Beim Personaleinsatz ist abzuwägen, ob die Mitarbeiter durch die Nutzung von Zeitkonten im Rahmen der gesetzlichen Bestimmungen flexibel eingesetzt werden können. Nutzungsabhängige Größen sind z. B. der Verbrauch an Kraftstoff oder Betriebsstoffen sowie Verschleißteile und die Maut.

Bei taktischen sowie operativen Planungsaufgaben können neben dem Einsatz von eigenen Fahrzeugen auch Drittanbieter berücksichtigt werden. Für die Drittanbieter stellt sich die Situation einfacher dar, da die Kosten für Drittanbieter mit Ausnahme von Kontrakten beschäftigungsvariabel sind. Damit können die Preisfunktionen, die

von den Drittanbietern für Relationen zur Verfügung gestellt werden, eins zu eins in das jeweilige Planungsmodell übernommen werden.

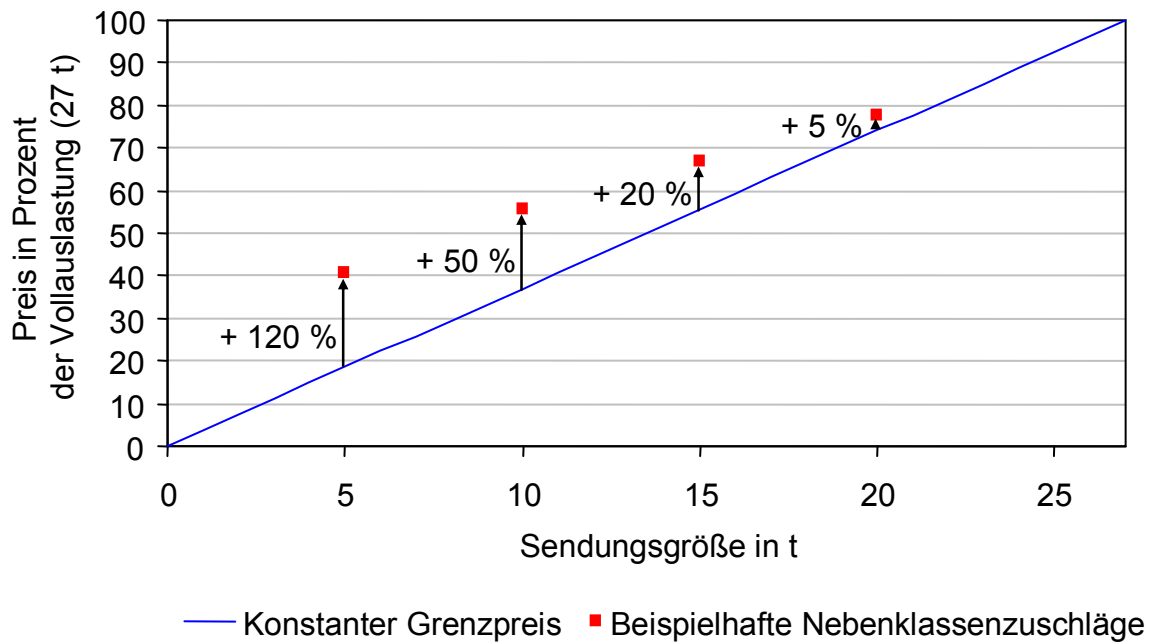


Bild 7.2: Mengenstaffeln auf Basis von Nebenzuslägen

Typischer Weise sind diese Preisfunktionen degressiv, so dass die durchschnittlichen Kosten einer transportierten Größeneinheit mit jeder zusätzlich transportierten Einheit abnehmen /SCH-2005/. Degressive Preisfunktionen resultieren aus Mengenstaffeln, die den Auslastungsgrad eines Fahrzeuges berücksichtigen. Der günstigste Preis ergibt sich dabei durch die Vollaustattung mit einer Sendung. Alle niedrigeren Ladungsgewichte werden mit Nebenzuslägen belastet (Bild 7.2) /ABE-2003/.

### 7.1.2 Kapazitätsrestriktionen

Zur Durchführung eines bestimmten Transportauftrages dürfen die einzelnen Elemente des Transportnetzwerkes nur dann ausgewählt werden, wenn genügend Kapazität bezogen auf die Sendungsgröße zur Verfügung steht. Auf den einzelnen Verkehrsmitteln muss im Hinblick auf Gewicht, Laderaumvolumen und Ladefläche ausreichend Kapazität zur Verfügung stehen. Diese Begrenzungen resultieren entweder aus physikalischen Barrieren oder gesetzlichen Bestimmungen, wie es bei Lastkraftwagen in Deutschland durch die Straßenverkehrsordnung der Fall ist.

Zwar besteht bei Sendungen oftmals eine Korrelation zwischen Volumen und Gewicht, allerdings gibt es auch Abweichungen, die es zu berücksichtigen gilt. So haben Auto- und Maschinenteile ein, gemessen am Volumen, hohes Gewicht, während für Güter wie Textilien das Laderaumvolumen die Kapazitätsrestriktion darstellt. Sendungen, die durch ein großes Gewicht eine hohe Gesamtauslastung erzeugen, können durch Sendungen mit geringem Gewicht und hohem Volumen sinnvoll ergänzt werden, um eine optimale Kapazitätsauslastung beider Kriterien zu erzeugen. Ist ein Verkehrsmittel beispielsweise mit einer Kapazität von 10.000 kg und 10 Lademetern ausgestattet, ist es mit einer Sendung von 9.000 kg und 1 Lademeter bereits zu 90 % ausgelastet. Die gleiche Auslastung wird mit einer Sendung von 1.000 kg und 9 Lademeter erreicht. Werden nun beide Sendungen konsolidiert, entsteht eine optimale Auslastung.

Während sich der Umgang mit dem Kriterium Gewicht bezogen auf die Einhaltung der Kapazitätsgrenzen unproblematisch darstellt, ist der Umgang mit Laderaumvolumen und Ladefläche schwieriger. Ohne den Einsatz einer rechenintensiven Stauraumoptimierung ist es nicht möglich, die Kapazität eines Fahrzeuges bestmöglich auszulasten. Für die Durchführung einer echten Stauraumoptimierung müssen neben dem Volumen und der Grundfläche des Verkehrsmittels sowie der einzelnen Sendungen auch die konkreten Abmessungen bekannt sein. Schon aufgrund der Abmessungen ist eine 100 %ige Volumennutzen nicht realisierbar. Einen weiteren Aspekt stellt die Stapelfähigkeit der LE dar. Es kann dabei in LE, auf die etwas gestapelt werden darf und LE, die auf eine andere LE gestapelt werden können, unterschieden werden. Darüber hinaus gibt es LE, die z. B. aufgrund ihrer Höhe nicht gestapelt werden können.

Moura stellt Ansätze zur Berücksichtigung der Stauraumoptimierung im Rahmen des VRPTW vor /MOU-2008/. Aufgrund der komplexeren Problemstruktur ist der Rechenaufwand für eine Stauraumoptimierung im Rahmen der zu entwickelnden Heuristik nicht zu leisten. Um die freien Kapazitäten der Verkehrsmittel auch mit geringem Berechnungsaufwand gut abschätzen zu können, sollte neben dem Kriterium Gewicht allerdings mindestens eine zweite Dimension Berücksichtigung finden. Zur Auswahl stehen Angaben, wie Volumen, Fläche, Lademeter sowie Standardladeeinheiten /BUG-1999/. In jedem Fall müssen Annahmen über die tatsächliche Kapazität des Verkehrsmittels getroffen werden.

Während in Hinsicht auf das Volumen immer ein Nutzungsgrad von unter 100 % realisiert wird, kann beispielsweise hinsichtlich der Flächennutzung von einem Nutzungsgrad von mehr als 100 % ausgegangen werden. So können aufgrund der Stapelfähigkeit standardisierter Ladehilfsmittel, wie Flach- oder Gitterboxpaletten, auf einen Sattelaufleger mit 34 Palettenplätzen nach DIN EN 13698-1 oftmals 40 und mehr Paletten verladen werden.

Auch die Umschlagsknoten stellen Ressourcen mit beschränkten Kapazitäten dar. Dies betrifft zum einen die Anzahl Verladetore, die gleichzeitig zur Verfügung stehen, darüber hinaus aber auch die Verlade- und Sortierkapazität sowie Pufferflächen. Im Rahmen der folgenden Ausführungen werden die Kapazitäten der Umschlagsknoten, die im Wesentlichen im Rahmen der taktischen Planung von Bedeutung sind, vernachlässigt.

### **7.1.3 Zeitrestriktionen**

In jedem Fall muss der vollständige Transport einschließlich aller Umladevorgänge innerhalb der durch den Auftrag vorgegebenen zeitlichen Restriktionen durchgeführt werden. Im Regelfall werden durch die Kunden eine früheste Abfahrt sowie eine späteste Ankunft vorgegeben. Eine frühere Ankunft beim Empfänger wird dabei nicht angestrebt, da sich ein solcher zeitlicher Vorteil nicht in monetären Größen erfassen lässt. Für Versender bzw. Empfänger, die mit Zeitfenstern arbeiten, werden darüber hinaus eine späteste Abfahrt und eine früheste Ankunft gefordert.

Jeder Transportauftrag wird durch eine Kombination aus einzelnen Diensten, die im Netzwerk bereitgestellt werden, abgewickelt. Bei den Diensten handelt es sich zum einen um Transportrelationen zwischen Umschlagsknoten des Netzwerkes und zum anderen um den Güterumschlag innerhalb der Umschlagsknoten. Linienverkehre, wie sie in der Praxis häufig zwischen Depots in einem Transportnetzwerk eingerichtet werden, folgen einem regelmäßigen Fahrplan. In einem solchen Fahrplan sind für jede Transportrelation Abfahrts- und Ankunftszeiten hinterlegt. Abgesehen von der Unsicherheit hinsichtlich der Einhaltung des Fahrplans, beispielsweise aufgrund verkehrs- oder fahrzeugbedingter Verzögerungen, wird das Netzwerk durch diese Fahrpläne besser planbar.



Eine weitere Möglichkeit besteht in Transportrelationen, die zu Beginn der Planung nicht zeitlich determiniert sind. Diese Transportrelationen stehen hinsichtlich der Kapazität nach zur Verfügung, sind aber zeitlich noch nicht oder noch nicht vollständig festgelegt. Für diese Transportrelationen muss eine Fahrdauer bekannt sein.

Während für die Relationen zwischen den Depots standardmäßige Verkehre angelegt werden können, ist es nicht für jeden einzelnen Versender bzw. Empfänger möglich, Relationen zu den einzelnen Depots dauerhaft zu speichern. Für die Vor- und Nachläufe müssen damit die Zeitverbräuche für die Anbindung an das Netzwerk geschätzt werden.

Die Umschlagsknoten werden zunächst anders als beispielsweise im Kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern und nicht mit sogenannten Slots belegt. Eine spätere Erweiterung des Modells ist möglich, jedoch ohnehin nur für nicht terminierte Transportrelationen relevant. An den Umschlagsknoten muss der Zeitbedarf des Umschlages berücksichtigt werden, da ankommende und abgehende Transportrelationen nur dann nacheinander genutzt werden können, wenn die notwendigen Umschlagsvorgänge zwischen Ankunfts- und Abfahrtszeit realisierbar sind.

#### **7.1.4 Depotumschlag**

Wie in Abschnitt 7.1.3 bereits angedeutet, muss bei der Bestimmung des optimalen Weges neben den Kosten und der Dauer der reinen Wegstrecke auch der Umschlag an den Knoten berücksichtigt werden. Da der Aufwand beim Umladen erheblich ist, wird auf diese Weise auch verhindert, dass die Transportkette zwischen Absender und Empfänger aus zu vielen Relationen zusammengesetzt wird. Der zeitliche Aufwand des Be- und Entladens der Fahrzeuge ist abhängig von der umgeladenen Gütermenge und dem spezifischen Zeitverbrauch beim Be- und Entladen.

Für das Be- und Entladen, das üblicherweise mit Gegengewichtsstaplern oder Elektroechselniederhubwagen durchgeführt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl zu bewegender LE die geeignete Basismengeneinheit darstellt. Die zu wählende Vorgehensweise bei der Berechnung der Umschlagskosten für jeden einzelnen Auftrag ist eindeutig. Um aus der Basismengeneinheit auf den monetären Aufwand zu schließen, müssen im Modell monetäre Bewertungsfaktoren hinterlegt werden. Mit diesen Sätzen, die für die Knoten individuell festgelegt werden, wird die

Basismengeneinheit multipliziert. Auf diese Weise ergeben sich die Umschlagskosten für die Sendungen. Es wird angenommen, dass zu jeder Transportrelation eine Be- und eine Entladung gehören.

Um den Zeitbedarf für das Be- und Entladen abschätzen zu können, müssen einige Annahmen getroffen werden. Da im Verkehr zwischen den Depots nicht bekannt ist, wie gut ausgelastet die einzelnen Fahrzeuge werden, sollte davon ausgegangen werden, dass die gesamte Kapazität des Fahrzeuges umgeladen werden muss. Für die Dauer des Verladens wird die Fahrzeugkapazität zu Grunde gelegt, die sich während der Berechnung nicht verändert. Ex ante ist weiterhin nicht bekannt, wie sich die Fahrzeugladung zusammensetzen wird. Die Berechnung des Zeitbedarfes kann also nicht auf Basis der Anzahl LE erfolgen. Aus diesem Grund wurde mit der Fahrzeugfläche eine Einheit gewählt, über die sich die Be- und Entladezeit schätzen lässt. Als Basismengeneinheit zur Berechnung des Zeitverbrauches für das Be- und Entladen wird dementsprechend die Einheit  $qm$  herangezogen.

### **7.1.5 Sendungsorientierung**

In Publikationen zum SNDP werden zum Teil Probleminstanzen angeführt, bei denen mehrere zehntausend Sendungen durch die entwickelten Modelle optimiert wurden. Da es sich bei den Modellen im Regelfall um Formulierungen handelt, deren Fokus auf dem inneren Transportnetzwerk liegt und nicht auf der Anbindung der Versender bzw. der Empfänger, sind nicht die durch das Netzwerk gerouteten Sendungen, sondern die an den Depots konsolidierten Ströme durch das Netzwerk die eigentlichen Modelleingangsdaten.

Durch eine vorangehende Festlegung der Sammel- bzw. Verteilregionen ist die Frage nach den richtigen Depots durch die Modelle nicht mehr zu beantworten. Für das zu entwickelnde Modell gilt, dass die einzelne Sendung betrachtet wird. Für die Versender und Empfänger steht ex ante nicht fest, über welche Depots die Sendungen tatsächlich abgewickelt werden. Das führt zum einen dazu, dass Kundenstandorte, die bei einer festen Gebietsaufteilung an der Grenze von zwei Gebieten liegen, in Abhängigkeit vom Hauptlauf dem einen oder anderen Depot zugeordnet werden können. Zum anderen besteht die Möglichkeit, bei ausgelasteten Hauptlaufkapazitäten an einem Depot auf ein anderes auszuweichen.

## 7.2 Modellansatz

Auch wenn eine exakte Lösung der vorgestellten Optimierungsaufgabe für relevante Probleminstanzen in vertretbarer Zeit nicht möglich ist, werden in Abschnitt 7.2.1 zunächst die wesentlichen Zusammenhänge des Grundmodells formal beschrieben. Daran anschließend werden in Abschnitt 7.2.2 der Ansatz der heuristischen Vorgehensweise und der grundlegende Modellablauf dargelegt.

### 7.2.1 Formale Modellformulierung

Die formale Darstellung des vorliegenden Optimierungsproblems weist Parallelen zu dem in Abschnitt 6.3.1 dargestellten SNDP auf. Aufgrund der in diesem Modell gewählten Kostenfunktion sind vor allem deutliche Überschneidungen zum erwähnten Modell von Balakrishnan gegeben. Die Berücksichtigung von Vor- und Nachläufen wird in der folgenden Modellformulierung nicht explizit herausgestellt, da dies im Wesentlichen die Definition von Quellen  $o^s$  und Senken  $d^s$  der Sendungen betrifft. Bei der Berücksichtigung von Vor- bzw. Nachläufen findet keine Auftragsaggregation auf der Depot-Ebene statt. Damit müssen nicht, wie im SNDP üblich, die Depot-Verbindungen optimiert werden, sondern es findet tatsächlich eine Optimierung auf Auftragsebene statt.

Die in Formel 7.1 aufgestellte Zielfunktion beinhaltet die variablen Kosten aller genutzten Kanten, die fixen Kosten der genutzten Kanten sowie die mengenabhängigen Handlingkosten an den Knoten. Die Minimierung erfolgt über die Zuordnung von Sendungen zu Relationen über einen Binärvektor (Formel 7.15). Die Dimension des Vektors ergibt sich dabei aus dem Produkt von Anzahl der zur Verfügung stehenden Relationen und der Anzahl an Sendungen. Für die Nutzung des hier formal aufgestellten Modells müssen alle Relationen zwischen den Knoten in Form von einzelnen Kanten mit festen Abfahrts- und Ankunftszeiten hinterlegt werden. Das gilt im Besonderen auch für alle Vor- und Nachläufe zwischen Versendern bzw. Empfängern und den Sammel- bzw. Verteildepots.

Formel 7.2 fasst die Transportmengen zu den für die Bewertung des Umschlags notwendigen Mengenangaben zusammen. Dabei werden für jeden Knoten aus der Menge der Terminals die Mengen über alle Kanten aufsummiert, die den Knoten als

Startknoten besitzen. An dieser Stelle genügt es, sich auf eine Mengeneinheit festzulegen, die für die Bewertung des Umschlags herangezogen werden soll. Formel 7.3 definiert den relevanten Auslastungsgrad für die Kostenbewertung der Relationen. Dabei wird aus den unterschiedlichen Mengeneinheiten diejenige zu Grunde gelegt, die gemessen an der Kapazität zur höchsten Auslastung führt. Dies ist notwendig, da über das Gewicht hinaus mindestens eine zweite Mengendimension zur Beschreibung der Sendungsgröße genutzt werden soll. Mit Formel 7.4 wird die Zuordnung der positiven Sendungsmengen (Formel 7.16) zu den Relationen vorgenommen.

### Zielformulierung

$$\min_{\delta_{e(ij)}^s} \sum_{e(ij)} \sum_r y_{e(ij)}^r [v_{e(ij)}^r [x_{e(ij)}^{Anteil} - U_{e(ij)}^r] + f_{e(ij)}^r] + \sum_i [h_i \sum_s x_i^s] \quad 7.1$$

mit

$$x_i^s = \sum_{e(ij) \in E_i^{Start}} x_{e(ij)}^{s,m} \quad \forall i \in \underline{T} \text{ für ein } m \quad 7.2$$

$$x_{e(ij)}^{Anteil} = \max_m \left( \frac{\sum x_{e(ij)}^{s,m}}{k_{e(ij)}^m} \right) \quad \forall e(ij) \quad 7.3$$

$$x_{e(ij)}^{s,m} = x^{s,m} \delta_{e(ij)}^s \quad \forall e(ij), s, m \quad 7.4$$

### Nebenbedingungen

$$\sum_{e(ij) \in E_j^{Ziel}} x_{e(ij)}^{s,m} - \sum_{e(ji) \in E_j^{Start}} x_{e(ji)}^{s,m} = \begin{cases} + x^{s,m} & \text{für } i = o^s \\ - x^{s,m} & \text{für } i = d^s \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall s, j \text{ für ein } m \quad 7.5$$

$$\sum_s x_{e(ij)}^{s,m} \leq k_{e(ij)}^m \quad \forall m, e(ij) \quad 7.6$$

$$y_{e(ij)}^r x_{e(ij)}^{Anteil} > U_{e(ij)}^r \quad \forall e(ij) \quad 7.7$$

$$y_{e(ij)}^r x_{e(ij)}^{Anteil} \leq O_{e(ij)}^r \quad \forall e(ij) \quad 7.8$$

$$\sum_r y_{e(ij)}^r \leq 1 \quad \forall e(ij) \quad 7.9$$

$$y_{e(ij)}^r \in \{1,0\} \quad \forall e(ij), r \quad 7.10$$

$$t_{e(ij)}^{AN} \leq t_{e(ji)}^{AB} \quad \forall e(ij) \mid \delta_{e(ij)}^s = 1 \wedge e(ji) \mid \delta_{e(ji)}^s = 1, \forall s \quad 7.11$$

$$t_{e(id)}^{AN} \leq t_s^{SAN} \quad \forall \{e(ij) \mid \delta_{e(id)}^s = 1\} \in E_d^{Ziel}, \forall s \quad 7.12$$

$$t_{e(oi)}^{AB} \geq t_s^{FAB} \quad \forall \{e(ij) \mid \delta_{e(oi)}^s = 1\} \in E_o^{Start}, \forall s \quad 7.13$$

$$\sum_{e(ij)} \delta_{e(ij)}^s > 0 \quad \forall s \quad 7.14$$

$$\delta_{e(ij)}^s \in \{1,0\} \quad \forall s, e(ij) \quad 7.15$$

$$x^{s,m} \geq 0 \quad \forall s, m \quad 7.16$$

## Variablen

- $y_{e(ij)}^r$  Binärvariable zur Aktivierung von Kostenbereich  $r$  für  $e(ij)$
- $v_{e(ij)}^r$  Variable Kosten des Transportes an  $e(ij)$  im Nutzungsbereich  $r$
- $x_{e(ij)}^{Anteil}$  Transportmenge an  $e(i, j)$  als Anteil der Kapazität
- $f_{e(ij)}^r$  Fixe Kosten des Transportes an  $e(ij)$  im Nutzungsbereich  $r$
- $h_i$  Handlingkosten an Knoten  $i$
- $x_i^s$  Handlingmenge der Sendung  $s$  an Knoten  $i$  in einer spezifizierten Einheit
- $x_{e(ij)}^{s,m}$  Menge der Sendung  $s$  an Kante  $(i, j)$  in Mengeneinheit  $m$
- $E_i^{Start}$  Menge aller Kanten, deren Startknoten  $i$  ist
- $E_i^{Ziel}$  Menge aller Kanten, deren Zielknoten  $i$  ist
- $x^{s,m}$  Menge der Sendung  $s$  in Mengeneinheit  $m$
- $k_{e(ij)}^m$  Kapazität der Kante  $e(ij)$  für Mengeneinheit  $m$
- $t_{e(ij)}^{AN}$  Ankunft von  $e(ij)$  an  $j$
- $t_{e(ij)}^{AB}$  Abfahrt von  $e(ij)$  an  $i$
- $t_s^{SAN}$  Späteste Ankunft der Sendung  $s$  beim Empfänger  $d$
- $t_s^{FAB}$  Früheste Abfahrt der Sendung  $s$  beim Versender  $o$
- $\delta_{e(ij)}^s$  Binärvariable zur Aktivierung von  $e(ij)$  als Teil des Pfades von  $s$

Mit Formel 7.5 ist die Flusserhaltungsbedingung formuliert. Außer für die Knoten, die die Quellen und Senken der Sendungen darstellen, gilt, dass die Summen der ein-

gehenden und abgehenden Flüsse sich aufheben müssen. Die Quellen weisen einen Überschuss an abgehenden Flüssen auf, der der Sendungsmenge der Quelle entspricht, während die Senken einen Überschuss an eingehenden Flüssen aufweisen. Für die Flusserhaltungsbedingung reicht es aus, mit nur einer Mengendimension der Sendungen zu arbeiten. Formel 7.14 erzwingt für jede Sendung, dass die Transportmenge mindestens einer Relation zugeordnet wird. Ohne diese Beziehung würde die Zielfunktion keine Zuordnung vornehmen und Gesamtkosten von null ausweisen.

Formel 7.6 stellt die Einhaltung der Kapazitätsrestriktionen sicher. Formel 7.7 definiert in Verbindung mit Formel 7.8 den Bereich der Kostenfunktion, der für die jeweilige Kante gültig ist. Anders als bei Balakrishnan sind die Transportmengen  $x_{e(ij)}^{\text{Anteil}}$  sowie die Bereichsgrenzen  $U_{e(ij)}^r$  und  $O_{e(ij)}^r$  in Prozent der Laderaumnutzung zu verstehen. Für Vor- und Nachlaufkanten werden kapazitierte Kanten mit einem  $U_{e(ij)}^1$  von 0 und einem hinreichend großen einheitlichen  $O_{e(ij)}^1$  angelegt. Für diesen Bereich wird nur für die variablen Kosten  $v_{e(ij)}^1$  ein positiver Wert hinterlegt. Die Fixkosten  $f_{e(ij)}^1$  werden 0 gesetzt. Formel 7.9 stellt sicher, dass für jede Relation nur maximal ein Kostenbereich gültig ist.

Formel 7.11 garantiert die Erreichbarkeit der auf einem Pfad genutzten Relationen. Für die von einer Sendung genutzten Kanten wird paarweise geprüft, ob die Ankunft der Vorgängerkante vor der Abfahrt der Nachfolgekante liegt. Dazu müssen neben einem vollständigen Fahrplan für die Linienverkehre ebenfalls die eingerichteten Kanten für Vor- und Nachläufe mit Zeitfenstern vorgegeben werden. Sinnvoll erscheint hierfür, die Kanten für die Vorläufe zum frühesten Zeitpunkt, den die Sendung zulässt, beginnen zu lassen. Die Ankunft der Kante ergibt sich anschließend aus der Kantendauer sowie der Abfahrtszeit. Die Ankunft der Kanten für die Nachläufe sollte zum spätesten Zeitpunkt, den die Sendung zulässt, an der Senke ankommen. Die Abfahrt der Nachlaufkanten ergibt sich aus der Kantendauer und der Ankunftszeit. Formel 7.11 schließt gleichzeitig Zyklen aus. Die Formeln 7.12 und 7.13 dienen dazu, die durch die Sendungen gegebene späteste Ankunft sowie die früheste Abfahrt einzuhalten.

Die Formeln 7.11, 7.12 und 7.13 verbieten den Umgang mit Zeitfenstern oder Kanten, deren zeitlicher Einsatz noch offen ist. Damit ist sowohl der flexible Einsatz eigener Kapazitäten als auch der Einsatz von nicht terminierten Fremdkapazitäten ausgeschlossen. Das Modell ist auf eine rein operative Optimierung bestehender Linienverkehre ausgelegt, was die Einsetzbarkeit signifikant einschränkt. Um im Rahmen der operativen Planung Kapazitäten zeitlich flexibel einzusetzen oder im Rahmen der taktischen Planung ein Scheduling vorzunehmen, kann mit einem zeitexpandierten Graph gearbeitet werden.

### **7.2.2 Ansatz und Ablauf der heuristischen Vorgehensweise**

Das im Folgenden dargestellte Modell beinhaltet die wesentlichen Entscheidungsdaten der Praxis. Außer Acht gelassen wurden in erster Linie soziale Elemente, wie die Interaktion von Versendern und bestimmten Frachtführern. Auch auf die Berücksichtigung von Zusammenladeverboten wurde verzichtet, da eine bestmögliche Verdichtung der Aufträge angestrebt wird. Es wird zunächst ein Überblick über den grundlegenden Ablauf des entwickelten Modells gegeben. Einzelne Berechnungsschritte werden zu Prozessen zusammengefasst und zunächst grob erläutert. Eine Übersicht über den Gesamtablauf ist in Bild 7.3 gegeben.

Aufgrund der komplexen Optimierungsaufgabe wurde zur Lösung des vorliegenden Problems auf eine heuristische Vorgehensweise zurückgegriffen. Die Aufträge werden seriell durch die entwickelte Vorgehensweise abgearbeitet, womit eine Dekomposition des Problems in Einzelaufträge erfolgt. Es wird für jeden Auftrag die zum Zeitpunkt seiner Bearbeitung optimale Lösung ermittelt. Die Lösungssuche für die Einzelaufträge findet unter Berücksichtigung aller vorangegangenen Aufträge statt. Bei gleicher Bearbeitungsreihenfolge der Sendungen berechnet die Heuristik immer die gleiche Lösung. Es werden also keine stochastischen Größen berücksichtigt. Unabhängig von den Modelleingangsdaten hängen das Ergebnis und damit auch dessen Qualität von der Auftragsreihenfolge ab.

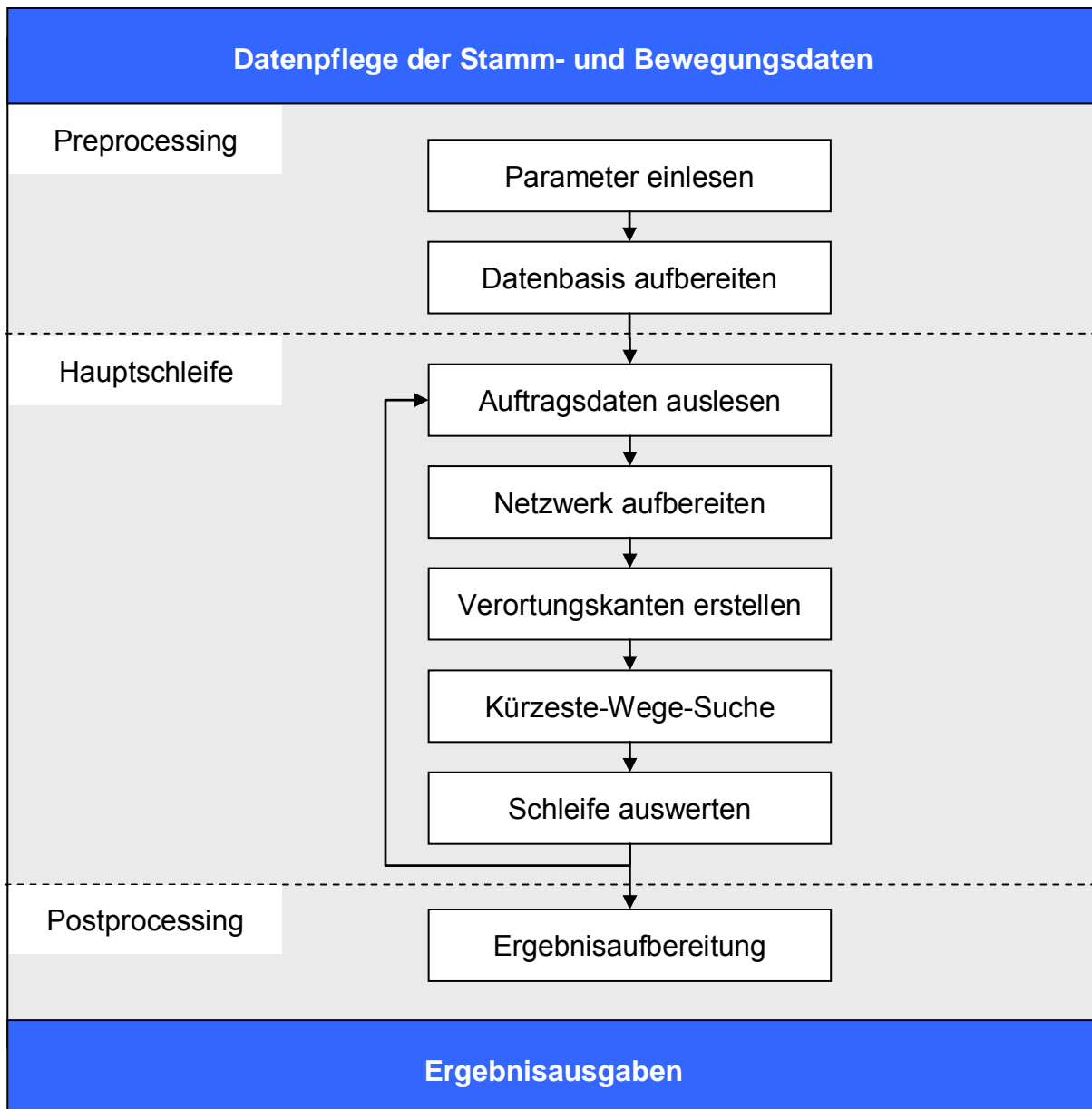


Bild 7.3: Ablauf der entwickelten Methodik zur ganzheitlichen Transportplanung

Die blau eingefärbten Bereiche „Datenpflege der Stamm- und Bewegungsdaten“ sowie „Ergebnisausgabe“ stellen aus Sicht des Optimierungsalgorithmus die Grenzen dar (Bild 7.3). Da diese Bereiche im Wesentlichen ohne Berechnungen auskommen, werden sie im Rahmen der Modellkonzeption nicht weiter erläutert.

Im Arbeitsschritt „Parameter einlesen“ werden allgemeine Parameter für die Berechnung eingelesen. Bei diesen Parametern handelt es sich um Angaben zur Auftragsortierung, um eine maximale Transportgeschwindigkeit zur Abschätzung einer minimalen verbleibenden Fahrzeit, um Angaben zur räumlichen Einschränkung des zu betrachtenden Netzes und um Parameter zur Einstellung des Routingalgorithmus.



Die Verwendung dieser Parameter wird im Rahmen der entsprechenden Arbeitsschritte erläutert.

Im Arbeitsschritt „Datenbasis aufbereiten“ werden zum einen die für die Berechnung notwendigen Datenstrukturen initialisiert. Zum anderen werden an dieser Stelle Prozesse durchgeführt, die nicht mit jedem Auftrag erneut durchgeführt werden müssen, deren Ergebnis also nicht abhängig von anderen Aufträgen ist. Hierzu gehört, für jeden Auftrag aus den Geokoordinaten von Versender und Empfänger eine Entfernung zu approximieren.

Für das hier vorliegende Modell wird davon ausgegangen, dass in der Angabe von Fahrplänen die Be- und Entladedauer bereits berücksichtigt sind. Das bedeutet, dass alle Sendungen, die auf einer Relation mit einer fahrplanmäßigen Abfahrtszeit um 16:00 Uhr mitgenommen werden sollen, für die Verladung um 16:00 Uhr bereitstehen müssen. Entsprechend stehen bei einer fahrplanmäßigen Ankunftszeit von 19:00 Uhr die Sendungen für eine anschließende Verladung um 19:00 Uhr zur Verfügung. Bei Relationen, für die zu Beginn der Berechnung noch kein exakter Fahrplan festgelegt ist, wird die tatsächliche Dauer einer Relation aus Fahrzeit und Umschlagsdauer an den Depots zusammengesetzt.

Wie bereits dargestellt wurde, hängt das Ergebnis von der Reihenfolge der Auftragsabarbeitung ab. Aus diesem Grund muss vor dem Durchlaufen der Optimierungsschleife eine zielorientierte Sortierung des Auftragspools vorgenommen werden. Neben einer einfachen Sortierung nach Sendungsgröße können hierbei auch aufwändigere Sortierungen vorgenommen werden. Auf mögliche Sortierungen wird vertiefend in Abschnitt 7.4.1 eingegangen.

Der Arbeitsschritt „Auftragsdaten auslesen“ stellt den ersten Prozess der Hauptschleife der entwickelten Methodik dar. Die im Preprocessing definierte Auftragsreihenfolge wird nun seriell abgearbeitet, wobei die in Abschnitt 7.3.1 definierten Informationen des jeweils aktuellen Auftrages zunächst eingelesen werden müssen.

Der Arbeitsschritt „Netzwerk aufbereiten“ umfasst die in den Abschnitten 7.4.3 und 7.4.4 beschriebenen Prozesse. Zunächst werden hierbei die Entfernungen der Netzwerkknoten zum Versender und zum Empfänger bestimmt. Dies ist zwar aus funktionaler Sicht nicht notwendig, ermöglicht aber insbesondere bei großen Netzwerken

eine deutliche Beschleunigung des Routings. Die anschließende Definition der Kantengewichte ist von zentraler Bedeutung, da auf dessen Grundlage das spätere Routing erfolgt. Hierbei werden die Grenzkosten der aktuellen Sendung für alle relevanten Relationen bestimmt.

Als letzter Arbeitsschritt vor der „Kürzeste-Wege-Suche“ werden Versender und Empfänger, die im Regelfall nicht Teil des permanenten Netzwerkes sind, in „Verortung“ an das Netzwerk angeschlossen. Dafür werden, wie in Abschnitt 7.4.5 beschrieben, temporäre Kanten gebildet, die am Ende der Hauptschleife wieder entfernt werden. Diese temporären Kanten stellen keine festen Verbindungen zum Netzwerk dar, sondern dienen zur Abschätzung der Kosten und der Zeitverbräuche für die Vor- bzw. Nachläufe.

Im Arbeitsschritt „Kürzeste-Wege-Suche“ wird, wie in Abschnitt 7.4.6 beschrieben, für den aktuellen Auftrag der kostenminimale Weg unter Einhaltung der Kapazitäts- und Zeitrestriktionen ermittelt. Anschließend wird der hierbei ermittelte Weg in „Schleife auswerten“ ausgewertet und dokumentiert. Hierbei spielt vor allem die Zuschreibung der Auftragsmengen zu den genutzten Kanten eine besondere Rolle. Im Zusammenhang von „Kürzeste-Wege-Suche“ und „Schleife auswerten“ ist besonders auf die für dieses Modell entwickelte „Teilterminierung von Kanten“ (Abschnitt 7.5) hinzuweisen. Erst die hier entwickelte Vorgehensweise ermöglicht den fehlerfreien Umgang mit Transportrelationen, deren genaue zeitliche Lage zu Beginn der Berechnung noch nicht festgelegt ist. Die hierfür entwickelten Routinen funktionieren auch dann ohne Einschränkung, wenn keine der Transportrelationen des Netzes einen festen Anfangs- und Endzeitpunkt aufweist. Damit wird durch dieses Modell die Fahrplanbildung aller Kanten ermöglicht.

In der „Ergebnisaufbereitung“ werden die Berechnungsergebnisse für die unterschiedlichen Planungsaufgaben der Disposition aufbereitet. Dazu zählen unter anderem das Ausweisen von Sammel- und Verteilenaufträgen je Depot, die Ladepläne der Fahrzeuge sowie Umschlagslisten. Die weitere Verdichtung der Ergebnislisten zu Kennzahlen kann vor allem zur Ergebnisbewertung genutzt werden und stellt somit ein Controllinginstrumentarium dar.

### 7.3 Beschreibung der Modelleingangsdaten

Das Fundament bei der Abbildung von Transportnetzen in mathematischen Modellen stellen die Knoten und Kanten dar. Die Knoten sind dabei zum einen die Versender und Empfänger und zum anderen die Depots, über die die Sendungen im Nahverkehr gesammelt und verteilt werden sowie Hubs, die im Fernverkehr angefahren werden, um unrentable Direktverkehre zu vermeiden.

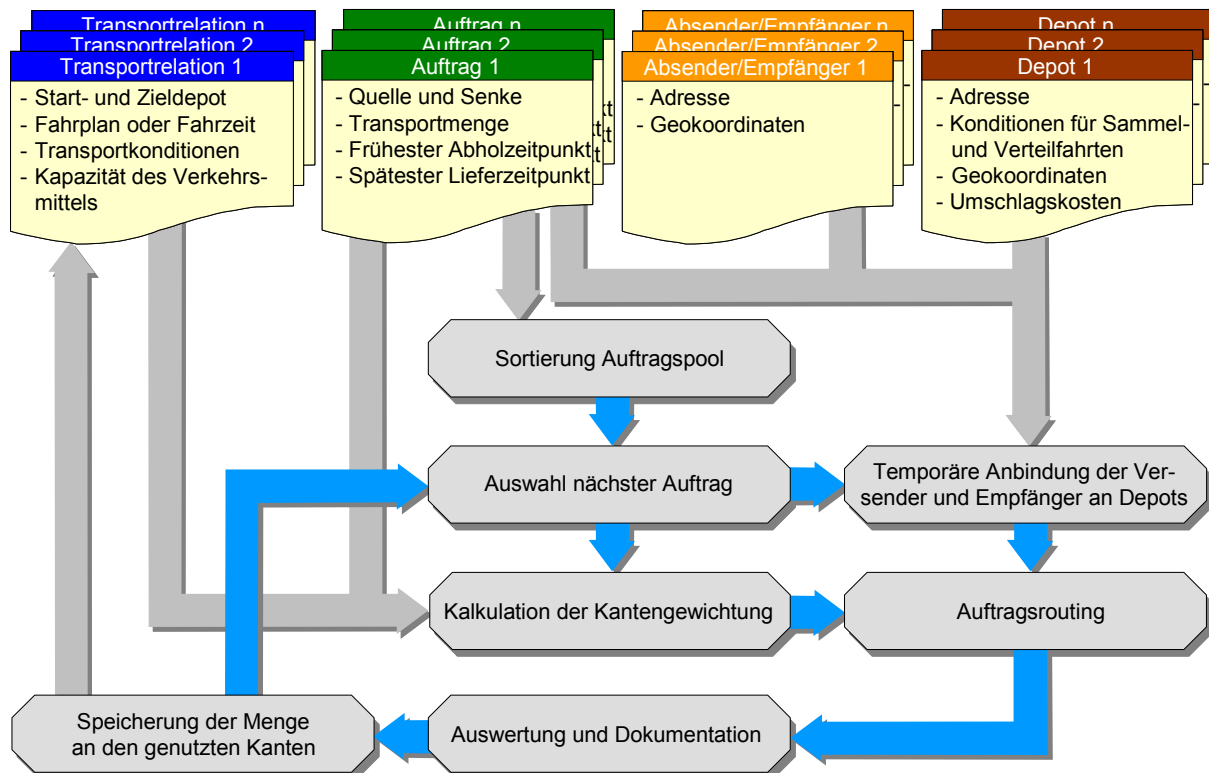


Bild 7.4: Zusammenhang des globalen Workflows und der Informationsbedarfe

Einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung haben vor allem die Eigenschaften der Kanten. Als letztes müssen Transportaufträge hinterlegt werden. Die Transportaufträge stellen die Transportnachfrage dar, die mit Hilfe des durch das Netz gegebenen Transportangebotes befriedigt wird. Die in Bild 7.3 dargestellte Vorgehensweise greift in jeder Schleife auf die Informationen zu Sendungen, Versendern und Empfängern sowie Transportrelationen zu (Bild 7.4).

#### 7.3.1 Knoten

Bei der Modellkonzeption wurde von Beginn an zwischen primären und sekundären Knoten unterschieden. Während die primären Knoten die Depots und Hubs umfas-

sen, die über die hinterlegten Kanten verbunden werden und damit dauerhaft Teil des Netzwerkes sind, handelt es sich bei den sekundären Knoten um Versender und Empfänger. Im Normalfall sind die Versender und Empfänger der Sendungen nicht identisch mit den Depots und liegen verteilt in der Fläche. Die primären Knoten werden regelmäßig für den Umschlag der einzelnen Sendungen benötigt. Die sekundären Knoten werden demgegenüber nur von einzelnen Sendungen benötigt und nur bedarfsweise an das Netzwerk angeschlossen. Damit soll die Größe des Netzwerkes beschränkt und der damit verbundene Speicher- und vor allem Rechenaufwand vermindert werden.

### 7.3.1.1 Primäre Knoten

Die primären Knoten stellen die Start- und Endpunkte von angelegten Transportrelationen dar. Je nach Charakteristik des Netzes fällt die Auswahl der primären Knoten, die in das Netz aufgenommen werden sollen, auf strategischer oder taktischer Ebene. Handelt es sich bei den primären Knoten um eigene Depots und Hubs, die eröffnet oder geschlossen werden können, ist die Nutzung mit Investitionen verbunden und wird damit langfristig festgelegt. Wird ein Depot in Form eines Dienstleisters oder einer Kooperation in ein Netzwerk eingebunden, hängt der zeitliche Horizont der Entscheidung im Wesentlichen von der Vertragsgestaltung ab.

Für das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte Modell werden die primären Knoten mit

- o einer eindeutigen ID,
- o einer exakten Position,
- o einem allgemeinen Abhol- bzw. Zustell-Offset,
- o einem Kostensatz für den Nahverkehr,
- o einem Zeitverbrauch für den Nahverkehr,
- o einem Kostensatz für den Umschlag,
- o einem Zeitverbrauch für den Umschlag sowie
- o einem Umrechnungsfaktor für die Transportentfernung

gespeichert.

Die eindeutige Knoten-ID ist der Bezeichner des Netzwerkknotens und wird für die Kürzeste-Wege-Suche benötigt. Die exakte Position des Depots oder Hubs wird in

Form von Geo-Koordinaten mit Längen- und Breitengrad gespeichert. Mit Hilfe der Geo-Koordinaten lassen sich zum einen die Entfernungen im Netzwerk näherungsweise berechnen und zum anderen wird auf diese Weise eine einfache grafische Abbildung des Netzwerkes ermöglicht.

Die Kosten für den Nahverkehr werden für gewichts- bzw. flächendominierte Sendungen getrennt hinterlegt. Für den Vor- und Nachlauf steht während der Berechnungen des Modells noch nicht fest, mit welchem Verkehrsmittel der Transport durchgeführt wird. Aus diesem Grund wird als Kostensatz für Vor- und Nachlauf jeweils ein Kostensatz pro km Vor- bzw. Nachlaufentfernung und 1.000 kg Gewicht sowie pro km Vor- bzw. Nachlaufentfernung und 1 qm Ladeflächenbedarf hinterlegt. Da die Nahverkehrskosten sich regionsspezifisch unterscheiden können, werden sie pro Depot hinterlegt. Zur Entscheidung, wann eine Bewertungsgröße genutzt wird, werden für jedes Depot die Gewichts- und Flächenkapazitäten der Sammel- bzw. Verteilfahrzeuge hinterlegt.

Im vorliegenden Modell wird grundsätzlich keine Unterscheidung der primären Knoten in Depots und Hubs vorgenommen, da sich die Anforderungen an die Ausstattung einer Umschlagsanlage in beiden Fällen nicht unterscheiden. Soll ein primärer Knoten als reiner Hub genutzt werden, lässt sich dies im Modell durch hohe Strafkosten für die Nahverkehrskosten erreichen. Damit werden dem betreffenden primären Knoten durch das Modell keine Vor- bzw. Nachläufe und damit keine Depotaufgaben zugewiesen.

Mit Hilfe des Umrechnungsfaktors für die Transportentfernung wird eine Annäherung der Luftlinie an tatsächliche Straßenentfernungen im Vor- bzw. Nachlauf erreicht. Je nach Verkehrsinfrastruktur kann dieser Umrechnungsfaktor unterschiedlich groß sein und wird daher pro Depot hinterlegt. Auf Basis der approximierten Straßenentfernung und dem Zeitverbrauch für den Nahverkehr, der in Minuten pro km angegeben wird, kann eine Abschätzung über den Zeitverbrauch von Vor- bzw. Nachläufen getroffen werden.

Der Kostensatz für den Umschlag spiegelt den Handlingaufwand beim Umschlag einer Sendung im Depot oder Hub wider. Im Rahmen des zu entwickelnden Modells wird der Handlingaufwand bezogen auf die Anzahl LE der Sendung berechnet. Das mögliche gemeinsame Handling von zwei Halbpaletten nach DIN 15146-4 in einem

Vorgang führt nicht zu einer Kostenreduzierung. Der Kostensatz für den Umschlag wird in € pro LE hinterlegt.

Die Angabe eines Zeitverbrauches für den Umschlag erfolgt vor dem Hintergrund, dass ein an einem Depot abfahrendes Verkehrsmittel von einer Sendung nur dann erreicht werden kann, wenn die Ankunft der Sendung am Depot so frühzeitig erfolgt, dass die für den Umschlag notwendige Zeit gegeben ist. Der Zeitverbrauch für den Umschlag wird ebenfalls bezogen auf die Grundfläche der Sendung in € pro qm angegeben.

Diese für das Modell wichtigen Angaben werden durch die Angabe

- o einer Knotenbezeichnung und
- o der Adressangaben

ergänzt. Die Adressangabe wird im Wesentlichen für Tourenoptimierung im Nachgang zu der hier dargestellten Transportdisposition benötigt.

### **7.3.1.2 Sekundäre Knoten**

Aus Speditionssicht handelt es sich bei den sekundären Knoten um die Kunden, also um die Versender und Empfänger. Nur bei Kunden, für die sich die Einrichtung von regelmäßigen Verkehren lohnt, macht eine Aufnahme in die Liste der primären Knoten und die damit verbundene Einrichtung regelmäßiger Verkehre Sinn. Im Bereich der speditionellen Sammelladung ist dies gegeben, wenn produzierende Betriebe oder der Versandhandel das betreffende Transportnetzwerk dauerhaft im Rahmen ihrer Distributionslogistik nutzen. In Hinsicht auf die Empfänger ist eine sinnvolle Aufnahme in die Gruppe der primären Knoten zumeist nicht gegeben, da der Transport in der Regel vom Versender veranlasst wird und damit größere, regelmäßig wiederkehrende Transportmengen in einem Transportnetzwerk zu einem bestimmten Empfänger unwahrscheinlich sind. Eine Ausnahme stellt ggf. die Sendungskonsolidierung für ein Großunternehmen bei einem Dienstleister dar, der Teil des Netzwerkes ist.

Über die primären Knoten lassen sich Versender und Empfänger als sekundäre Knoten an das Netz anschließen. Die sekundären Knoten sind damit nicht unmittelbarer Bestandteil der vorhandenen Netzstruktur. Die sekundären Knoten werden mit

- o einer eindeutigen Knoten-ID,

- o einer exakten Position,
- o einer Verladedauer und
- o Verladekosten

gespeichert. Die eindeutige Knoten-ID muss über die Menge der sekundären und der primären Knoten eindeutig sein. Dies kann zum Beispiel über ein Präfix realisiert werden, wenn die Knoten-IDs alphanumerisch gespeichert werden, oder es werden abgegrenzte Nummernbereiche gewählt.

Die Position Verladedauer ist Bestandteil der Abschätzung des minimalen Zeitbedarfes für den Vor- bzw. Nachlauf. Diese Dauer kann entweder für alle sekundären Knoten auf einen Default-Wert gesetzt werden oder sie wird versender- bzw. empfangerspezifisch hinterlegt. Eine Unterscheidung der Verladedauer nach Kunden ist vor allem dann sinnvoll, wenn durch unterschiedliche Verladesysteme große Unterschiede zwischen den einzelnen Kunden bestehen. Derartige Unterschiede können aus der Verladetechnik, wie Rampen oder Flurförderzeugen, resultieren. Einen großen Einfluss haben auch die Abläufe in der Verladezone. Durch ein Vorladen, bei dem die Sendungen direkt auf einen bereitgestellten Sattelaufleger oder eine abgestellte Wechselbrücke verladen werden, oder durch das Bereitstellen der Sendungen auf rampennahe Vorstaflächen im Versandbereich werden kürzere Verladezeiten realisiert als durch eine direkte Verladung aus dem Lager.

Die Verladekosten können im vorgestellten Ansatz optional genutzt werden, da die Verladekosten beim Versender und Empfänger unabhängig von der Transportkette anfallen und damit im Rahmen der Optimierung nicht entscheidungsrelevant sind. Die Verladekosten stellen aber einen Teil der Vollkosten des Transportnetzwerkes dar. Um einen möglichst vollständigen Kostenüberblick zu geben, sind die Kosten der Verladung hinterlegbar und werden in der Berechnung berücksichtigt.

Auch bei den sekundären Knoten werden diese Kernangaben durch weitere Angaben, wie

- o eine Knotenbezeichnung und
- o Adressangaben,

ergänzt. Bei der Knotenbezeichnung und den Adressangaben handelt es sich um die jeweilige Verladeadresse. Während die exakte Position in Form von Geo-Koordinaten hinterlegt wird und für die Abschätzung von Kosten und Dauer für Vor-

bzw. Nachläufe benötigt wird, werden die Adressangaben in Form einer Straßenadresse hinterlegt. Die Adressdaten werden wiederum für die Tourenoptimierung benötigt.

### 7.3.2 Kanten

Bei den Kanten handelt es sich um die einzelnen Transportrelationen im Netzwerk. Sie verbinden ausschließlich die primären Knoten, also die Depots und Hubs miteinander. Dabei handelt es sich zum einen um fahrplanmäßig verkehrende Verkehrsmittel wie Lkw oder Züge oder um Verkehrsmittel, die in einem bestimmten Zeitraum für den Gütertransport eingesetzt werden können, deren genaue Abfahrts- und Ankunftszeit jedoch noch nicht festgelegt sind.

Die Kanten werden mit

- o einer eindeutigen Kanten-ID,
- o der Knoten-ID des Start- und des Zielknotens,
- o einem Zeitfenster der Kante,
- o einer Fahrzeit der Kante sowie
- o einer Kapazität der Kante

gespeichert.

Mit Hilfe der eindeutigen Kanten-ID lassen sich Wege durch ein komplexes Transportnetzwerk auch im Falle paralleler Kanten eindeutig beschreiben. Während es bei einfachen Kürzeste-Wege-Algorithmen ausreichend ist, den Vorgängerknoten für jede Marke zu speichern, muss bei Algorithmen, bei denen neben Kosten auch zeitliche Aspekte zu berücksichtigen sind, differenzierter gespeichert werden, wie eine Marke erreicht wurde. Andernfalls ist eine eindeutige Rekonstruktion des Pfades unter Umständen nicht mehr möglich.

Die Knoten-IDs von Start- und Zielknoten geben an, zwischen welchen Depots die Transportrelation besteht. Eine Transportrelation verbindet immer zwei Knoten. Soll eine Reise über mehrere Depots angelegt werden, müssen zeitlich aufeinander abgestimmte Einzelrelationen in der Kantenliste angelegt werden. Für die Abbildung von Begegnungsverkehren, also den Fall von Fahrzeugen, die sich zwischen zwei Depots treffen, Sattelaufleger oder Wechselbehälter austauschen und zum Aus-



gangsdepot zurückkehren, werden zwei Kanten angelegt, die den Weg der Transporthilfsmittel beschreiben.

Die geplanten Abfahrts- und Ankunftszeiten von Linienverkehren werden an jeder Kante gespeichert. Die Zeitdifferenz entspricht der Kantendauer, also der Fahrzeit zuzüglich der Zeit für die Verladung am Start- und am Zieldepot. Auf diese Weise wird festgelegt, wann eine Sendung am Startdepot für die Verladung auf das Verkehrsmittel zur Verfügung stehen muss und wann die über die Kante transportierte Sendung am Zieldepot für die anschließende Verladung bereitsteht. Sollen Kanten zu Beginn der Optimierung zeitlich nicht festgelegt werden, ist es notwendig, die planmäßige Fahrzeit der Kante zu speichern und eine früheste Abfahrt, kurz FAB, sowie eine späteste Ankunft, kurz SAN, festzulegen. Das hiermit aufgespannte Zeitfenster legt fest, in welchem Zeitraum das Verkehrsmittel für die Transportaufgabe zur Verfügung steht.

Um die Kapazitätsbeschränkungen der Kanten abbilden zu können, wird die Kapazität des Verkehrsmittels gespeichert. Dafür wird zum einen die Ladefläche des Verkehrsmittels in qm und die maximale Zuladung in kg gespeichert. Die Erweiterung auf weitere Einheiten, wie Kubikmeter, ist möglich. An jeder Kante kann zusätzlich ein Faktor für die nutzbare Kapazität hinterlegt werden. Damit kann abgebildet werden, wie groß die tatsächlich nutzbare Kapazität bezogen auf die hinterlegte Kapazität ist. Ein solcher Faktor kann, wie im Fall der nutzbaren Stellfläche, auch Werte größer eins annehmen. Der Faktor lässt sich darüber hinaus dafür nutzen, einen Teil der Kapazität für manuelle Nacharbeiten durch einen Disponenten zu reservieren.

### **7.3.3 Konditionen**

Da es sich bei diesem Modell um einen kostenorientierten Ansatz handelt, muss die Nutzung einer Kante anhand von Kosten bewertet werden. Die Kosten, die durch die Nutzung einer Kante entstehen, werden für jede einzelne Kante in einer Konditionstabelle hinterlegt. Das gilt gleichermaßen für eigene Fahrzeuge, Fahrzeuge von Subunternehmern und Fremdkapazitäten. Beim Festlegen der Konditionen müssen Aspekte, wie die Relationslänge, berücksichtigt werden. Die Konditionstabelle ermöglicht es, einen Staffeltarif in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad der Relation zu

hinterlegen. Auf diese Weise lassen sich rein lineare Kostenverläufe aber auch Kostenverläufe mit abnehmenden Grenzkosten abbilden (siehe Abschnitt 7.1.1).

In Abgrenzung zu anderen Arbeiten, die lediglich lineare Kostenverläufe berücksichtigen, wird in diesem Ansatz von einer abschnittsweise definierten Kostenfunktion ausgegangen. In Anlehnung an den nicht mehr bindenden Güterfernverkehrstarif werden die Konditionen in Staffelform erfasst und mit den Informationen

- o Kanten-ID,
- o Klassenuntergrenze,
- o Klassenobergrenze,
- o variabler Konditionsbestandteil und
- o fixer Konditionsbestandteil

gespeichert.

Die Kanten-ID ermöglicht eine Zuordnung der jeweiligen Kondition zu der zugehörigen Transportrelation. Das Paar aus Klassenuntergrenze und Klassenobergrenze gibt an, für welche Gesamtfrachtmenge die Kondition gilt. Da die Kapazitätsrestriktionen Fläche und Gewicht berücksichtigt werden, müssen die Klassengrenzen in Prozent-Kapazitätsauslastung angegeben werden.

Während der fixe Bestandteil die für die jeweilige Kondition minimale Frachtrate angibt, wird der variable Bestandteil in € pro Prozent-Kapazitätsauslastung angegeben. Berechnungsgrundlage stellt hierbei allerdings nur die Differenz aus der Kapazitätsauslastung und der Klassenuntergrenze dar.

### **7.3.4 Transportaufträge**

Bei den Transportaufträgen handelt es sich um die durch die Versender für den Transport aufgegebenen Sendungen. Anders als bei den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Stammdaten sind die Transportaufträge als Bewegungsdaten zu klassifizieren. Sie müssen in jeder Planungsperiode neu in das Modell eingespielt werden.

Die Transportaufträge werden mit

- o einer AuftragsID,
- o einem Startknoten,

- o einem Zielknoten,
- o einer frühesten Abfahrt beim Versender,
- o einer spätesten Ankunft beim Empfänger sowie
- o der Sendungsgröße in Gewicht, Fläche und Anzahl LE gespeichert.

Als Start- und Zielknoten werden die Quelle und die Senke der Sendung hinterlegt. Auch wenn es sich im Regelfall um sekundäre Knoten handelt, können auch primäre Knoten, also Depots, als Start- oder Zielknoten hinterlegt werden. Eintreten kann dieser Fall z. B. bei der Selbstanlieferung am Depot durch den Versender bzw. bei der Selbstabholung durch den Empfänger.

Die früheste Abfahrt definiert den Zeitpunkt, ab dem die Sendung beim Versender für die Abholung durch die Sammelfahrzeuge bereitsteht. Die späteste Ankunft stellt den Zeitpunkt dar, zu dem der Empfänger die Sendung spätestens benötigt. Die Sendungsgröße wird schließlich für die Nutzung der Transportkapazität der Fahrzeuge in kg und  $q_m$  sowie als Anzahl LE zur Bestimmung der Umschlagskosten angegeben.

## **7.4 Gestaltung der Berechnungsschritte**

In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise, die hinter Teilen des Modells steckt, näher beschrieben. Die einzelnen Arbeitsschritte sind dabei teilweise umfangreich. Insbesondere die Bestimmung der Kantengewichtung und der Kürzester-Wege-Algorithmus, die unverzichtbare Bestandteile des Modells darstellen, haben sich in der Berechnung als zeitintensiv erwiesen. Durch die Auswahl von Subnetzen können diese Prozesse allerdings deutlich beschleunigt werden.

### **7.4.1 Auftragsortierung**

Aufgrund der seriellen Abarbeitung des Auftragspools hat dessen Sortierung einen wesentlichen Einfluss auf die Lösung. In Abhängigkeit von der Sortierung werden durch die vorgestellte Vorgehensweise unterschiedliche Lösungen generiert. Der Grund hierfür liegt zum einen in beschränkten Kapazitäten der Kanten des Netzwerkes. Kanten, die für den als nächstes abzuarbeitenden Auftrages keine oder keine ausreichend große Restkapazität zur Verfügung stellen, werden beim Routing des Auftrages nicht berücksichtigt. Damit kann ein bestimmter Auftrag je nach Position im

Auftragspool eine Kante zur Nutzung angeboten bekommen oder sie steht nicht zur Verfügung.

Zum anderen hat die Form der Kostenfunktion der einzelnen Kanten einen Einfluss auf das Ergebnis jeden Auftragsroutings. Eine lineare Kostenfunktion mit Fixkosten in Höhe von null wird für einen bestimmten Auftrag unabhängig von der bereits verplanten Transportmenge die gleichen Grenzkosten ausgeben. Eine lineare Kostenfunktion mit Fixkosten wird für den ersten auf der Kante verplanten Auftrag höhere Grenzkosten ausgeben als für die folgenden Aufträge. Eine abschnittsweise linear definierte Kostenfunktion mit degressivem Verlauf wird für jeden Auftrag, mit dem eine neue Klasse erreicht wird, günstigere Grenzkosten angeben als bei dem Auftrag zuvor. Damit sind die für das Routing angesetzten Kosten der Kanten sowie der kürzeste Weg abhängig von den bereits verplanten Aufträgen.

Die Sortierung des Auftragspools soll vor dem Hintergrund der bestmöglichen Konsolidierung der Transportaufträge und damit den minimalen Gesamtkosten des Auftragspools erfolgen. Dafür erscheint es zweckmäßig, den Auftragspool nach absteigender Sendungsgröße zu sortieren. Für eine derartige Sortierung sprechen im Wesentlichen zwei Argumente. Zum einen ermöglicht die nachgelagerte Zuordnung von kleinen Sendungen eine gute Ausnutzung von Restkapazitäten. Der zweite Grund kommt bei der Berücksichtigung von Kostenfunktionen mit Fixkostenanteil oder bei Kostenfunktionen mit degressivem Verlauf zum tragen. In diesem Fall wird durch die frühe Verplanung von großen Sendungen eine Reduzierung der Grenzkosten für spätere Sendungen erreicht, womit ein Anreiz geschaffen wird, die Kapazitäten aufzufüllen.

Im Falle einer mehrdimensionalen Bestimmung der Sendungsgröße, wie sie in diesem Modell erfolgt, kann alternativ zu einer Sortierung nach Gewicht versucht werden, eine Kennzahl zu bilden, die eine Näherung für die tatsächliche kapazitätsmäßige Inanspruchnahme des Auftrages wiedergibt. Eine solche Kennzahl kann genau genommen nur bei einem homogenen Fuhrpark angegeben werden, da die kapazitätsmäßige Nutzung abgesehen vom Gewicht und den Abmessungen des Auftrages auch von der maximalen Zuladung und den Abmessungen des jeweiligen Verkehrsmittels abhängt. Eine Orientierung kann aber durch das überwiegend eingesetzte Verkehrsmittel erfolgen.

Ein weiteres Ziel stellt im Falle der Auftragsortierung die Verplanung möglichst aller Aufträge dar. Handelt es sich beispielsweise bei Aufträgen mit geringer Sendungsgröße gleichzeitig um Aufträge mit besonders geringem Zeitfenster zwischen frühester Abfahrt und spätester Ankunft, dann können diese Sendungen durch bereits verplante Transportkapazitäten unter Umständen nicht mehr durch die vorhandenen Transportkapazitäten bearbeitet werden. Diese Aufträge sind damit in der Sortierung des Auftragspools besonders zu berücksichtigen. Hierfür können in solch einem Fall besondere Prioritätsregeln formuliert werden.

### 7.4.2 Bestimmung von Entfernungen

Die Bestimmung aller Entfernungen, die für die im Weiteren dargestellte Verortung und für die Auswahl von Subnetzen notwendig ist, erfolgt nicht anhand von Straßenentfernungen sondern über Geo-Koordinaten. Die Ermittlung von Straßenentfernungen über Geo-Informationssysteme ist metergenau, muss aber über Kürzeste-Wege-Algorithmen berechnet werden und ist damit zeitaufwendig. Die Entfernungsberechnung über Koordinaten vernachlässigt zwar die regionalen Infrastrukturspezifika, kann dafür aber einfach und schnell durchgeführt werden. Zunächst wird der Mittelpunktswinkel zwischen zwei Punkten auf dem Großkreis berechnet /LIN-2000/.

$$M_{ij} = \arccos(\sin Lat_i \cdot \sin Lat_j + \cos Lat_i \cdot \cos Lat_j \cdot \cos(Lon_i - Lon_j)) \quad 7.17$$

$M_{ij}$  Mittelpunktswinkel zwischen  $i$  und  $j$

$Lat_i$  Breitengrad von Knoten  $i$

$Lon_i$  Längengrad von Knoten  $i$

Danach wird dieser Winkel mit der Länge des Kreisbogens zwischen zwei Längengraden auf dem Äquator multipliziert. Die Ungenauigkeit, die daraus resultiert, dass die Erde keine exakte Kugelform aufweist, soll für diesen Anwendungsfall vernachlässigt werden.

$$D_{ij} = M_{ij} \cdot (2\pi \cdot 6.370 \text{ km} / 360^\circ) \quad 7.18$$

$D_{ij}$  Entfernung zwischen den Knoten  $i$  und  $j$

Neben der Auswahl von Depotkandidaten für die Anbindung der Kundenstandorte an das Netzwerk wird die Entfernungsberechnung auch für die Abschätzung der Vor- und Nachlaufkosten benötigt. Die berechnete Entfernung wird zunächst mit einem depotspezifischen Gewichtungsfaktor, der den Ausbau der Infrastruktur wiedergeben soll, multipliziert, um die berechnete lineare Entfernung einer realistischen Straßenentfernung anzugleichen.

Ein exemplarischer Gewichtungsfaktor für die Näherung der euklidischen Entfernung an tatsächliche Straßenentfernungen liegt bei 1,3 /ZIE-1988/. Als gute Annäherung für Wege in Mitteleuropa nennt Feige einen Umwegfaktor von 1,28 /FEI-2008/. Die dargestellten, mit MapPoint generierten Beispiele unterstreichen diese Werte sowohl für den Fern- als auch für den Nahverkehr (Bild 7.5). Das Beispiel für den Fernverkehr weist eine euklidische Entfernung von 545 km auf. Bei einer ermittelten Straßenentfernung von 690 km ergibt sich ein Umwegfaktor von ca. 1,27. Das Beispiel für den Nahverkehr weist bei einer euklidischen Entfernung von 17,2 km eine Straßenentfernung von 22 km auf. In diesem Fall ergibt sich ein Umwegfaktor von ca. 1,28.

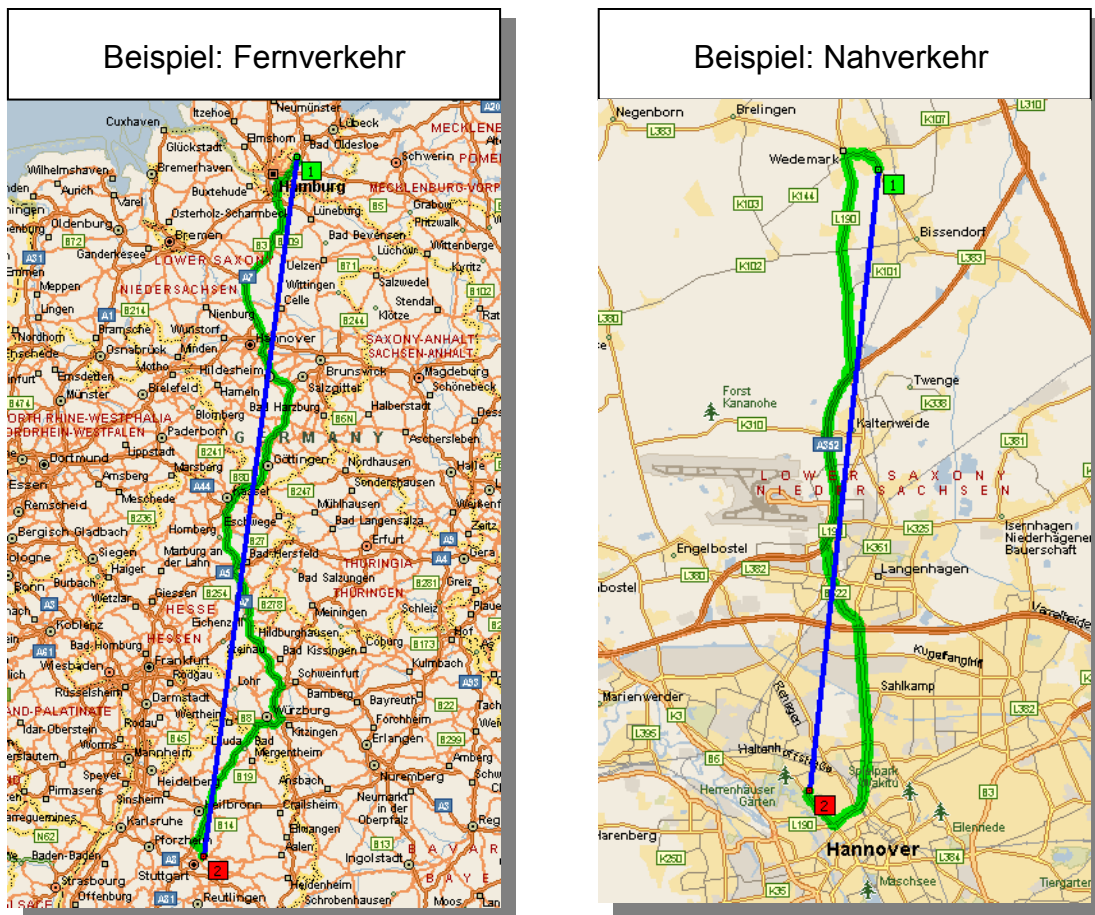


Bild 7.5: Beispielhafte euklidische Entfernungen und Straßenverbindungen

Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, kann auf sektorpaarspezifische Umwegfaktoren zurückgegriffen werden. Dabei werden die Umwegfaktoren von Quell- und Zielsektoren zu Grunde gelegt. Die Umwegfaktoren der weiteren Sektoren, durch die die Verbindung führt, werden allerdings außer Acht gelassen /BRO-1995/.

### 7.4.3 Auswahl von Subnetzen

Für die Anwendung des SPP auf das Auftragsrouting im Bereich der expeditionellen Sammelladung gilt, dass die Netzgröße hinsichtlich der Knoten und Kanten gegenüber Anwendungsfällen, wie etwa Navigationssystemen, stark eingeschränkt ist. So wiesen im Jahr 2006 sechs von zehn Stückgut-Kooperationen auf dem deutschen Markt eine Größe zwischen 30 und 60 nationalen Depots auf. Zwei Kooperationen unterhielten 60 bis 80 Depots und nur zwei Kooperationen hatten 100 Depots und mehr /PIE-2006/.

Es ist möglich, bei der Kürzeste-Wege-Suche für einen Auftrag das gesamte zur Verfügung stehende Transportnetzwerk zu Grunde zu legen. Eine solche Vorgehensweise stellt sicher, dass bei der Kürzeste-Wege-Suche das Optimum gefunden wird. Für den hier beschriebenen Fall ist das Optimum der kostenminimale Pfad unter Einhaltung der Kapazitäts- und Zeitrestriktionen. In Abhängigkeit von der Gestaltung der Konditionen, der bereits eingeplanten Aufträge und dem Verhältnis aus Transport- zu Umschlagskosten kann das hierbei ermittelte Optimum aus einer vielfach gebrochenen Transportkette mit einem, bezogen auf die Strecke, großen Umweg bestehen.

Auch wenn aus Kostengesichtspunkten die Lösung optimal ist, widerspricht ein Weg von Hannover nach München via Paris im Allgemeinen dem, was ein Disponent als sinnvoll erachten würde. Da es sich bei Kürzeste-Wege-Algorithmen um Verfahren handelt, die große Teile des Lösungsraumes absuchen müssen, kommt es bei einer Berücksichtigung des kompletten Netzwerkes außerdem zu langen Laufzeiten. Aus beiden Gründen ist deshalb eine Begrenzung des Netzwerkes unter Berücksichtigung der Auftragsdaten sinnvoll.

Im vorliegenden Modell wurde ein Ansatz zur Bestimmung der für das Subnetz relevanten Depots entwickelt. Bei der Kürzesten-Wege-Suche werden nur die Kanten betrachtet, deren Start- und Zielknoten Elemente dieses Subnetzes sind. Die Auswahl der relevanten Depots kann durch eine einfache geografische Einschränkung vorgenommen werden. Dabei wird um den Start- und Zielpunkt des Auftrages eine geometrische Form gelegt. Alle Knoten, die sich innerhalb der Fläche befinden, bilden das relevante Subnetz, während alle Knoten, die außerhalb der Fläche liegen, für diesen Auftrag nicht berücksichtigt werden.

Einfache geometrische Formen für die geografische Einschränkung des Transportnetzwerkes stellen beispielsweise Rechtecke, Kreise oder Ellipsen dar (Bild 7.6). Die Lage der Fläche muss durch Versender und Empfänger definiert werden, während die Form und Größe der Fläche von vorzugebenden Parametern abhängt. Für das vorliegende Modell wurde in Anlehnung an Thümer eine Ellipse gewählt. Gründe für die Ellipse sind, dass die für die Kürzeste-Wege-Suche am ehesten relevanten Knoten in der Nähe der Luftlinie zu finden sind und dass die Depots, wenn sie als Brennpunkte genutzt werden, innerhalb des Auswahlbereiches und nicht auf dessen



Rand liegen /THÜ-1975/. Darüber hinaus lässt sich die Berechnung mit einer Ellipse sehr einfach implementieren und benötigt im Modell wenige Rechenschritte.

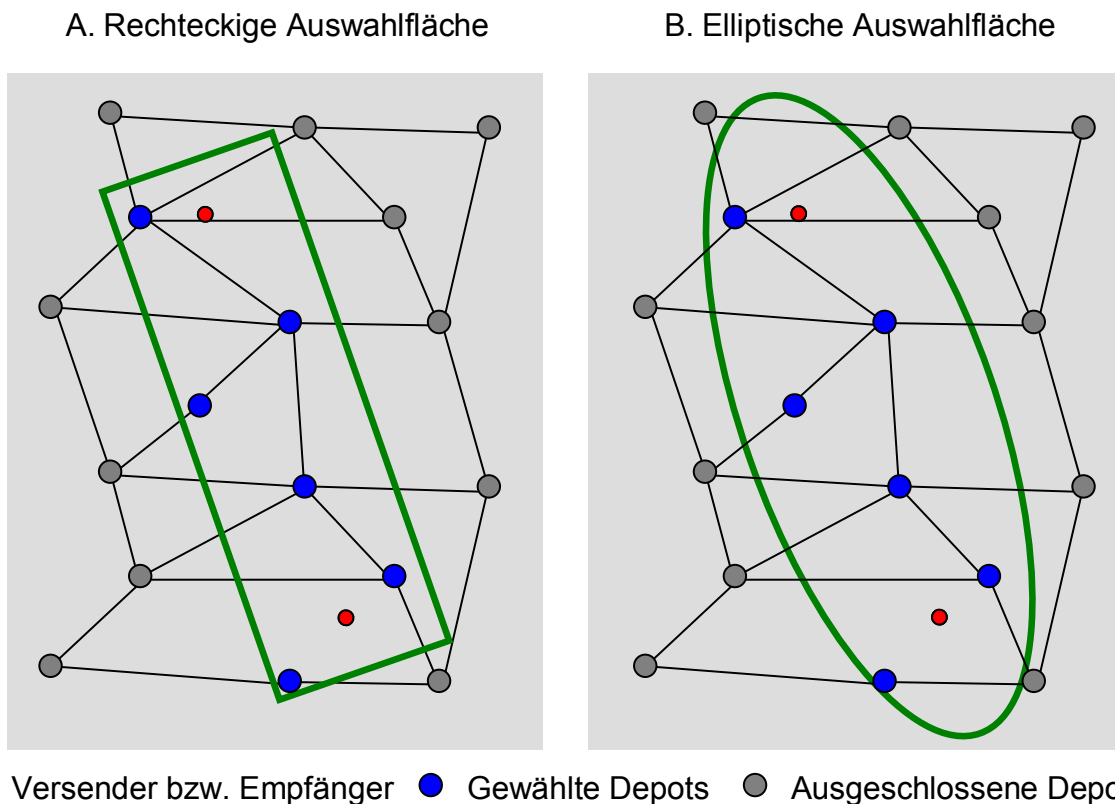


Bild 7.6: Beispiele für die geografische Einschränkung des Transportnetzwerkes

Die Strecke  $\overline{F_1F_2}$  zwischen den Brennpunkten ist durch die Angabe von Versender und Empfänger im Transportauftrag gegeben. Jeder Versender und Empfänger wird mit seinen exakten Koordinaten hinterlegt. Auf dieser Grundlage kann die Luftlinie zwischen den beiden Orten berechnet werden. Eine Ellipse wird durch die Menge aller Punkte beschrieben, deren Summe aus Entfernung zum Fokus 1 und zum Fokus 2 gleich ist (Bild 7.7). Für ein Versender-/ Empfängerpaar gibt es damit unendlich viele mögliche Ellipsen. Um eine Ellipse eindeutig zu bestimmen, muss deshalb über die Festlegung der beiden Brennpunkte hinaus die numerische Exzentrizität  $\varepsilon$  angegeben werden. Durch die Beziehung

$$\varepsilon = \frac{\overline{F_1M}}{\overline{S_1M}} \quad 7.19$$

ist mit der Exzentrizität die Länge der großen Halbachse  $\overline{S_1S_2}$  gegeben.

$$\overline{S_1 S_2} = \frac{\overline{F_1 F_2}}{\varepsilon} \quad 7.20$$

Die Länge der Hauptachse in einer Ellipse entspricht der Strecke  $2 \cdot \overline{F_1 S_3}$ . Für jeden relevanten Knoten  $P$  des Netzwerkes muss die folgende Beziehung gelten:

$$\overline{F_1 P} + \overline{F_2 P} \leq \frac{\overline{F_1 F_2}}{\varepsilon} \quad 7.21$$

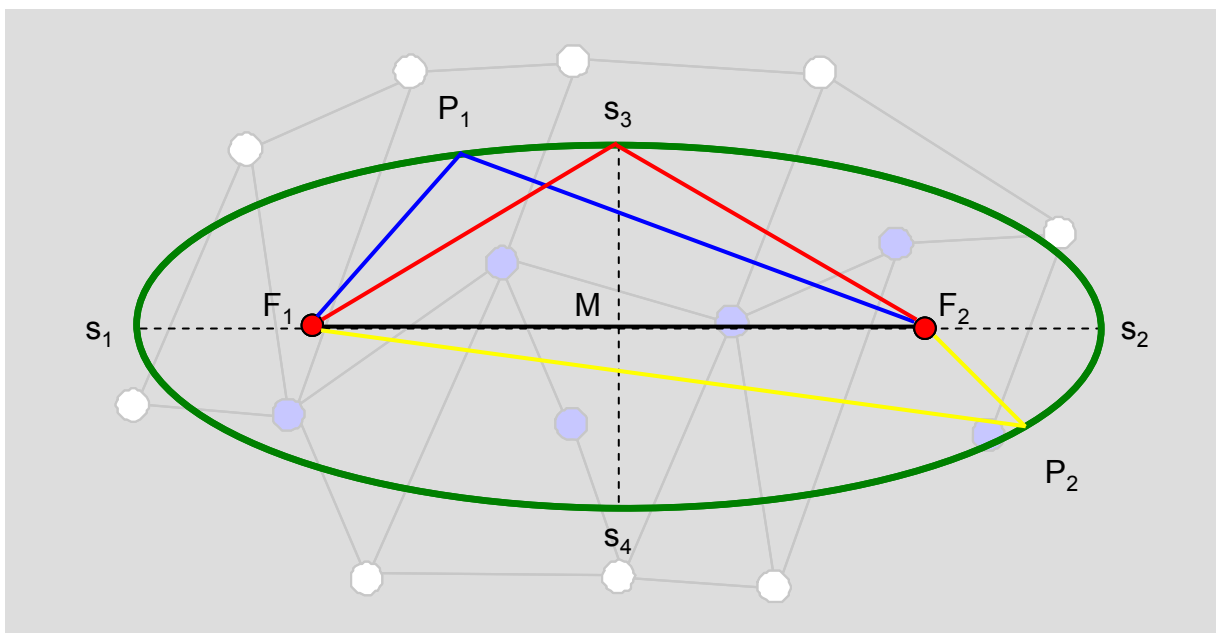


Bild 7.7: Definition der Auswahlfläche

Für besonders große und dichte Netze gilt, dass die Bestimmung der relevanten Depots viel Zeit in Anspruch nehmen kann. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, das Gesamtnetz in regionale Subnetze zu zerlegen. Bei der geografischen Einschränkung werden dann nicht die Depots direkt ausgewählt, sondern es werden Vertreter einer Region untersucht. Wenn ein solcher Vertreter als relevant eingestuft wird, können alle Depots des Subnetzes als relevant eingestuft werden. Bei Ausschluss des Vertreters wird wiederum kein Depot des Subnetzes berücksichtigt.

#### 7.4.4 Definition der Kantengewichte

Vor Durchführung der Kürzeste-Wege-Suche müssen die Kantengewichtungen feststehen. Während die Kosten von der Gesamttransportmenge abhängig sind und in jeder Iteration neu berechnet werden müssen, sind die Zeiten bzw. Zeitfenster

über alle Iterationen konstant. Für die Gestaltung der Zeiten bestehen zwei Möglichkeiten. Entweder wird mit einem festen Fahrplan gearbeitet oder es werden individuelle Zeitverbräuche für Fahren und Umschlagen zu Grunde gelegt. Dies trifft im Rahmen der operativen Planung vor allem für Fremdkapazitäten zu, da die eigenen Fahrzeuge in einem regelmäßigen Linienverkehr eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu würde man im Rahmen der taktischen Planung auch für eigene Fahrzeuge nicht von festen Fahrplänen ausgehen.

Um in einem Kürzeste-Wege-Algorithmus zu berücksichtigen, ob Wege unter zeitlichen Aspekten zulässig sind, müssen über die reinen Fahrzeiten hinaus auch die Umschlagszeiten berücksichtigt werden. Damit wird für die hier vorliegende Aufgabenstellung die Transportdauer als Summe über Beladedauer, Fahrzeit und Entladedauer definiert. Die Zeitanteile müssen dabei so ausgelegt werden, dass ein robustes Netzwerk entsteht, bei dem es nicht schon durch geringe Verzögerungen zu Störungen kommt. Aufgrund von zeitlichen Zusagen müssen bei derartigen Störungen in den meisten Fällen kurzfristig teure Ersatzkapazitäten hinzugekauft werden. Auf der anderen Seite dürfen die Zeiten nicht mit zu großen Sicherheitszuschlägen versehen werden, da darunter die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Transportnetzes leidet.

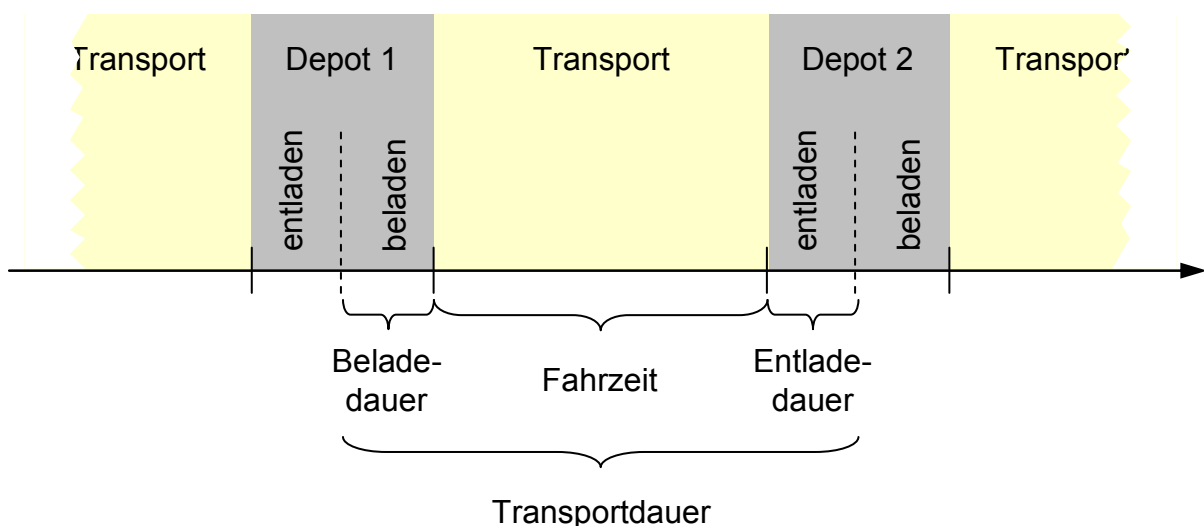


Bild 7.8: Zusammensetzung der Transportdauer

Für die Verkehre zwischen den Terminals bzw. Depots wird die Transportdauer wie in Bild 7.8 dargestellt zusammengesetzt. Sowohl für die Beladung an Depot 1 als auch für die Entladung an Depot 2 wird davon ausgegangen, dass die komplette

Fahrzeugkapazität umgeschlagen werden muss. Fahrzeuge fahren nicht immer mit einer 100 %igen Auslastung, weiterhin können auf einem Fahrzeug unter Umständen mehrere Zieldepots zusammengefasst werden, womit nur Teilladungen umgeschlagen werden müssen. Damit entspricht die Berechnung der Umschlagsdauer auf der Basis der kompletten Kapazität dem „Worst-Case“.

Während für die Ermittlung der reinen Fahrzeit ein Routenplaner die besten Ergebnisse liefert, kann die Umschlagsdauer pro Depot über einen depotspezifischen Zeitverbrauch berechnet werden. Die Verladung erfolgt im Allgemeinen heckseitig, wobei zeitgleich immer nur mit einem Flurförderzeug auf der Ladefläche des Verkehrsmittels gearbeitet werden kann.

Der pro Depot anzusetzende Zeitverbrauch hängt im Wesentlichen davon ab, wie umfangreich die Fahrtätigkeiten der Umschlagstechnik innerhalb des Depots sind bzw. wie viele Fahrzeuge parallel zur Be- und Entladung eines Verkehrsmittels eingesetzt werden. Sinnvoll erscheint es, hierfür einen Zeitverbrauch pro Flächeneinheit zu nutzen, da die Umschlagsdauer in der Regel von der Anzahl LE und nicht von deren Gewicht abhängt. Aufgrund der starken Verbreitung von Standardladeeinheiten, wie der Palette nach DIN EN 13698-1 mit den Maßen 800 mm x 1.200 mm oder der Flachpalette nach DIN 15146-4 mit den Maßen 800 mm x 600 mm, ist eine Umrechnung der Anzahl LE auf einen Flächensatz einfach möglich /DIN-2004/, /DIN-1991/.

Wie im Fall der Transportdauer werden auch die Transportkosten der einzelnen Relationen aus Umschlagskosten und Frachtsätzen zusammengesetzt. Die Umschlagskosten beziehen sich allerdings lediglich auf die Umschlagsmenge der einzelnen Sendung. Da der einzelne Handlingvorgang den kostenverursachenden Prozess darstellt, wird davon ausgegangen, dass eine Berechnung der Umschlagskosten auf Basis der Anzahl LE sinnvoll ist. Aufgrund unterschiedlicher Betriebskonzepte, vor allem aber auch vor dem Hintergrund, dass die Kostenstrukturen in unterschiedlichen Ländern eines Transportnetzwerkes stark voneinander abweichen können, werden die flächenbezogenen Umschlagskosten depotspezifisch hinterlegt.

Die Ermittlung der Frachtkosten der aktuellen Sendung erfolgt unter Berücksichtigung von Fläche und Gewicht der Sendung sowie der auf den einzelnen Relationen bereits eingeplanten Flächen und Gewichte. Die Konditionen der Relationen beste-

hen anders als in üblichen Tarifsyste-men aus Nutzungsklassen, die mit einer Ober- und Untergrenze in Prozent angegeben werden. Für die Berechnung der Fracht muss zunächst die Nutzung der Relation bestimmt werden. Zunächst kann die Gesamttransportmenge  $X_{e(i,j)}^m$  auf  $e(i, j)$  für jedes  $m$  bestimmt werden (Formel 7.22).  $n_{e(i,j)}^{dispo}$  ist der Anteil der Gesamtkapazität von  $e(i, j)$ , der durch bereits verplante Sendungen vergeben ist (Formel 7.23). Da die Verkehrsmittel Flächen- und Gewichtsrestriktionen unterliegen, wird immer der Engpass berücksichtigt.  $n_{e(i,j)}^{aktuell}$  ist der Anteil der Gesamtkapazität, der unter Berücksichtigung der aktuellen Sendung  $s^{aktuell}$  auf  $e(i, j)$  genutzt würde (Formel 7.24).

$$X_{e(i,j)}^m = \sum_{s|\delta_{e(i,j)}^s=1} x_{e(i,j)}^{s,m} \quad \forall m \quad 7.22$$

$$n_{e(i,j)}^{dispo} = \text{Max}_m \left( \frac{X_{e(i,j)}^m}{k_{e(i,j)}^m} \right) \quad 7.23$$

$$n_{e(i,j)}^{aktuell} = \text{Max}_m \left( \frac{X_{e(i,j)}^m + x^{s,m}}{k_{e(i,j)}^m} \right) \quad \forall m \text{ mit } s = s^{aktuell} \quad 7.24$$

Die Frachten, die pro Relation in jeder Iteration ausgewiesen werden, stellen die Grenzkosten der Nutzung dar, d. h. die Kosten, die bei Nutzung der Relation durch die aktuelle Sendung anfallen würden. Damit berechnet sich die Fracht als Differenz der Frachten von  $n_{e(i,j)}^{aktuell}$  also  $c_{e(i,j)}^{aktuell}$  und  $n_{e(i,j)}^{dispo}$  also  $c_{e(i,j)}^{dispo}$ . Für die Frachtermittlung werden die in Bild 7.1, Typen C und D, dargestellte Konditionsstrukturen zu Grunde gelegt.

$$c_{e(i,j)}^{aktuell} = v_{e(i,j)}^r (n_{e(i,j)}^{aktuell} - U_e^r) + f_{e(i,j)}^r \quad \text{mit } r | U_e^r < n_{e(i,j)}^{aktuell} \leq O_e^r \quad 7.25$$

$$c_{e(i,j)}^{dispo} = v_{e(i,j)}^r (n_{e(i,j)}^{dispo} - U_e^r) + f_{e(i,j)}^r \quad \text{mit } r | U_e^r < n_{e(i,j)}^{dispo} \leq O_e^r \quad 7.26$$

$$c_{e(i,j)} = c_{e(i,j)}^{aktuell} - c_{e(i,j)}^{dispo} \quad 7.27$$

Im Vorlauf zur Kürzeste-Wege-Suche muss lediglich  $c_{e(i,j)}^{aktuell}$  berechnet werden (Formel 7.25). Der in Abschnitt 7.4.6 beschriebene Kürzeste-Wege-Algorithmus arbeitet

mit den Grenzkosten, die durch die zusätzliche Sendung an den Kanten entstünden. Diese Kosten  $c_{e(ij)}$  ergeben sich aus Formel 7.27. Enthält der kürzeste Weg die Relation  $e(i, j)$ , wird im Nachgang  $c_{e(ij)}^{dispo}$  gleich  $c_{e(ij)}^{aktuell}$  gesetzt.  $c_{e(ij)}^{dispo}$  steht damit in der nächsten Schleife ohne die in Formel 7.26 dargestellte Berechnung zur Verfügung.

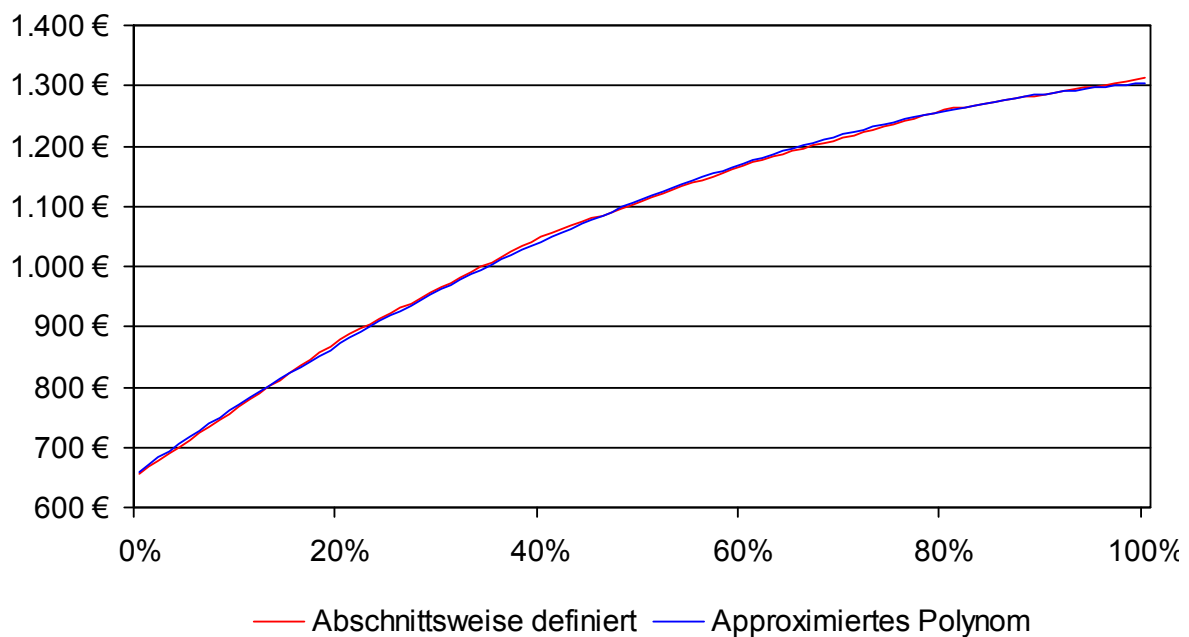


Bild 7.9: Approximation einer Tariftabelle durch ein Polynom zweiten Grades

Der Aufwand für die Bestimmung von  $v_{e(ij)}^r$  und  $f_{e(ij)}^r$ , der für jede Relation in jedem Auftragsdurchlauf betrieben werden muss, ist sehr hoch. Vor dem Hintergrund eines besseren Laufzeitverhaltens kann die vorgestellte Vorgehensweise durch eine Frachtkostenberechnung auf der Grundlage einer stetigen Funktion ersetzt werden. Die in Typ D dargestellte Kostenfunktion lässt sich durch ein Polynom zweiten Grades approximieren (Bild 7.9). Da die Frachtkosten im vorliegenden Modell lediglich als Steuerungsgröße genutzt werden, ist der geringe Fehler, der durch die Approximation auftritt, zu vertreten. Weitere Approximationsmöglichkeiten untersucht Brockmann für die Entfernungsabhängigkeit bestimmter Gewichtsklassen im GFT bzw. im herausgegebenen Tarifwerk des Bundesverbandes Spedition und Lagerei e. V. /BRO-1995/

### 7.4.5 Verortung

Unter Verortung wird im Rahmen dieses Modells die temporäre Anbindung von Versendern und Empfängern an das Transportnetzwerk verstanden. Auf diese Weise werden die Vor- und Nachläufe mit in die Optimierung einbezogen, um Verbundeffekte und Größenvorteile, die im Hauptlauf durch Konsolidierung realisiert werden können, möglichst umfassend auszuschöpfen.

Bei der Auflösung starrer Sammel- bzw. Verteilgebiete um die einzelnen Depots muss eine neue Regelung entwickelt werden, über welche Depots Versender und Empfänger an das Netzwerk angeschlossen werden sollen. Die Betrachtung verändert sich damit von einer depotorientierten Betrachtung (Bild 7.10, Alternative A) zu einer kundenorientierten Betrachtung (Bild 7.10, Alternativen B und C). Während die Sammel- bzw. Verteilgebiete von Depots grundsätzlich überschneidungsfrei gestaltet werden und somit eine eindeutige Zuordnung von Kunden und Depots gegeben ist, sind die dargestellten Alternativen B und C derart gestaltet, dass eine Anbindung der Kunden an das Netzwerk über mehrerer Depots realisiert werden kann.

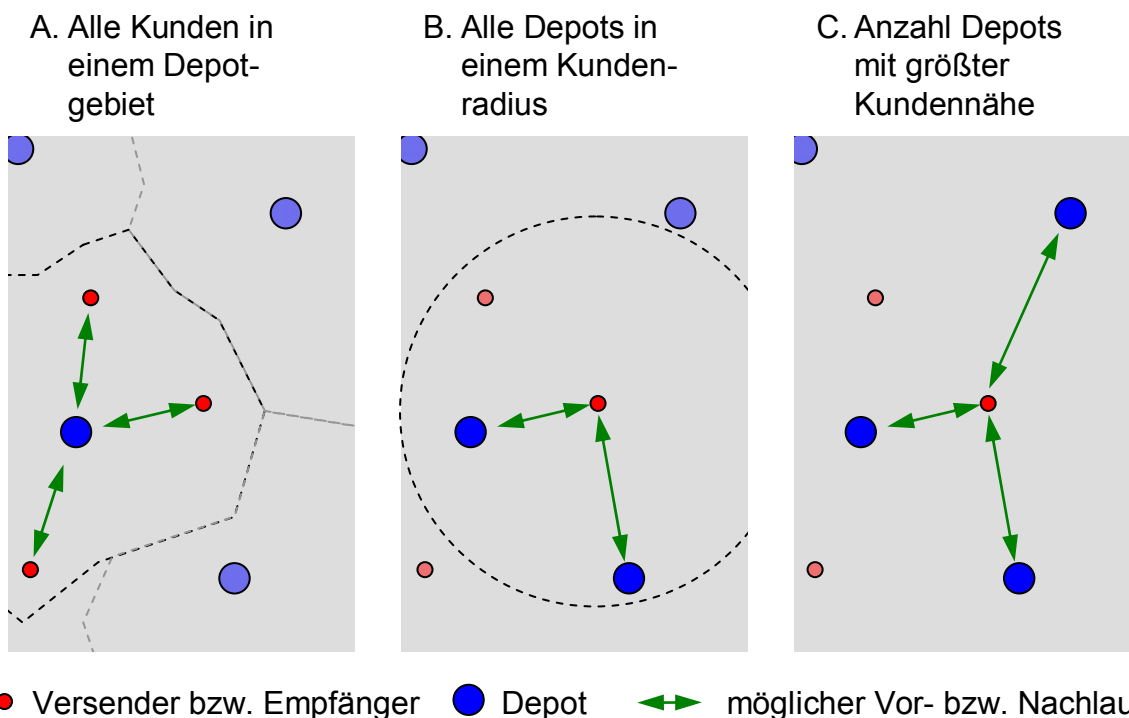


Bild 7.10: Möglichkeiten der Zuordnung von Kunden und Depots

Die Verbindung eines Kundenstandortes mit allen Depots des Netzwerkes stellt keine sinnvolle Vorgehensweise dar. Erfolgversprechende Depots, die gewisser-

maßen die Zugänge zum Netzwerk darstellen, sind quell- bzw. senkennah. Bei der Auswahl geeigneter Kandidaten ist es möglich, eine bestimmte Entfernung zu Grunde zulegen, innerhalb der alle Depots als Kandidaten ausgewählt werden (Bild 7.10 Alternative B). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine gewünschte Anzahl Kandidaten festzulegen, die einbezogen werden sollen (Bild 7.10 Alternative C).

Die Vorgehensweise in Alternative B sieht dabei so aus, dass die Entfernungen zu allen Depots bestimmt werden und anschließend die Depots ausgewählt werden, die eine bestimmte Entfernung nicht überschreiten. In Alternative C wird nach der Bestimmung aller Entfernungen eine Sortierung in aufsteigender Reihenfolge vorgenommen. Anhand dieser Sortierung kann eine gewünschte Anzahl an Kandidaten ausgewählt werden.

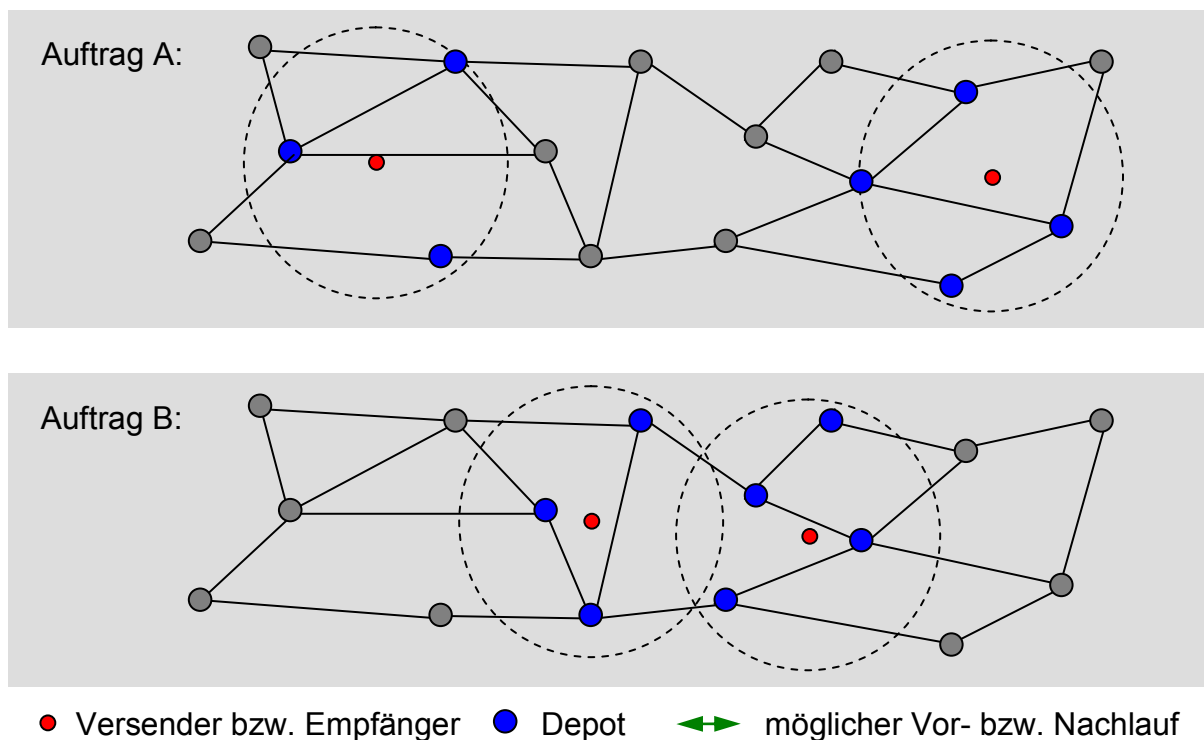


Bild 7.11: Zuordnung von Depots zu Kunden durch absolute Entfernungen

Es bleibt die Frage offen, wie groß die in Alternative B zu wählende Entfernung ist bzw. wie viele Depots in Alternative C ausgewählt werden sollen. Grundsätzlich können diese Angaben parametrisiert werden und es wird dem jeweiligen Nutzer und Anwendungsfall überlassen, hierfür möglichst gute Werte auszuwählen. Am Beispiel von Alternative B kann verdeutlicht werden, dass für die Entfernung nur ein einziger Wert festgelegt werden muss. Die durch die einzelnen Aufträge gegebenen unter-



schiedlichen Strukturen lassen sich damit allerdings nicht zufrieden stellend abbilden (Bild 7.11).

Wird statt einer festen Entfernung mit einem Verhältnis aus maximaler Vor- bzw. Nachlauflänge und Gesamtentfernung gearbeitet, ergibt sich für Aufträge mit einer großen Gesamtentfernung ein großer Suchraum für Depotkandidaten und für Aufträge mit geringer Gesamtentfernung ein kleinerer Suchraum für Depotkandidaten (Bild 7.12) /SCH-2006/. Bei dieser Vorgehensweise wird zu Grunde gelegt, dass die Kosten im Vor- und Nachlauf im Verhältnis zu den Hauptlaufkosten sehr hoch sind. Bei großen Gesamtentfernungen sind die Optimierungspotentiale durch Auftragskonsolidierung größer als bei kleinen Gesamtentfernungen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, bei kleinen Gesamtentfernungen nur Depots in der direkten Umgebung zu untersuchen, während bei größeren Gesamtentfernungen auch Vor- und Nachläufe zu weiter entfernt liegenden Depots untersucht werden sollen.

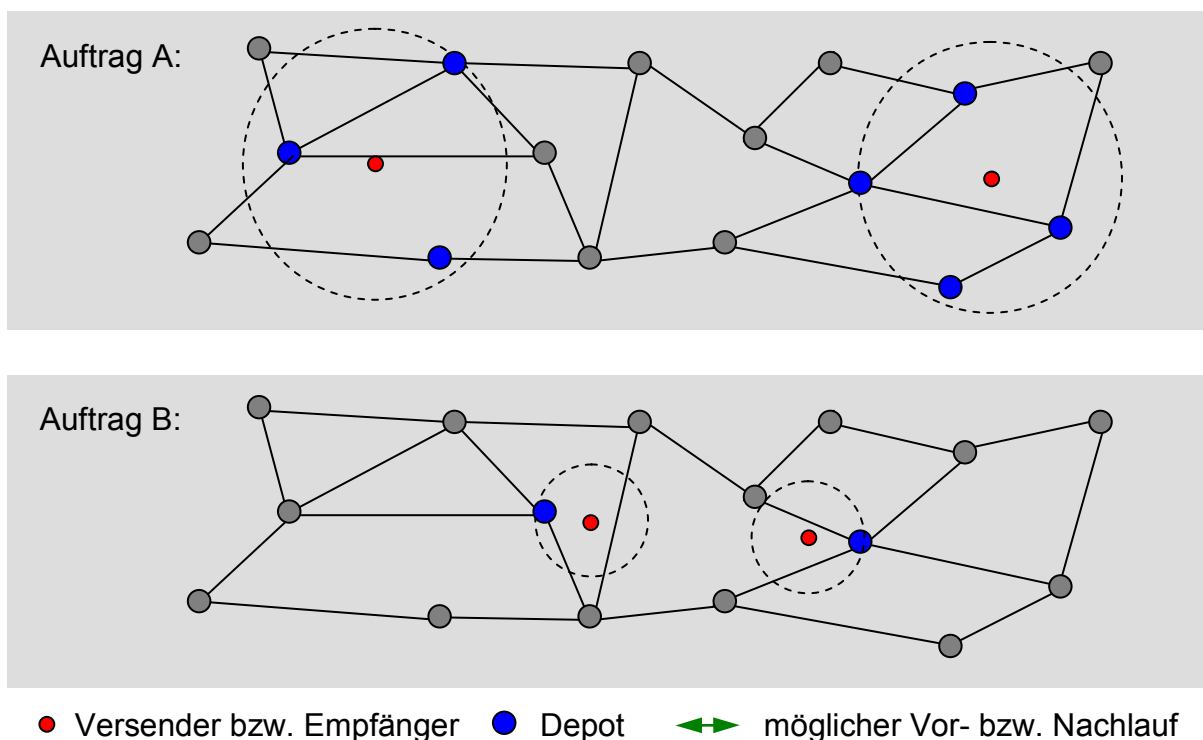


Bild 7.12: Zuordnung von Depots zu Kunden durch relative Entfernungen

In Bild 7.12 wurde ein Verhältnis aus maximaler Vor- bzw. Nachlauflänge zur Gesamtentfernung von ca. 25 % zu Grunde gelegt. Bei der Wahl dieses Parameters ist aber grundsätzlich die Netzstruktur wie z. B. die Depotdichte zu berücksichtigen. In jedem Fall muss sichergestellt werden, dass insbesondere bei geringen Gesamtent-

fernungen überhaupt Depotkandidaten gefunden werden. Im vorliegenden Modell wird zwar grundsätzlich die beschriebene Vorgehensweise gewählt, jedoch wird ein Kunde immer über mindestens ein Depot mit dem Netzwerk verbunden.

Nach der Depotauswahl wird die ermittelte Straßenentfernung, wie in Abschnitt 7.4.2 beschrieben, mit einem depotspezifischen Zeitverbrauch für den Nahverkehr multipliziert. Weiterhin wird die Umschlagsdauer berücksichtigt. Damit ist die minimale Vor- bzw. Nachlaufdauer im Rahmen einer Sammel- bzw. Verteiltour bekannt. Dieser Wert wird benötigt, um im Rahmen des Routings bspw. sicherzustellen, dass ausgehend von der frühesten Abfahrt beim Kunden die Hauptlaufabfahrten an den Depots erreicht werden.

Da die Kosten des Nahverkehrs nicht nur entfernungs- sondern auch mengenabhängig sind, wird zunächst überprüft, ob der Auftrag mit einem gewichts- oder flächenabhängigen Frachtsatz bewertet werden muss. Die hier hinterlegten Frachtsätze können nur auf einer Mischkalkulation beruhen, da die spätere Tourengestaltung noch nicht bekannt ist. Die ermittelte Entfernung wird mit dem entsprechenden depotspezifischen Kostensatz für den Nahverkehr und mit der Auftragsmenge multipliziert. Mit dem so ermittelten Kostensatz liegt eine geeignete Kantenbewertung für das Routing vor.

#### **7.4.6 Kürzeste-Wege-Suche**

Ein kurzer Überblick über die besonderen Anforderungen bei der Kürzeste-Wege-Suche im mehrdimensionalen Fall wurde bereits in Abschnitt 6.3.2.3 gegeben. Da es sich bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz um ein kostenorientiertes Modell handelt, erfolgt die Optimierung anhand der in Abschnitt 7.4.4 dargestellten monetären Kantenbewertungen. Der zeitliche Aspekt stellt neben den Kapazitätsbeschränkungen die wesentliche Nebenbedingung dar. Anders als in der klassischen Definition des SPPTW sind jedoch nicht die Knoten, also die Depots, mit festgelegten Zeitfenstern ausgestattet, sondern die Kanten, also die Linienverkehre zwischen den Depots.

Über den Fahrplan des Liniennetzes hinaus muss für die früheste Abfahrt beim Versender und die späteste Ankunft beim Empfänger eine Uhrzeit berücksichtigt werden. Späteste Abfahrt beim Versender und früheste Ankunft beim Empfänger

sind hingegen nicht relevant, da diese Beschränkungen über eine Pufferung am jeweiligen Depot, über das die Sammel- bzw. Verteiltour abgewickelt wird, abgefangen werden können.

Jeder Knoten kann zu unterschiedlichen Zeiten und zu unterschiedlichen Kosten mehrfach erreicht werden. Für die weitere Wegüberprüfung müssen diese Label separat weiterverfolgt werden, da Wege mit niedrigeren Kosten, aber späterer Ankunftszeit auf dem weiteren Weg möglicherweise nicht mehr das Ziel erreichen können.

Wege, die zu höheren Kosten und bei gleicher oder gar späterer Ankunftszeit am selben Knoten eintreffen, können von der weiteren Überprüfung ausgeschlossen werden, da diese durch den kostengünstigeren und zumindest zeitgleichen Weg dominiert werden. Die Wege werden also an den Knoten mit Zeit und Kosten gespeichert. Die Weiterberechnung erfolgt anschließend, um die Zeitbedingungen einzuhalten, mit der frühesten Ankunft.

Die Ausgangsbasis der zeitlichen Komponente stellen Fahrpläne dar, wie sie im öffentlichen Personenverkehr aber auch im Systemverkehr gegeben sind. Diese Linienfahrpläne beinhalten ein regelmäßig wiederkehrendes Transportangebot. Auf der Basis eines solchen Fahrplanes, der für jede Relation Start- und Zielzeit beinhaltet, wurde für den Routingalgorithmus eine Erweiterung geschaffen, die sicherstellt, dass auf einem Weg nur Kanten aufeinander folgen, die erreichbar sind. Weiterhin werden nur Lösungen zugelassen, die sich innerhalb des beim Auftrag hinterlegten Zeitfensters befinden.

Die Startzeit einer Kante ist die Zeit, an der die Sendung zum Verladen zur Verfügung stehen muss. Die Endzeit einer Kante ist die Zeit, zu der die Sendung der Kante für die Verladung auf eine nachfolgende Kante zur Verfügung steht. Bei der Modellbildung wurde von einem Transportsystem mit einer Zuverlässigkeit von 100 % ausgegangen. Mögliche Verspätungen oder vollständige Ausfälle von Kanten finden in der Planung keine Berücksichtigung. Bei der Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung, die z. B. über einen größeren Zeitpuffer abgebildet werden könnten, muss immer berücksichtigt werden, dass dies nur zu Lasten der Systemleistung möglich ist. In vielen Fällen ist es daher besser, mit realistischen Fahr-

plänen zu rechnen und im Falle von Ausfällen und Verspätungen Mehrkosten für zusätzliche Fahrzeuge zu akzeptieren.

Während der Initialisierung wird das erste temporäre Label für  $o$  erzeugt. Dabei werden die Kosten auf null gesetzt,  $t_s^{FAB}$  wird als Ankunftszeit  $t_{p(o)}^{Ankunft}$  des aktuellen Pfades gesetzt und  $p(o)$  wird als leer markiert. Bei dem hier vorgestellten Algorithmus ist es nach dem Durchlauf nicht nötig, den Weg anhand der Vorgänger zu rekonstruieren. Mit  $p(o)$  werden in einer Zeichenkette alle genutzten  $e(i, j)$  gespeichert, wodurch der Pfad eindeutig beschrieben wird.

In der Schleife wird  $L^{temp}$  nach dem Label mit den geringsten Kosten durchsucht. Handelt es sich dabei um ein Label, das als erreichten Knoten  $d$  ausweist, wird der Algorithmus abgebrochen. Sonst wird für alle  $e(i, j) \in E$ , für die entweder  $t_{p(o)}^{Ankunft} \leq t_{e(i,j)}^{FAB}$  und  $t_{e(i,j)}^{FAN} \leq t_s^{SAN}$  oder  $t_{e(i,j)}^{FAB} < t_{p(o)}^{Ankunft} \leq t_{e(i,j)}^{SAN}$  und  $t_{p(o)}^{Ankunft} + \Delta t_{e(i,j)} \leq t_s^{SAN}$  gilt, ein neues Label generiert. Die genannten Bedingungen stellen die Einhaltung der Zeitrestriktionen sicher. Da die Kapazitätsrestriktionen der Kanten des Netzwerkes bereits im Vorlauf zum SPP überprüft werden können, muss diese Überprüfung im SPP nicht mehr erfolgen. Ist  $L^{temp}$  leer, wird die Schleife beendet. In diesem Fall wurde kein gültiger Pfad zur Senke gefunden.

Die neuen Label werden mit den bekannten Attributen erstellt. Zu den Kosten eines Pfades  $c_{p(o)}$  wird  $c_{e(ij)}$  addiert.  $t_{p(o)}^{Ankunft}$  ergibt sich aus dem Maximum von  $t_{p(o)}^{Ankunft}$  zuzüglich  $\Delta t_{e(ij)}$  sowie  $t_{e(ij)}^{FAN}$ .  $t_{e(ij)}^{FAN}$  ist die früheste Ankunft von  $e(ij)$ , die nur dann realisiert werden kann, wenn die Kante zum Zeitpunkt der frühesten Abfahrt  $t_{e(ij)}^{FAB}$  an  $e(ij)$  beginnt. Dafür muss  $t_{p(o)}^{Ankunft} \leq t_{e(ij)}^{FAB}$  gegeben sein. Gilt  $t_{p(o)}^{Ankunft} > t_{e(ij)}^{FAB}$ , so wird die Ankunft an  $j$  zum Zeitpunkt  $t_{p(o)}^{Ankunft} + \Delta t_{e(ij)}$  erfolgen. Zur Erstellung des Pfades von  $o$  nach  $j$  wird an  $p(o)$  die Kante  $e(ij)$  angehängt (Algorithmus 7.1).

(Initialisierung)

$$t_{p(oi)}^{Ankunft} := t_s^{FAB}$$

$$L_o^{temp} := \{[(0, t_{p(oi)}^{Ankunft}), (-, o)]\}$$

(Schleife)

do until  $L^{temp} = \{ \}$ wähle  $l_{p(oi)}$  mit  $l_{p(oi)} = \min_{l_{p(oi)} \in L^{temp}} C_{p(oi)}$ if  $i = d$  then

end do

for  $e(ij)$  mit  $(t_{p(oi)}^{Ankunft} \leq t_{e(ij)}^{FAB}$  und  $t_{e(ij)}^{FAN} \leq t_s^{SAN}$ )oder  $(t_{p(oi)}^{Ankunft} \leq t_{e(ij)}^{SAB}$  und  $t_{p(oi)}^{Ankunft} + \Delta t_{e(ij)} \leq t_s^{SAN}) \forall e(ij) \in E$  do

$$C_{p(oj)} = C_{p(oi)} + C_{e(ij)}$$

$$t_{p(oj)}^{Ankunft} = \max[t_{p(oi)}^{Ankunft} + \Delta t_{e(ij)}; t_{e(ij)}^{FAN}]$$

$$p(oj) = p(oi) \& e(ij)$$

$$L_j^{temp} := L_j^{temp} \cup \{[(C_{p(oj)}, t_{p(oj)}^{Ankunft}), (p(oj), j)]\}$$

$$L_j^{temp} := \text{Eff}(L_j^{temp} \cup L_j^{perm}) \setminus L_j^{perm}$$

next for

$$L^{perm} := L^{perm} \cup \{l_{p(oi)}\}$$

$$L^{temp} := L^{temp} \setminus \{l_{p(oi)}\}$$

loop

## Algorithmus 7.1: Entwickelter „Kürzeste-Wege-Algorithmus“ mit Zeitfenstern

Bei der beschriebenen Vorgehensweise werden auch Label erzeugt, die wie in Abschnitt 6.3.2.3 beschrieben, dominiert werden bzw. andere Label dominieren. Um zu verhindern, dass auch alle dominierten Label untersucht werden müssen, ist es deshalb sinnvoll, nach der Erstellung eines Labels für  $j$  zu überprüfen, welche Label an  $j$  zur effizienten Teilmenge aus  $L_j^{temp} \cup L_j^{perm}$  gehören. Um die im weiteren Verlauf zu untersuchenden Label zu erhalten, muss von dieser Teilmenge aber noch die Menge der bereits untersuchten Label  $L_j^{perm}$  abgezogen werden. Den Abschluss der Schleife bildet die Überführung des untersuchten Labels  $l_{p(oi)}$  in die Menge der permanenten Label.

Bei der EDV-Implementierung des Algorithmus kann der Ausschluss von dominierten Labeln dahingehend angepasst werden, dass nicht nach der Erstellung jedes Labels eine Testung auf Effizienz durchgeführt wird, sondern erst nach einer festgelegten Anzahl an Iterationen. Da nicht nur jede durchgeführte Testung eines Labels Zeit

verbraucht, sondern auch jeder Effizienztest Zeit benötigt, muss hierfür ein optimales Verhältnis ermittelt werden.

Eine Erweiterung der beschriebenen Effizienztestung kann durch eine Schätzfunktion erreicht werden. In Anlehnung an den A-Stern-Algorithmus wird in diesem Modell nun während der Berechnung jeder erreichte Knoten daraufhin untersucht, ob von diesem nach einer rechnerisch bestimmten Dauer das Ziel noch innerhalb der vorgegebenen Zeit erreicht werden kann. Dazu wird zunächst die Entfernung zwischen jedem einzelnen Knoten und der Senke berechnet und dann durch Hinzuziehen einer angenommenen maximalen Durchschnittsgeschwindigkeit die theoretisch noch verbleibende Mindesttransportdauer errechnet. Erreicht ein Weg einen Knoten zu einem Zeitpunkt, von dem auf Grundlage des Schätzwertes die Senke nicht mehr innerhalb der geforderten Zielzeit des Auftrages erreicht werden kann, muss dieser nicht weiter untersucht werden.

Wurde der kostenminimale Weg gefunden, wird der genutzte Weg gespeichert. Dies geschieht zum einen sendungsorientiert. In einer Ergebnistabelle werden alle Sendungen mit den genutzten Knoten und Kanten sowie den entlang des Pfades angefallenen Kosten gespeichert. Die Ergebnisspeicherung erfolgt aber auch an den genutzten Kanten, um zum einen die bereits verplanten Kapazitäten zu protokollieren und zum anderen, um, wie in Abschnitt 7.4.4 beschrieben, die den Aufträgen bereits zugewiesenen Kosten den Kanten zuzuordnen.

## **7.5 Teilterminierung von Kanten**

Im Folgenden wird ein neu entwickelter Ansatz vorgestellt, mit dem das Modell dahingehend erweitert wird, dass auch Kanten, für die keine konkrete Abfahrts- und Ankunftszeit vorliegen, in die Planung mit einbezogen werden können. Zunächst soll kurz dargestellt werden, aus welchen Gründen die Notwendigkeit zur Teilterminierung von Kanten besteht. Dann werden der Ansatz und die Implementierung in das Gesamtmodell beschrieben.

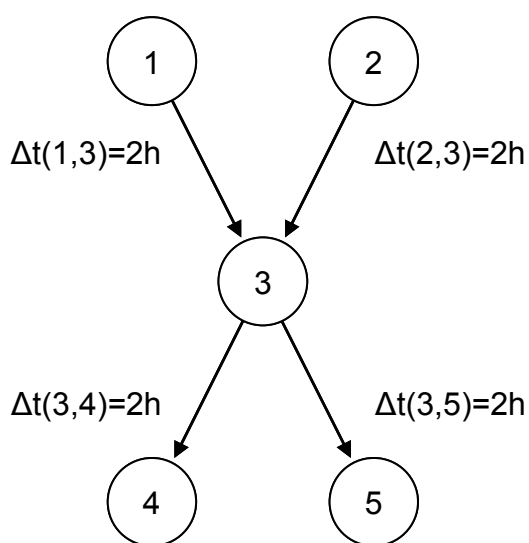
### **7.5.1 Motivation**

Die Erweiterung des Modells um Kanten, die keinen genauen Abfahrtszeitpunkt und damit auch keinen genauen Ankunftszeitpunkt haben, kann im Wesentlichen unter

zwei Gesichtspunkten erfolgen. Zum einen kann es notwendig sein, das durch einen Linienfahrplan vorgegebene eigene Transportangebot durch Angebote Dritter zielgerichtet zu ergänzen. Zum anderen kann mit der Teilterminierung von Kanten ein komplett unterterminiertes Netzwerk auf der Basis eines gegebenen Auftragspools vollständig terminiert werden. Auf diese Weise lassen sich Aspekte der taktischen Planung, wie sie im DSND-Problem formuliert werden, lösen.

In der Literatur wurden bereits Ansätze für das DSND-Problem diskutiert /POW-2007/. Zugrunde liegt dabei in der Regel ein deterministisches Zeit-Raum-Netzwerk. In der Praxis können die daraus resultierenden riesigen Netzwerke nur durch größere Zeitintervalle handhabbar gemacht werden. Dies geht zu Lasten der Lösungsqualität. Eine Alternative besteht weiterhin darin, die Netzwerke zu reduzieren /WIE-2008/.

Soll ein bestehendes Transportangebot durch zusätzliche Verbindungen ergänzt werden, weil beispielsweise einzelne Aufträge durch das bestehende Netzwerk nicht bearbeitet werden können, stellt sich in der vorgestellten Vorgehensweise das Problem, wie die zusätzlichen Kanten zeitlich in das bestehende Netzwerk eingebunden werden sollen. Eine zusätzlich eingefügte Kante kann von unterschiedlichen Aufträgen zu verschiedenen Zeitpunkten benötigt werden. Bei der Einbindung einer neuen Kante können sehr einfache Strategien verfolgt werden, bei denen eine Kante durch die erstmalige Nutzung im Planungsprozess vollständig festgelegt wird.



Sendung	O	D	FAB	SAN
1	1	5	08:00	18:00
2	2	5	07:00	13:00
3	1	4	09:00	15:00

Iteration	Kante	FAB	SAN
Initialisierung	(1,3)	06:00	20:00
	(2,3)	06:00	20:00
	(3,4)	06:00	20:00
	(3,5)	06:00	20:00

Bild 7.13: Beispielhaftes Transportnetzwerk mit Aufträgen

Erreicht ein Auftrag auf einem kostenminimalen Pfad  $i$  zum Zeitpunkt  $t_i^{FAN}$  und muss zu  $j$  weitertransportiert werden, kann grundsätzlich die Strategie verfolgt werden, dass die zusätzliche Kante  $i$  zum Zeitpunkt  $t_i^{FAN}$  verlässt und  $j$  zum Zeitpunkt  $t_i^{FAN} + \Delta t_{e(ij)}$  erreicht. Diese Vorgehensweise maximiert die Wahrscheinlichkeit, dass an  $j$  möglichst viele Nachfolgekanten erreicht werden. Eine andere Strategie besteht darin, die Kante so zu terminieren, dass sie die auf dem kostenminimalen Pfad nachfolgende Kante gerade noch erreicht. Eine derartige Vorgehensweise maximiert die Wahrscheinlichkeit, dass an  $i$  noch möglichst viele Folgeaufträge diese Kante erreichen können (Bild 7.14).

Festlegung der Kanten auf den frühesten Zeitpunkt

Iteration	Kante	Abfahrt	Ankunft
S <sub>1</sub> ✓	(1,3)	08:00	10:00
	(3,5)	10:00	12:00
S <sub>2</sub> ✓	(2,3)	7:00	09:00
	(3,5)	10:00	12:00
S <sub>3</sub> ✗	(1,3)	08:00	10:00
	(3,4)		

Festlegung der Kanten auf den spätesten Zeitpunkt

Iteration	Kante	Abfahrt	Ankunft
S <sub>1</sub> ✓	(1,3)	14:00	16:00
	(3,5)	16:00	18:00
S <sub>2</sub> ✗	(2,3)		
	(3,5)	16:00	18:00
S <sub>3</sub> ✗	(1,3)	14:00	16:00
	(3,4)		

Bild 7.14: Feste Terminierung der Kanten durch den ersten Auftrag

Diese einfachen Vorgehensweisen können durch genauere Betrachtungen der an  $i$  ankommenden Kanten und der an  $j$  abgehenden Kanten weiter differenziert werden. Aber auch das ändert nichts an der Tatsache, dass derart einfache Strategien die Kanten im Wesentlichen in Abhängigkeit vom ersten über die Kanten gerouteten Auftrag terminieren. Die Möglichkeiten für spätere Aufträge werden dadurch stark eingeschränkt.

Die Nutzung nicht terminierter Kanten kann sich als nützliches Werkzeug erweisen, da mit Hilfe eines charakteristischen Auftragsprofils und ausschließlich nicht terminierten Kanten ein neuer Fahrplan erstellt werden kann. In Abhängigkeit von der Auftragsreihenfolge wird ein möglichst guter Gesamtfahrplan erstellt. Um einen Fahrplan zu erstellen, der für möglichst viele Sendungen eine gültige Lösung ermög-



licht, müssen alternative Sortierreihenfolgen entwickelt werden. Eine mögliche Kennzahl für die Sortierung kann hierfür der Quotient aus erlaubter Transportdauer und Gesamtentfernung sein. Im Verhältnis zu anderen Aufträgen gibt diese Kennzahl an, wie groß das Zeitfenster für den Transport dimensioniert ist. Um einen Fahrplan zu generieren, der möglichst viele gültige Lösungen ermöglicht, muss davon ausgegangen werden, dass eine Sortierung anhand dieser Kennzahl in aufsteigender Reihenfolge erfolgen sollte.

Das Scheduling, also die Festlegung der Abfahrtstermine der einzelnen Kanten, wird mit den weiter oben beschriebenen einfachen Strategien zu sehr schlechten Lösungen führen. Eine Strategie, die für möglichst viele Aufträge zu einer gültigen Lösung führt, muss für alle folgenden Aufträge einen möglichst großen Lösungsraum bestehen lassen. Sowohl für die Einbindung einzelner Kanten als auch für die Terminierung des kompletten Netzwerkes wurde aus diesem Grund eine Teilterminierung von Kanten entwickelt.

### **7.5.2 Ansatz**

Für den Fall, dass für einzelne Kanten oder ein komplettes Netzwerk noch keine Fahrpläne vorliegen, wurde ein Algorithmus entwickelt, der die zeitlichen Restriktionen von Kanten mit jedem Auftrag nur soweit einschränkt, wie dies für diesen Auftrag unbedingt notwendig ist. Jede einzelne Kante wird dabei mit der höchstmöglichen Dauer terminiert, die aber in jedem Fall größer sein muss, als die Summe aus der Fahrzeit dieser Kante und der Umschlagsdauer an den Knoten.

Statt eines festen Start- und Endzeitpunktes werden bei dieser Vorgehensweise neben der FAB und der SAB auch die früheste Ankunft, kurz FAN, und die spätesten Ankunft, kurz SAN, einer Kante gesetzt. Das Zeitintervall zwischen FAB und FAN sowie zwischen SAB und SAN entspricht dabei der Summe aus Fahrzeit und Umschlagsdauer. Mit jedem weiteren Auftrag, der die betreffende Kante auf seinem kürzesten Weg nutzt, wird das Zeitfenster der Kante weiter verkleinert (Bild 7.15).

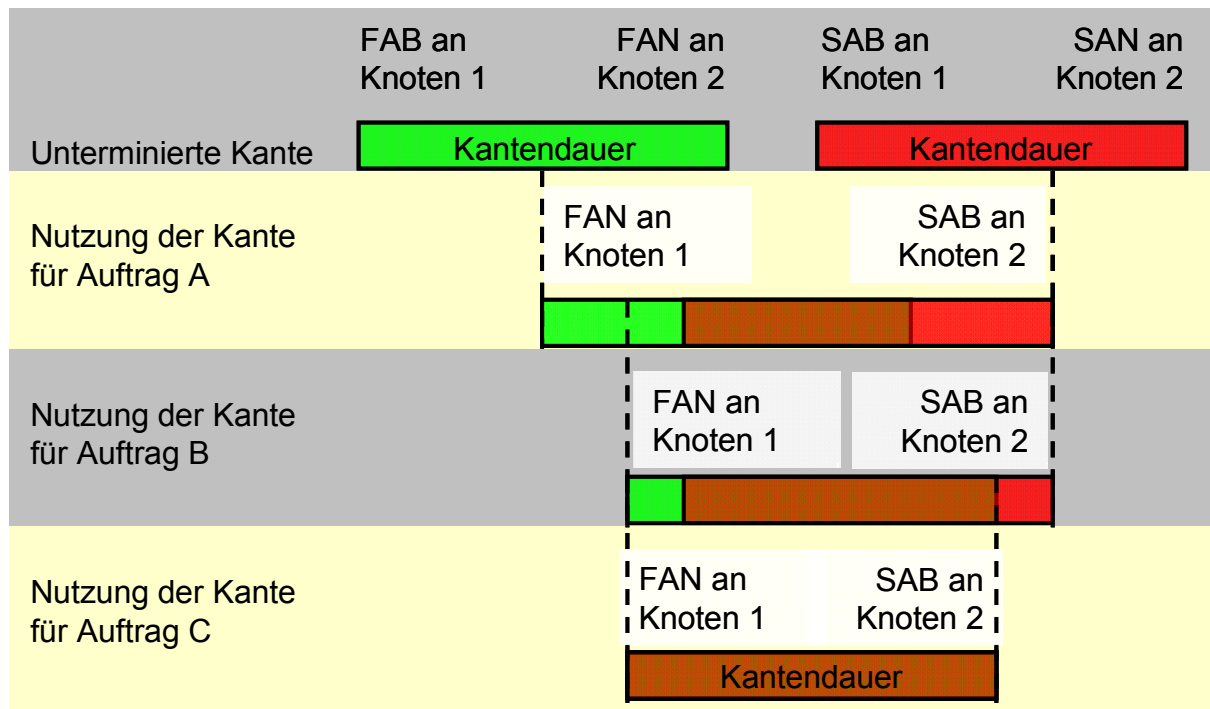


Bild 7.15: Schrittweise Terminierung von Kanten

Der Vorteil dieser Zeitfenster gegenüber der festen Terminierung einer Kante mit dem ersten Auftrag liegt in der höheren Verfügbarkeit der Kante für folgende Aufträge. Mit jedem Auftrag, der durch ein Netzwerk geroutet wird, können zusätzliche Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen entstehen. Fixe Zeitfenster stellen bei Kanten, für die Fahrpläne bestehen, sicher, dass diese Beziehungen zu keinen Problemen führen. Werden in ein bestehendes Netzwerk nur einzelne unterminierte Kanten eingebunden oder mehrere unterminierte Kanten in Reihe eingefügt, entstehen aus der beschriebenen Teilterminierung keine Probleme.

Werden in ein Netzwerk hingegen mehrere benachbarte unterminierte Kanten in beliebiger Struktur eingefügt oder wird mit einem vollständig unterminierten Netzwerk gearbeitet, muss für die korrekte Funktionsweise sichergestellt werden, dass alle Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen dokumentiert werden und dass Veränderungen in der Teilterminierung an abhängige Kanten weitergegeben werden.

Ohne Berücksichtigung  
der Abhängigkeiten

Iteration	Kante	FAB	SAN
S <sub>1</sub> ✓	(1,3)	08:00	16:00
	(3,5)	10:00	18:00
S <sub>2</sub> ✓	(2,3)	7:00	11:00
	(3,5)	10:00	13:00
S <sub>3</sub> ✓	(1,3)	09:00	13:00
	(3,4)	11:00	15:00

Mit Berücksichtigung  
der Abhängigkeiten

Iteration	Kante	FAB	SAN
S <sub>1</sub> ✓	(1,3)	08:00	16:00
	(3,5)	10:00	18:00
S <sub>2</sub> ✓	(1,3)	08:00	11:00
	(2,3)	07:00	11:00
	(3,5)	10:00	13:00
S <sub>3</sub> ✓	(1,3)	09:00	11:00
	(3,4)	11:00	15:00

Bild 7.16: Teilterminierung von Kanten

Mit dem Beispiel zur Teilterminierung (Bild 7.16) wird deutlich, wo der Vorteil der beschriebenen Vorgehensweise gegenüber der festen Terminierung durch den ersten Auftrag (Bild 7.14) liegt. Während die feste Terminierung im Beispiel einen bzw. zwei Aufträge nicht bearbeiten kann, da die Kanten zur benötigten Zeit nicht zur Verfügung stehen, ermöglicht die Teilterminierung eine optimale zeitliche Festlegung der Kanten, so dass alle Aufträge abgearbeitet werden können. Die Gegenüberstellung der Fälle „Ohne Berücksichtigung der Abhängigkeiten“ und „Mit Berücksichtigung der Abhängigkeiten“ zeigt allerdings auf, dass die Teilterminierung „Ohne Berücksichtigung der Abhängigkeiten“ fehleranfällig ist.

Im gewählten Zahlenbeispiel werden in beiden Fällen die Aufträge gelöst und die Lösung ist auch korrekt. Unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten wird bei S<sub>2</sub> zusätzlich zu den direkt fälligen Änderungen der Kanten (2,3) und (3,5) auch die Terminierung der Kante (1,3) angepasst, da aus S<sub>1</sub> eine Abhängigkeit zur Kante (3,5) besteht. Da das SAN von Kante (3,5) von 18:00 Uhr auf 13:00 Uhr vorverlegt wurde, musste auch das SAN von Kante (1,3) auf 11:00 Uhr verschoben werden, um sicherzustellen, dass diese Kantenkombination immer gültig ist.

### 7.5.3 Vorgehensweise

Wird das in Bild 7.13 dargestellte Zahlenbeispiel geringfügig verändert, wird deutlich, warum der dargestellte Schritt wichtig ist. Das SAN von Sendung 2 wird von 13:00 Uhr auf 12:00 Uhr vorverlegt. Damit ergeben sich zwei neue Tabellen.

Ohne Berücksichtigung der Abhängigkeiten

Iteration	Kante	FAB	SAN
S <sub>1</sub> ✓	(1,3)	08:00	16:00
	(3,5)	10:00	18:00
S <sub>2</sub> ✓	(2,3)	7:00	10:00
	(3,5)	10:00	12:00
S <sub>3</sub> ✓	(1,3)	09:00	13:00
	(3,4)	11:00	15:00

Mit Berücksichtigung der Abhängigkeiten

Iteration	Kante	FAB	SAN
S <sub>1</sub> ✓	(1,3)	08:00	16:00
	(3,5)	10:00	18:00
S <sub>2</sub> ✓	(1,3)	08:00	10:00
	(2,3)	07:00	10:00
	(3,5)	10:00	12:00
S <sub>3</sub> ✗	(1,3)	08:00	10:00
	(3,4)		

Bild 7.17: Relevanz der Berücksichtigung von Abhängigkeiten

Nur noch die Tabelle „Ohne Berücksichtigung der Abhängigkeiten“ weist drei gelöste Sendungen auf. Während mit der Vorgehensweise in Tabelle „Mit Berücksichtigung der Abhängigkeiten“ richtiger Weise festgestellt wird, dass nach der Verplanung der Sendungen 1 und 2 die dritte Sendung nicht mehr durchführbar ist. Ohne Berücksichtigung der Abhängigkeiten wird bei der vorliegenden Konstellation eine Lösung ausgewiesen, bei der die Sendung 1 über die Kanten (1,3) und (3,5) nicht mehr transportiert werden kann. Bei einem FAB um 09:00 Uhr an Kante (1,3) kann Kante (3,5) nicht mehr rechtzeitig erreicht werden.

In Algorithmus 7.2 wird zunächst dargestellt, wie die Zeitfenster der Kanten, die durch den Pfad direkt genutzt werden, auf der Grundlage der Sendungsspezifikationen bzw. der gegenseitigen Abhängigkeiten verändert werden. Algorithmus 7.4 stellt die nachgelagerten Schritte dar, die notwendig sind, um alle Abhängigkeiten durch früher abgewickelte Sendungen zu verfolgen /GER-2008/.

(Schleife 1)

$$Q := \{e_n, e_{n-1}, e_{n-1}, \dots, e_2, e_1\} \forall e \in p(oi)$$

$$\hat{t}_{e_n}^{SAN} := t_d^{SAN}$$

for  $n = \max(n)$  to 1

$$e_n := Q[SK]$$

$$Q := Q \setminus \{e_n\}$$

if  $\hat{t}_{e_n}^{SAN} < t_{e_n}^{SAN}$  then

$$t_{e_n}^{SAN} := \hat{t}_{e_n}^{SAN}$$

$$t_{e_n}^{SAB} := \hat{t}_{e_n}^{SAN} - \Delta t_{e_n}$$

$$t_{e_n}^{-SAN} := 1$$

$$\hat{t}_{e_{n-1}}^{SAN} := t_{e_n}^{SAB}$$

$$\hat{t}_{e_{n-1}}^{SAN} := t_{e_n}^{SAN} - \Delta t_{e_n}$$

next for

(Schleife 2)

$$Q := \{e_1, e_2, \dots, e_{n-1}, e_n\} \forall e \in p(oi)$$

$$\hat{t}_{e_n}^{FAB} := t_o^{FAB}$$

for  $n = 1$  to  $\max(n)$ 

$$e := Q[SK]$$

$$Q := Q \setminus \{e\}$$

if  $\hat{t}_{e_n}^{FAB} > t_{e_n}^{FAB}$  then

$$t_{e_n}^{FAB} = \hat{t}_{e_n}^{FAB}$$

$$t_{e_n}^{FAN} = \hat{t}_{e_n}^{FAB} + \Delta t_{e_n}$$

$$t_{e_n}^{-FAB} = 1$$

$$\hat{t}_{e_{n+1}}^{FAB} = t_{e_n}^{FAN}$$

$$\hat{t}_{e_{n+1}}^{FAB} = t_{e_n}^{FAB} + \Delta t_{e_n}$$

next for

Algorithmus 7.2: Veränderung der direkt betroffenen Kantenzeitfenster

In der zweistufigen Vorgehensweise von Algorithmus 7.2 wird zunächst, wie in Schleife 1 dargestellt, eine Queue erstellt, die alle durch die Sendung genutzten Kanten  $e_n$  in inverser Reihenfolge ihrer Nutzung entlang des kürzesten Pfades enthält. Diese Queue wird dann am Schlangenkopf beginnend abgearbeitet. Als späteste Ankunft der letzten genutzten Kante  $\hat{t}_{e_n}^{SAN}$  wird zunächst  $t_s^{SAN}$  angesetzt.

In der Schleife wird nach der Auswahl der aktuellen Kante  $e_n$  und dem Entfernen von  $e_n$  aus der Queue eine Fallunterscheidung vorgenommen. Ist die für die Kante ermittelte späteste Ankunft  $\hat{t}_{e_n}^{SAN}$  früher als die an der Kante bis jetzt hinterlegte späteste Ankunft  $t_{e_n}^{SAN}$ , muss das Zeitfenster der Kante von  $t_{e_n}^{SAN}$  auf  $\hat{t}_{e_n}^{SAN}$  und von  $t_{e_n}^{SAB}$  auf  $\hat{t}_{e_n}^{SAN} - \Delta t_{e_n}$  verkleinert werden. In diesem Fall wird weiterhin die Binärvariable  $\overset{-SAN}{t}_{e_n}$  auf 1 gesetzt. Dieser Zeiger gibt für die im Weiteren beschriebene Vorgehensweise zur Verfolgung der Kantenabhängigkeiten an, an welcher Stelle weitere Zeitfensterverschiebungen zu erwarten sind. Für die Untersuchung der nächsten Kante  $e_{n-1}$  wird als letzter Schritt in der Schleife die späteste Ankunft der nächsten Kante  $\hat{t}_{e_{n-1}}^{SAN}$  fallweise auf  $t_{e_n}^{SAB}$  oder auf  $t_{e_n}^{SAN} - \Delta t_{e_n}$  gesetzt.

In der zweiten Stufe ist die Vorgehensweise genau die selbe, wie in der ersten Stufe, wobei jetzt eine Queue erstellt wird, die alle durch die Sendung genutzten Kanten in der Reihenfolge ihrer Nutzung entlang des kürzesten Pfades enthält. Auch diese Queue wird am Schlangenkopf beginnend abgearbeitet. Als früheste Abfahrt der ersten genutzten Kante  $\hat{t}_{e_n}^{FAB}$  wird  $t_s^{FAB}$  angesetzt.

In der Schleife wird nach der Auswahl der aktuellen Kante  $e_n$  und dem Entfernen von  $e_n$  aus der Queue wiederum eine Fallunterscheidung vorgenommen. Ist die für die Kante ermittelte früheste Abfahrt  $\hat{t}_{e_n}^{FAB}$  später, als die an der Kante bis jetzt hinterlegte früheste Abfahrt  $t_{e_n}^{FAB}$ , muss das Zeitfenster der Kante von  $t_{e_n}^{FAB}$  auf  $\hat{t}_{e_n}^{FAB}$  und von  $t_{e_n}^{FAN}$  auf  $\hat{t}_{e_n}^{FAB} + \Delta t_{e_n}$  verkleinert werden. In diesem Fall wird weiterhin die Binärvariable  $\overset{-FAB}{t}_{e_n}$  auf 1 gesetzt. Für die Untersuchung der nächsten Kante  $e_{n+1}$  wird als letzter Schritt in der Schleife die früheste Abfahrt der nächsten Kante  $\hat{t}_{e_{n+1}}^{FAB}$  fallweise auf  $t_{e_n}^{SAB}$  oder auf  $t_{e_n}^{FAB} + \Delta t_{e_n}$  gesetzt.

Für jede Sendung mit einem zulässigen Pfad durch das Netzwerk müssen die Kanten des Pfades gemäß Algorithmus 7.3 dokumentiert werden. Diese Dokumentation ist notwendig, um ausgehend von den in Algorithmus 7.2 veränderten Zeitfenstern alle Zeitfenster im Netzwerk anpassen zu können, die Abhängigkeiten aufweisen. Mit

$Q$  wird eine Queue erstellt, die alle durch die Sendung genutzten Kanten in der Reihenfolge ihrer Nutzung entlang des kürzesten Pfades enthält. Dabei werden allerdings nur die  $e$  berücksichtigt, die zur Menge der permanent zum Netzwerk gehörenden Kanten  $E^{perm}$  zählen. In einer Schleife werden die Kanten  $e$  und  $e^*$  paarweise zu Vorgängermengen  $V(e)$  und Nachfolgermengen  $N(e)$  hinzugefügt. Diese Mengen beschreiben die voneinander abhängigen Kanten. Die Schleife bricht ab, sobald die Queue leer ist.

```

 $Q := \{e_1, e_2, \dots, e_{n-1}, e_n\} \forall e \in p(oi), e \in E^{perm}$ 
do
   $e := Q[SK]$ 
   $Q := Q \setminus \{e\}$ 
  if  $Q = \{\}$  then
    end do
   $e^* := Q[SK]$ 
   $N(e) := N(e) \cup \{e^*\}$ 
   $V(e^*) := V(e^*) \cup \{e\}$ 
loop

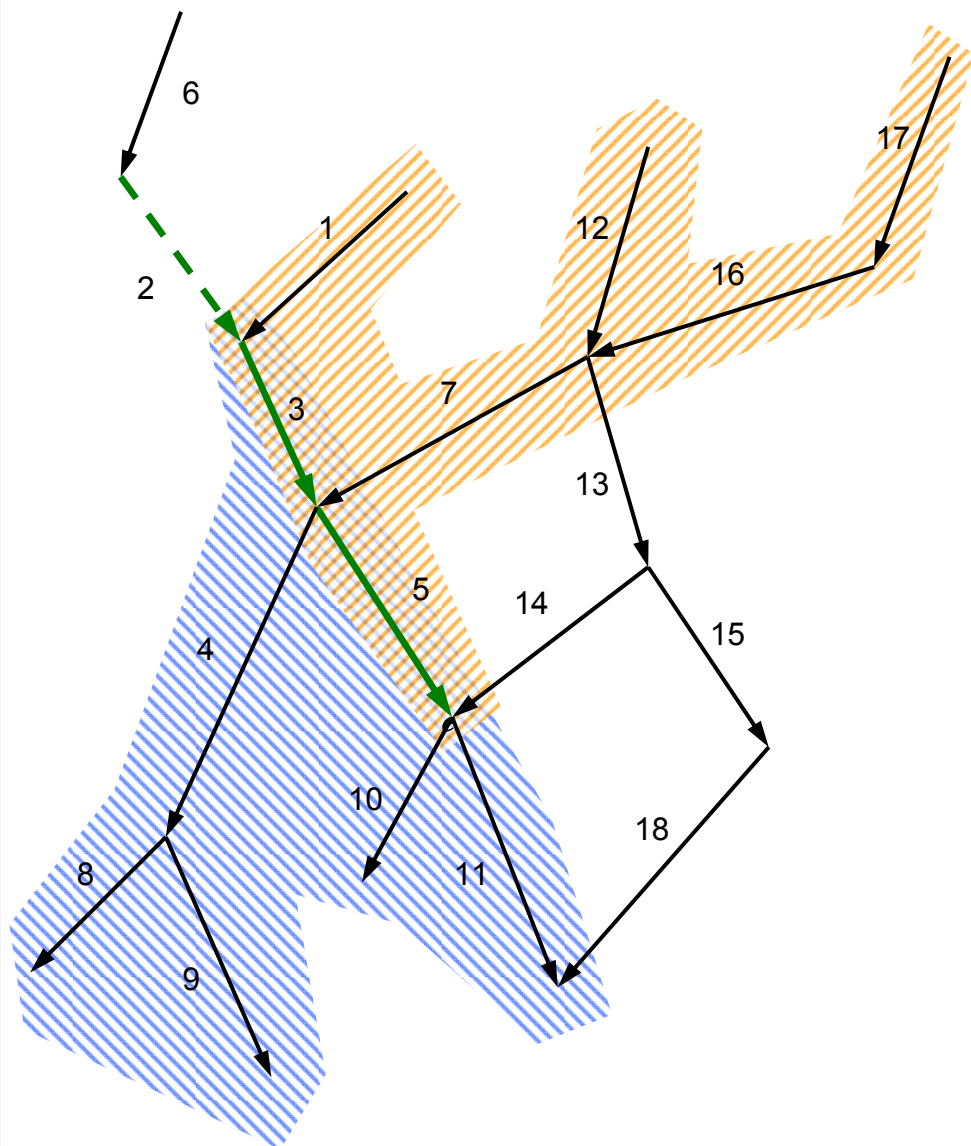
```

### Algorithmus 7.3: Dokumentation der Kantenabhängigkeiten

Eine Tabelle, die Kanten und ihre abhängigen Kanten beinhaltet, kann mehrere der in Bild 7.18 dargestellten Bäume beinhalten. Der grün dargestellte Pfad stellt dabei den im letzten Auftrag genutzten Pfad dar. Während beim grün gestrichelten Teil des Pfades keine Anpassung der Zeitfenster durch Algorithmus 7.2 notwendig gewesen ist, wurden im durchgängig grün markierten Teil des Pfades sowohl die FAB als auch die SAN der Kanten verändert. Die blau schraffierte Fläche kennzeichnet alle Kanten, für die in Algorithmus 7.4 überprüft werden muss, ob die FAB und FAN ggf. angepasst werden müssen. Die orange schraffierte Fläche kennzeichnet alle Kanten, für die in Algorithmus 7.4 überprüft werden muss, ob die SAB und SAN ggf. angepasst werden müssen.

Die dargestellten Flächen werden dann unterbrochen, wenn sich bei der Untersuchung herausstellt, dass die Zeitfenster einer Kante nicht weiter eingeschränkt werden müssen. Ist z. B. Kante 16 bereits vollständig terminiert, wird auf eine Untersuchung von Kante 17 verzichtet.

$e$	$N(e)$
1	3
3	4
3	5
2	3
6	2
7	4
7	5
4	8
4	9
5	10
5	11
12	7
12	13
13	14
14	10
14	11
13	15
16	13
16	7
17	16
15	18



- Genutzte Kante mit direkter Notwendigkeit einer Anpassung
- - → Genutzte Kante ohne direkte Notwendigkeit zur Anpassung
- Abhängige Kanten mit FAB und FAN Anpassung
- Abhängige Kanten mit SAB und SAN Anpassung

Bild 7.18: Anpassungsnotwendigkeit bei abhängigen Kanten

In Algorithmus 7.4 werden zunächst alle in Algorithmus 7.2 mit dem Wert  $\frac{-FAB}{t_e} = 1$  bewerteten Kanten in einer Menge  $E^{FAB}$  zusammengefasst. Ausgehend von dieser Menge werden in einer Schleife Kanten ausgewählt, um bei deren Nachfolgerkanten  $e^* \in N(e)$ , für die  $t_{e^*}^{FAB} < t_e^{FAN}$  gilt, die Zeitfenster zu verändern. Alle so behandelten



Kanten  $e^*$  werden wiederum in die Menge  $E^{FAB}$  aufgenommen, während die abgearbeiteten Kanten  $e$  aus  $E^{FAB}$  entfernt werden. Mit einer prinzipiell gleichen Vorgehensweise, wird auch mit allen Kanten verfahren, die mit dem Wert  $\bar{t}_e^{SAN} = 1$  bewertet wurden und die somit in der Menge  $E^{SAN}$  zusammengefasst werden. In dieser Schleife werden die Zeitfenster der Vorgänger der ausgewählten Kanten verändert.

(Schleife 1)

```

Do until  $E^{FAB} = \{\}$ 
  wähle  $e \in E^{FAB}$ 
  for  $e^* \in N(e), t_{e^*}^{FAB} < t_e^{FAN}$ 
     $t_{e^*}^{FAB} := t_e^{FAN}$ 
     $t_{e^*}^{FAN} := t_e^{FAN} + \Delta t_{e^*}$ 
     $E^{FAB} := E^{FAB} \cup \{e^*\}$ 
  next for
   $E^{FAB} := E^{FAB} \setminus \{e\}$ 
loop

```

(Schleife 2)

```

Do until  $E^{SAN} = \{\}$ 
  wähle  $e \in E^{SAN}$ 
  for  $e^* \in V(e), t_{e^*}^{SAN} > t_e^{SAB}$ 
     $t_{e^*}^{SAN} := t_e^{SAB}$ 
     $t_{e^*}^{SAB} := t_e^{SAB} - \Delta t_{e^*}$ 
     $E^{SAN} := E^{SAN} \cup \{e^*\}$ 
  next for
   $E^{SAN} := E^{SAN} \setminus \{e\}$ 
loop

```

Algorithmus 7.4: Berücksichtigung aller zeitlichen Abhängigkeiten im Netzwerk

Mit steigender Anzahl Sendungen, für die gültige Wege gefunden wurden, nimmt auch die Anzahl Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zu. Damit wird der Algorithmus 7.4 immer zeitintensiver. Für die EDV-Implementierung können zur Laufzeitverbesserung während Algorithmus 7.2 Marker gesetzt werden, um anzuzeigen, ob in Algorithmus 7.4 verzweigt werden muss.

## 8 EDV-basierte Umsetzung

Zum Nachweis der Lauffähigkeit des entwickelten Modells wurde eine Umsetzung als EDV-basierter Demonstrator vorgenommen. In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die Auswahl der Umsetzungsumgebung eingegangen. Danach wird auf einige Lösungsansätze zur Erleichterung der Datenpflege innerhalb der Umsetzungsumgebung sowie unter zur Hilfenahme eines externen Geoinformationssystems eingegangen.

### 8.1 Implementierung in ein Datenbankmanagementsystem

Eine exemplarische Aufstellung über die nationalen Netze der beiden Stückgutkooperationen CargoLine und IDS aus dem Jahr 2006 macht deutlich, wie viele Informationen bei der Optimierung verarbeitet werden müssen (Tabelle 8.1). Insbesondere vor dem Hintergrund der großen Anzahl an Relationen und Sendungen wurde für die Verwaltung der Daten eine Datenbank vorausgesetzt.

Tabelle 8.1: Netzgrößen beispielhafter Stückgutkooperationen /STÖ-2007/

	Cargoline	IDS
Anzahl Standorte	46	42
Anzahl Linien (täglich)	1.140	1.522
Netzdichte	ca. 54 %	ca. 86 %
Anzahl Sendungen national pro Jahr	ca. 7.000.000	ca. 7.690.000
Anzahl Sendungen national pro Tag (bei 250 Tagen pro Jahr)	28.000	30.760

Das Ziel des vorliegenden Modells ist es, einen Ansatz zur Optimierung des Auftragspools zu entwickeln und umzusetzen. Die einfachste Umsetzung besteht darin, die auf einem Rechner zentral in einer Datenbank vorhandenen Informationen auch auf diesem Rechner zu verarbeiten. Der Verzicht auf eine Implementierung im Netzwerk ist wegen der ständigen Zugriffe auf die Datenbank aus Performancegründen von Vorteil. Als weit verbreitete Lösung für eine solche Umsetzung bietet sich das Datenbankmanagementsystem Access von Microsoft an, das den Nutzer bei der

Entwicklung einer Datenbankanwendung maßgeblich unterstützt. Mit Hilfe der integrierten Programmiersprache Visual Basic for Applications lässt sich in diesem Datenbanksystem zudem eine Umsetzung des beschriebenen Modells mit vertretbarem Aufwand abbilden.

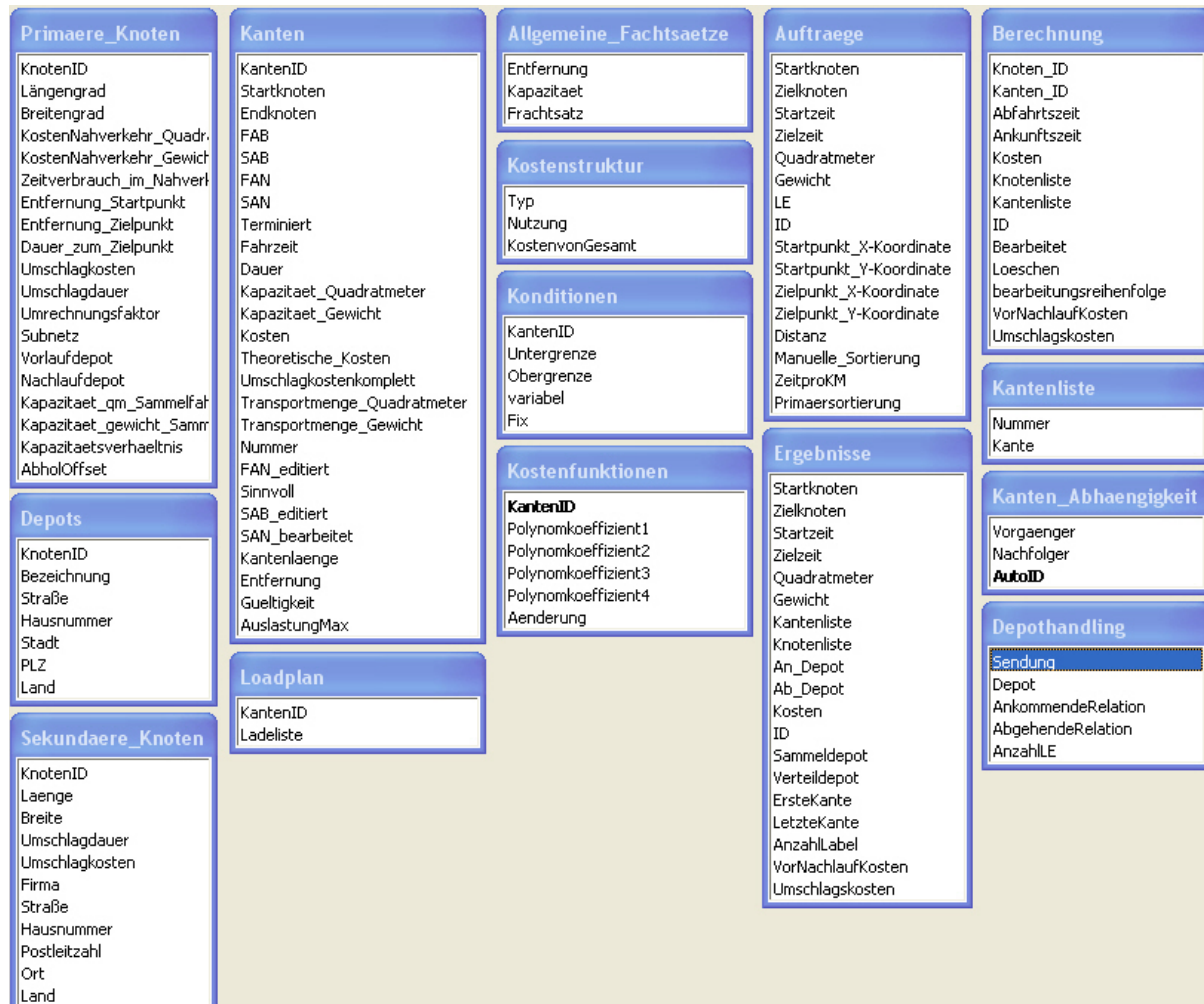


Bild 8.1: Entwickelte Datenbankstruktur in Access

## 8.2 Erleichterung der Datenpflege

Das primäre Ziel ist die Entwicklung und Umsetzung einer Methodik zur Optimierung eines Auftragspools. Die Erhebung und Pflege der hierfür notwendigen Daten stehen damit zwar nicht im Mittelpunkt, dennoch muss vor dem Hintergrund der Modellvalidierung die Möglichkeit geschaffen werden, komfortabel Daten zu erfassen. Sogar bei der Verfügbarkeit von Realdaten ist der reine Datei-Import und die Arbeit in den daraus resultierenden Tabellen nicht zweckmäßig, da die Daten in der in diesem Modell notwendigen Form in der Praxis nicht verfügbar sind. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt zentrale Eingabemasken beschrieben, die wesentliche

Hilfen für die Dateneingabe und Pflege zur Verfügung stellen. Darüber hinaus werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie unter Verwendung von MapPoint manuelle Erfassungstätigkeiten weiter reduziert werden können. Die Berechnungsroutinen und die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Eingabemasken werden über ein zentrales Steuerungsmenü angesprochen. In den Registerblättern dieses Formulars werden darüber hinaus alle Berechnungsparameter gepflegt (Bild 8.2).

Bild 8.2: Hauptmenü der grafischen Oberfläche

### 8.2.1 Verwalten der Knoten

Die im Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Daten zur genauen Beschreibung der Versender und Empfänger sowie der Depots werden über zwei separate Formulare erfasst. Während im Formular „Verwalten der Versender und Empfänger“ im wesentlichen Adressdaten erfasst werden, ist es im Formular „Verwalten der Depots“ darüber hinaus möglich, auch Vor- und Nachlaufinformationen sowie Umschlagsinformationen zu hinterlegen.

Da die Angabe zu den Verladekosten bei den Versendern und Empfängern unabhängig vom Weg durch das Netzwerk immer gleich in die Berechnung eingeht, ist die Angabe als optional anzusehen. Darüber hinaus sind die Verladekosten in der Regel in den Vor- und Nachlaufkosten eingepreist. Die Umschlagsdauer bei den Versendern und Empfängern kann mit einem Standardwert vorbelegt werden. Lediglich bei Versendern bzw. Empfängern, bei denen die Verladedauer aus der Erfahrung stark vom Standard abweicht, kann eine abweichende Angabe Sinn machen.

Quellen und Senken verwalten		Verwalten der Depots	
KnotenID	10002	KnotenID	5
Firma	Wiesen	Bezeichnung	Saar
Straße	Wintersteinstr.	Straße	Tiffiser Platz
Hausnummer	5	Hausnr.	1
Postleitzahl	80933	PLZ	66111
Ort	München	Stadt	Saarbrücken
Land	Germany	Land	Germany
Umschlagdauer	00:00:00	Vor- bzw. Nachlauf	
Umschlagkosten	1,00 €	Kosten pro km:	1,00 € pro qm
Laenge:	11,56083	Kosten pro km:	1,00 € pro kg
Breite:	48,22305	Zeitverbrauch	0:01:00 pro km
	Koordinaten holen	Umschlag	
		Kosten:	4,00 € pro qm
		Zeitverbrauch:	0:01:00 pro qm
		Umrechnungsfaktor für Entfernungen:	1,00
		Längengrad:	6,9975
		Breitengrad:	49,2308
			Koordinaten auslesen

Bild 8.3: Verwalten der Kunden- und der Depotdaten

Die geografischen Längen- und Breitengrade der Orte können manuell in die Formulare eingepflegt werden. Da die geografischen Längen- und Breitengrade für beliebige Versender und Empfänger im Regelfall nicht bekannt sind, stellt die in Abschnitt 8.4.1 dargestellte Schnittstelle eine wesentliche Arbeitserleichterung dar.

## 8.2.2 Verwalten der Transportrelationen

Neben den Aufträgen, die aufgrund der Anzahl einen hohen Aufwand bei der Datenpflege bedeuten, ist vor allem die Pflege der Kanten des Netzwerkes, also die Pflege der Transportrelationen, arbeitsintensiv. Bei der Erstellung von Transportrelationen wird zum einen auf die hinterlegten primären Netzwerkknoten zurückgegriffen. Zum andern müssen aber auch zusätzliche Informationen, wie etwa Zeitfenster, Kapazitäten und Konditionen der Relationen, erfasst werden. Die Datenhaltung der Linienverkehre erfolgt in einer zentralen Tabelle (Tabelle 8.2 und Tabelle 8.3). In der Kanten-tabelle werden während der Berechnung weitere kantenspezifische Informationen gespeichert. Diese sind zum Beispiel die bereits eingeplante Transportmenge in m<sup>2</sup>

und kg sowie die durch die eingeplanten Sendungen verursachten Kosten. Diese Daten sind zum einen wichtig für die Berechnung und spielen zum anderen eine Rolle für die Dokumentation der jeweiligen Relation.

Tabelle 8.2: Ausschnitt der Kantentabelle nach einem Berechnungslauf, Teil 1

ID	Start	Ende	FAB	SAB	FAN	SAN
1	1	3	01.01.2008 12:26:41	01.01.2008 23:44:38	01.01.2008 16:13:08	02.01.2008 03:31:05
2	2	3	01.01.2008 09:56:40	02.01.2008 00:20:06	01.01.2008 13:07:40	02.01.2008 03:31:06
3	3	4	02.01.2008 04:50:20	02.01.2008 06:04:35	02.01.2008 10:11:20	02.01.2008 11:25:35
4	4	5	01.01.2008 21:43:33	02.01.2008 05:39:24	02.01.2008 01:19:33	02.01.2008 09:15:24
5	4	6	01.01.2008	02.01.2008 16:08:00	01.01.2008 07:51:00	02.01.2008 23:59:00

Tabelle 8.3: Ausschnitt der Kantentabelle nach einem Berechnungslauf, Teil 2

ID	Dauer	Kapazität in m <sup>2</sup>	Auslas- tung in m <sup>2</sup>	Kapazität in kg	Auslas- tung in kg	Kosten in €
1	03:46:27	30	7,54	26.000	3.380	631,29
2	03:11:00	30	29,99	26.000	13.432	791,37
3	05:21:00	30	29,68	26.000	14.299	1308,72
4	03:36:00	30	17,71	26.000	8.232	781,59
5	07:51:00	30	0	26.000	0	0

Die Datenpflege erfolgt über ein Formular, in dem die Kante aus Start- und Endknoten zusammengesetzt wird (Bild 8.4). Die Ermittlung der Fahrzeit und der Entfernung zwischen dem Startknoten und dem Zielknoten kann über die in Abschnitt 8.4.1 dargestellte Schnittstelle erfolgen. Eine manuelle Eintragung bzw. Korrektur der Werte ist aber jederzeit möglich. Unter Frachtsatz ist ein bei voller Fahrzeugauslastung zu veranschlagender Frachtsatz einzutragen. Dieser Frachtsatz kann für jede einzelne Relation individuell festgelegt werden oder wird aus der eingetragenen Entfernung und einem hinterlegten Tarifwerk automatisch ermittelt.

### Verwalten der Transportrelationen

KantenID:  Startknoten:  Endknoten:

Bezeichnung:  Straße:  Stadt:  PLZ:  Land:

FAB:  FAN:   Terminiert

SAB:  SAN:

Kapazität:  qm  Kg Erlaubte Auslastung:

Fahrzeit:   Entfernung:

Frachtsatz:   Konditionsstruktur:

	KantenID	Untergrenze	Obergrenze	variabel	Fix
▶	40	0,0%	20,0%	10,09 €	144,09 €
	40	20,0%	40,0%	7,93 €	345,82 €
	40	40,0%	60,0%	5,51 €	504,32 €
	40	60,0%	80,0%	3,49 €	614,55 €
	40	80,0%	100,0%	1,80 €	684,44 €
*	0	0,0%	0,0%	0,00 €	0,00 €

Datensatz:        von 5

Externer Frachtsatz:  pro 100 kg

Achtung: Der hier hinterlegte Frachtsatz übersteuert eine ggf. angelegte Konditionstabelle und die eingetragenen Kapazitätsbeschränkungen.

Bild 8.4: Verwalten der Transportrelationen

Da im vorliegenden Modell nicht von einem einfachen linearen Zusammenhang zwischen Transportmenge und Frachtsatz ausgegangen wird, können Klassen in beliebiger Anzahl und Größe mit variablen und fixen Kosten hinterlegt werden (Bild 8.4). Dabei stellen die fixen Kosten den jeweils bei der Klassenuntergrenze zu veranschlagenden Frachtsatz dar. Die variablen Kosten gelten pro Prozentpunkt Kapazitätsnutzung in der Klasse. Die Berechnung einer solchen Konditionstabelle kann in soweit automatisiert erfolgen, als dass aus hinterlegten Standardstrukturen und dem oben ermittelten Frachtsatz eine solche Tabelle automatisch erzeugt werden kann.

### 8.2.3 Verwalten der Sendungen

Die Auftragsdaten repräsentieren die Daten mit der größten Anzahl an Datensätzen. Jede einzelne Sendung muss für die automatische Verarbeitung per EDV erfasst werden. Für den operativen Einsatz zur Disposition können die Auftragsdaten zum einen von den Disponenten manuell erfasst werden (Bild 8.5), zum anderen können Sendungsinformationen auch direkt per EDV-Schnittstelle aus den Versandsystemen der Versender oder aus einer Speditionsoftware übernommen werden.

Für Versender, für die sich eine EDV-Anbindung nicht lohnt, kann darüber hinaus eine Erfassung über Web-Formulare durchgeführt werden. Um den Arbeitsaufwand in der Datenpflege zu minimieren, wird auf die in Abschnitt 8.2.1 dargestellten Kundendaten zurückgegriffen. Insbesondere die Versender tauchen in einem derartigen System immer wieder auf. Aber auch bei vielen Empfängern handelt es sich um regelmäßige Kunden.

Die in Bild 8.5 dargestellten Sendungsinformationen sind die für jede Sendung individuellen Informationen, die neben Versender und Empfänger lediglich das Sendungsvolumen und die vom Versender vorgegebenen Zeitrestriktionen umfassen. Auf die Angabe von konkreten Zeitfenstern, also zusätzlich die „späteste Abholung“ sowie die „früheste Anlieferung“, wurde für das hier entwickelte Modell bewusst verzichtet. Bei diesen beiden Angaben handelt es sich um Restriktionen, die durch eine Pufferung an den End-of-line-Depots problemlos eingehalten werden können. Im Rahmen einer nachfolgenden Tourenplanung müssen diese Restriktionen berücksichtigt werden. Alle Angaben, die über den dargestellten Umfang hinausgehen, für die Auftragsbearbeitung aber benötigt werden, werden aus den Kundenstammdaten generiert.



### Verwalten der Sendungen

Auftrags-ID:

Kundenauswahl

Startknoten: <input type="text" value="10104"/> <input type="text" value="PSLT"/> <input type="button" value="Übernehmen"/>	Zielknoten: <input type="text" value="10105"/> <input type="text" value="IWI"/> <input type="button" value="Übernehmen"/>
Früheste Abholung: <input type="text" value="01.01.2008 06:00:00"/>	Späteste Zustellung: <input type="text" value="02.01.2008 20:00:00"/>

Sendungsgröße

Quadratmeter:  qm

Gewicht:  kg

Ladeeinheiten:  St.

Bild 8.5: Verwalten der Sendungen

### 8.3 Ergebnisdarstellung

Im entwickelten Modell liegen alle Eingangs- und Ergebnisdaten grundsätzlich in Tabellenform vor. Während als Arbeitserleichterung für die Erfassung der Eingangsdaten die in Abschnitt 8.2 dargestellten Formulare angelegt wurden, die eine übersichtliche Bearbeitung auf Datensatzebene ermöglichen, kann die Ergebnisdarstellung grundsätzlich über Listen, Kennzahlen bzw. eine Visualisierung erfolgen (Bild 8.6).

Die durch das Modell generierten Ergebnisse sind

- o Sendungsliste mit allen genutzten Kanten,
- o Liste der Transportrelationen mit Fahrplan und Auslastungsgrad,
- o konkreter Loadplan der Transportrelationen und
- o Listung der Sendungen an den End-of-Line-Depots.

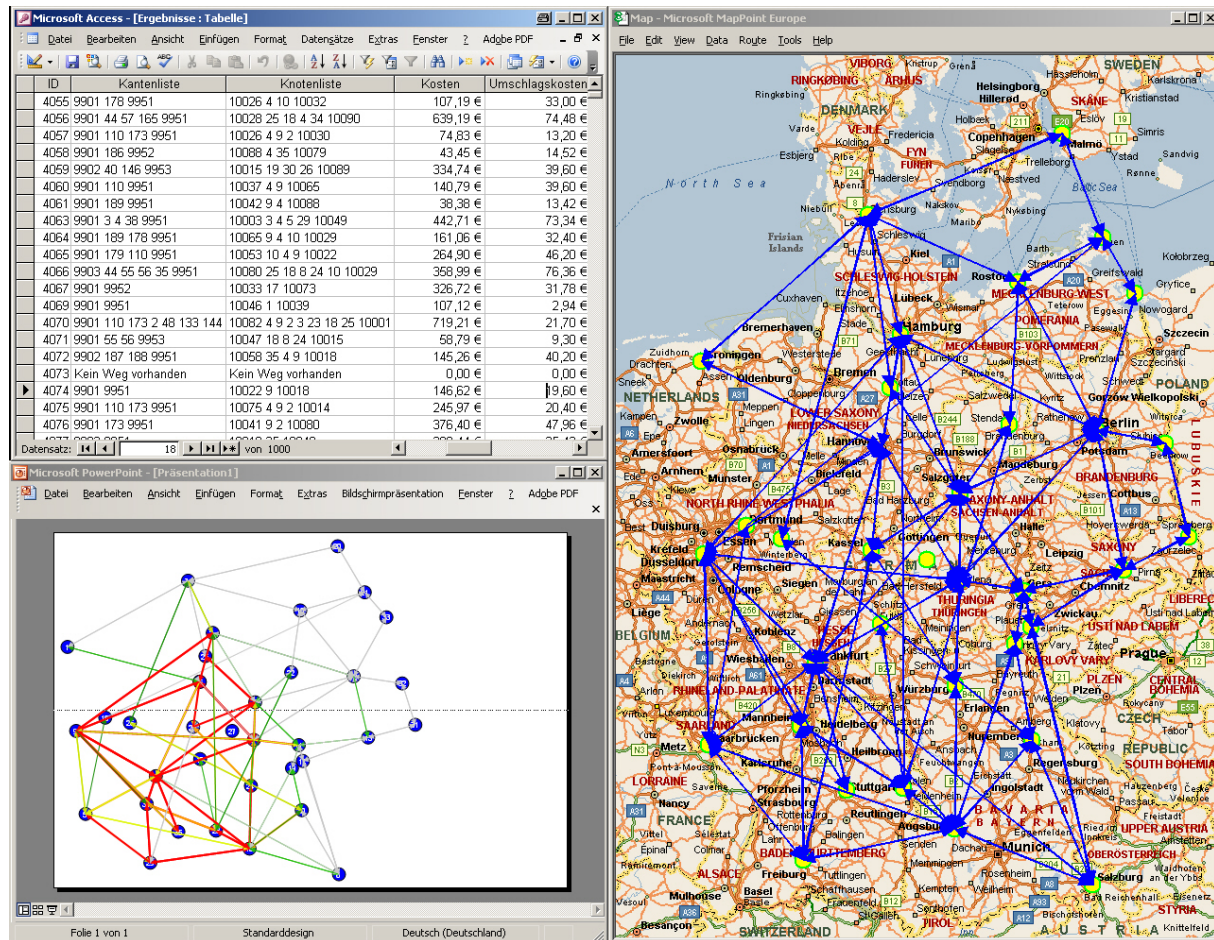


Bild 8.6: Alternativen der Ergebnisausgabe

### 8.3.1 Ergebnistabellen

Je nach Verwendung werden die Ergebnisse in unterschiedlicher Form benötigt. Nach dem Planungsdurchlauf ist festgelegt, über welche Transportrelationen und damit auch über welche Depots die Sendungen transportiert werden sollen. Damit sind auch das Sammel- und das Verteildepot jeder Sendung festgelegt. Für eine anschließende Tourenplanung ist es notwendig, einem Tourenplanungssystem die dort benötigten Informationen in Tabellenform zur Verfügung zu stellen.

Für die Tourenplanung müssen die Sendungsnummer, der Versender bzw. Empfänger, die früheste Abfahrt bzw. die späteste Ankunft, der Zeitpunkt der Verladung bzw. der Entladung am Depot und die Kapazitätsbedarfe bereitgestellt werden. Das nachfolgende Beispiel bezieht sich auf einen Auszug der Sammeltouren eines Depots (Tabelle 8.4). Die aufbereiteten Daten für die Verteiltouren haben die gleiche Struktur. Die auf Basis dieser Listen durchzuführende Tourenplanung kann je Sammel- bzw. Verteildepot auf separaten Rechnern erfolgen, da die hier durchzuführenden

Optimierungen keine Abhängigkeiten zu anderen Depots mehr aufweisen. Die in den Listen hinterlegten Restriktionen sind durch die einzelnen Tourenpläne jedoch zwingend einzuhalten.

Tabelle 8.4: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse für die Tourenplanung

Sendung	Startknoten	Früheste Abfahrt	Verladung am Depot	Fläche in m <sup>2</sup>	Gewicht in kg
5769	10074	01.01.2008 06:00:00	01.01.2008 07:51:00	2,17	1.049
5828	10003	01.01.2008 06:00:00	01.01.2008 08:05:00	2,25	1.095
5839	10003	01.01.2008 06:00:00	02.01.2008 07:45:00	2,28	1.120
5850	10006	01.01.2008 06:00:00	01.01.2008 07:51:00	2,31	1.224

Für die Transportabwicklung ist es weiterhin notwendig zu wissen, wie der Reiseplan einer jeden Sendung ist. Die Reise einer jeden Sendung beginnt beim Versender und wurde in der Tourenplanung einem bestimmten Sammelfahrzeug zugewiesen. Am Ende der Sammeltour wird das Fahrzeug am zuständigen Depot entladen.

Tabelle 8.5: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse für das Depothandling

Sendung	Ankommende Kante	Abgehende Kante	Anzahl LE
5945	103	9951	2
5885	103	102	2
5271	108	9951	1
5815	108	3	3

Um eine fehlerfreie Zuordnung der einzelnen Sendungen zur nachfolgenden Transportrelation zu erreichen, kann der globalen Sendungsliste entnommen werden, welche Transportrelation am jeweiligen Depot als nächstes genutzt werden soll. Diese globale Liste kann darüber hinaus auch depotspezifisch aufgegliedert werden (Tabelle 8.5). Damit werden für jedes Depot nur noch die Sendungen ausgewiesen, die über dieses Depot abgewickelt werden sowie die zugehörigen Eingangs- und Ausgangstouren. Ankommende bzw. abgehende Kanten mit einer ID größer 9.900 bedeuten dabei Sammel- bzw. Verteilverkehr. Das konkrete Tor bzw. die konkrete

Tour muss über die Sendungsnummer aus den Informationen der Tourenplanung gezogen werden.

Als Kontrolle über die verladenen Sendungen bzw. als Grundlage für die Erstellung von Begleitpapieren für die Transportrelationen wird weiterhin die jeweilige Ladeliste, also die Liste aller Sendungen der Relation, ausgewiesen (Tabelle 8.6). Diese Liste kann während der Beladung der Ausgangstouren gegen die per Scanner erstellte Liste der bereits verladenen Sendungen abgeglichen werden. Darüber hinaus kann auf der Basis dieses Loadplans auch entschieden werden, wo Kapazitäten für weitere Sendungen vorhanden sind.

Tabelle 8.6: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse als Ladeliste

Kan- ten-ID	Transport- menge in m <sup>2</sup>	Transport- menge in kg	Sendungen
9	29,97	14.480	5086,5111,5148,5168,5206,5209, 5270,5290,5333,5372,5392,5394, 5415,5486,5519,5635,5639,5649, 5683,5689,5716,5796,5850,5883,5888
10	28,34	13.398	5580,5587,5732,5737,5766,5770, 5807,5844,5875,5900,5908,5931,5952

Für alle Transportrelationen, die nicht mit festen Abfahrten hinterlegt worden sind, muss darüber hinaus der Fahrplan ausgegeben werden (Tabelle 8.2, Tabelle 8.3). Dieser Fahrplan ist in den Grenzen der angegebenen „FAB“, „SAB“, „FAN“ und „SAN“ verbindlich. Er kann allerdings in diesen Grenzen noch große Spielräume aufweisen. Wahlweise können die Zeitfenster auf die „FAB“ oder „FAN“ festgelegt werden.

### 8.3.2 Visualisierung

Die für die Planung und Ablaufsteuerung notwendige Aufbereitung der Ergebnisse in Listenform kann für den Disponenten oder Planer durch eine grafische Aufbereitung der Ergebnisse sinnvoll ergänzt werden. Vor allem die Visualisierung des Netzwerkes erscheint im Rahmen der Netzwerkgestaltung und der laufenden Disposition sinnvoll, da die Übersichtlichkeit erheblich gesteigert wird.

Das Transportnetzwerk besteht aus Knoten und Kanten. Die Aufträge bestehen aus Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, die über Pfade im Netzwerk abgewickelt werden können. Aus einer VBA-Programmierung, wie sie im vorliegenden Modell genutzt wurde, kann ein Graph auf unterschiedliche Weise dargestellt werden. Neben der Möglichkeit der Darstellung in einem Formular, kann auch in externen Anwendungen wie bspw. CAD gezeichnet werden.

Die Darstellung eines Graphen aus der vorliegenden Access-Datenbank heraus kann auch in PowerPoint von Microsoft erfolgen (Bild 8.7). Die Nutzung von PowerPoint zur Visualisierung hat durch die geringe Geschwindigkeit und durch Probleme bei der Skalierung auf die Anwendungsseite wesentliche Nachteile. Dem steht aber der Vorteil entgegen, dass PowerPoint Bestandteil des Microsoft Office Paketes ist und damit auf vielen Systemen zur Verfügung steht. Die Darstellung des Netzwerkes erfolgt mit einzelnen Routinen. Auf diese Weise lassen sich einzelne Layer erzeugen, die sich beliebig kombinieren lassen.

Wie in Bild 8.7 dargestellt, können Depots (Layer A) getrennt von den Versendern und Empfängern (Layer B) dargestellt werden. Mit weiteren Routinen lassen sich alle Transportrelationen des Netzwerkes als uniforme Pfeile (Layer C) oder in Abhängigkeit von der Nutzung eingefärbt und mit Linienstärken gewichtet (Layer D) darstellen. Nach der Auswahl einer bestimmten Sendung kann der entsprechende Weg inklusive Versender und Empfänger eingezeichnet werden (Layer E). Außerdem können die Sendungen angezeigt werden, für die im Ergebnis keine Lösung ausgewiesen werden konnte (Layer F).



### 8.3.3 Ergebniskennzahlen

Ergebniskennzahlen spielen für die Durchführung der Transporte im Gegensatz zu den Ergebnistabellen keine Rolle. Die aus dem Modell ableitbaren Kennzahlen fassen jedoch die Leistung des Transportsystems in Vergleichszahlen zusammen, die zum Vergleich aufeinander folgender Planungsperioden oder für die Bewertung der durch den Planungslauf generierten Lösung genutzt werden können.

- o Gesamtkosten,
- o Geschätzte Vorlaufkosten,
- o Umschlagskosten,
- o Kosten der Transportrelationen,
- o Verkehrsleistung,
- o Durchschnittskosten der Verkehrsleistung,
- o Erfüllungsgrad auf Basis der Verkehrsleistung und
- o Erfüllungsgrad auf Basis der Sendungsanzahl.

## 8.4 Einbindung von MapPoint

Das Geoinformationssystem MapPoint von Microsoft bietet für die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise zwei wesentliche Unterstützungsmöglichkeiten. Da im Rahmen der Berechnungen immer wieder auf die Geokoordinaten bzw. Entfernungen und Fahrzeiten zurückgegriffen wird, bedarf es einer Möglichkeit, diese Daten aus den Kundenadressen automatisch zu erzeugen. Die zweite Möglichkeit von MapPoint liegt in einer simplen Visualisierung der Knoten und Kanten des hinterlegten Transportnetzwerkes in einer Straßenkarte.

### 8.4.1 Datenpflege

Die in Bild 8.3 dargestellten Formulare zum Verwalten der Kunden sowie zum Verwalten der Depots zeigen Schaltflächen, die es über eine Schnittstelle erlauben, die aus Land, Postleitzahl, Ort und Straße bestehende Adresse an MapPoint zu übergeben. Nachfolgend bestimmt MapPoint aus diesen Informationen die Geokoordinaten der betreffenden Adresse, stellt den Ort in der Karte grafisch dar und gibt die Geokoordinaten an die Access-Datenbank zurück. Für den Import einer externen Kundendatenbank kann diese Aufgabe auch im Stapel gelöst werden.

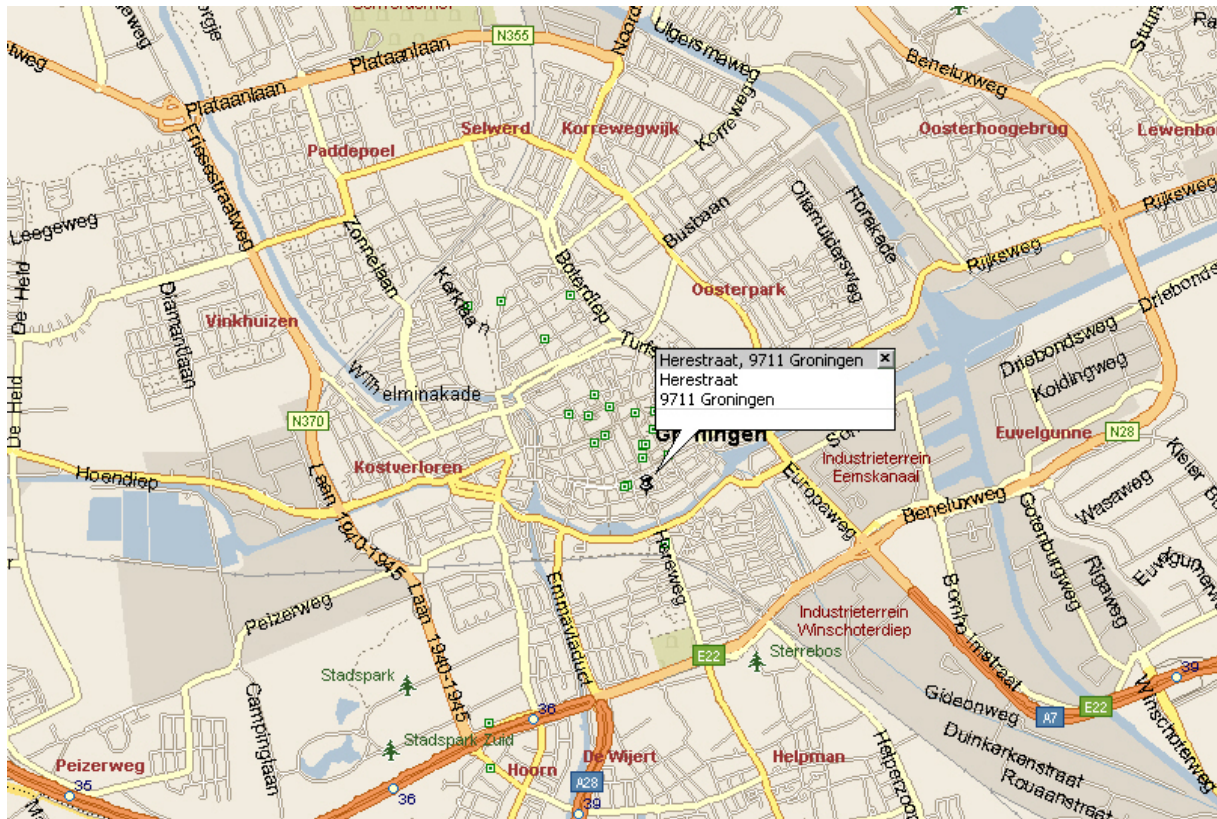


Bild 8.8: Automatisierte Bestimmung der Geokoordinaten

Für die Arbeit mit den Transportrelationen im Netzwerk, sollen konkrete Straßenentfernungen und Fahrzeiten an den Kanten hinterlegt werden. Auch diese Informationen können über dieselbe Schnittstelle schnell und einfach in die Datenbank importiert werden (Bild 8.4). Für die Anfrage werden nun die Adressen von Start- und Zieldepot in der bereits beschriebenen Form übergeben. MapPoint berechnet auf Basis dieser Grundlage eine Route und meldet die Informationen zur Entfernung und zur Fahrzeit an die Datenbank zurück. Ein Geschwindigkeitsprofil für die genutzten Straßen wird aus der Datenbank an MapPoint nicht übergeben. Stattdessen werden die in MapPoint veränderbaren Einstellungen genutzt.

Je nach gewählter Einstellung werden die Werte in die Datenbank geschrieben. Der nicht selektierte Wert wird dabei nicht eingetragen. Von den in Bild 8.9 unter „SUMMARY“ durch MapPoint angezeigten Informationen werden lediglich die Werte „Driving distance“ und „Driving time“ in die Datenbank importiert. Für die hier ausgewiesenen Kosten besteht im Weiteren keine Verwendung, da, wie in Abschnitt 8.2.2 wurde, auf ein internes differenziertes Tabellenwerk zurückgegriffen wird.



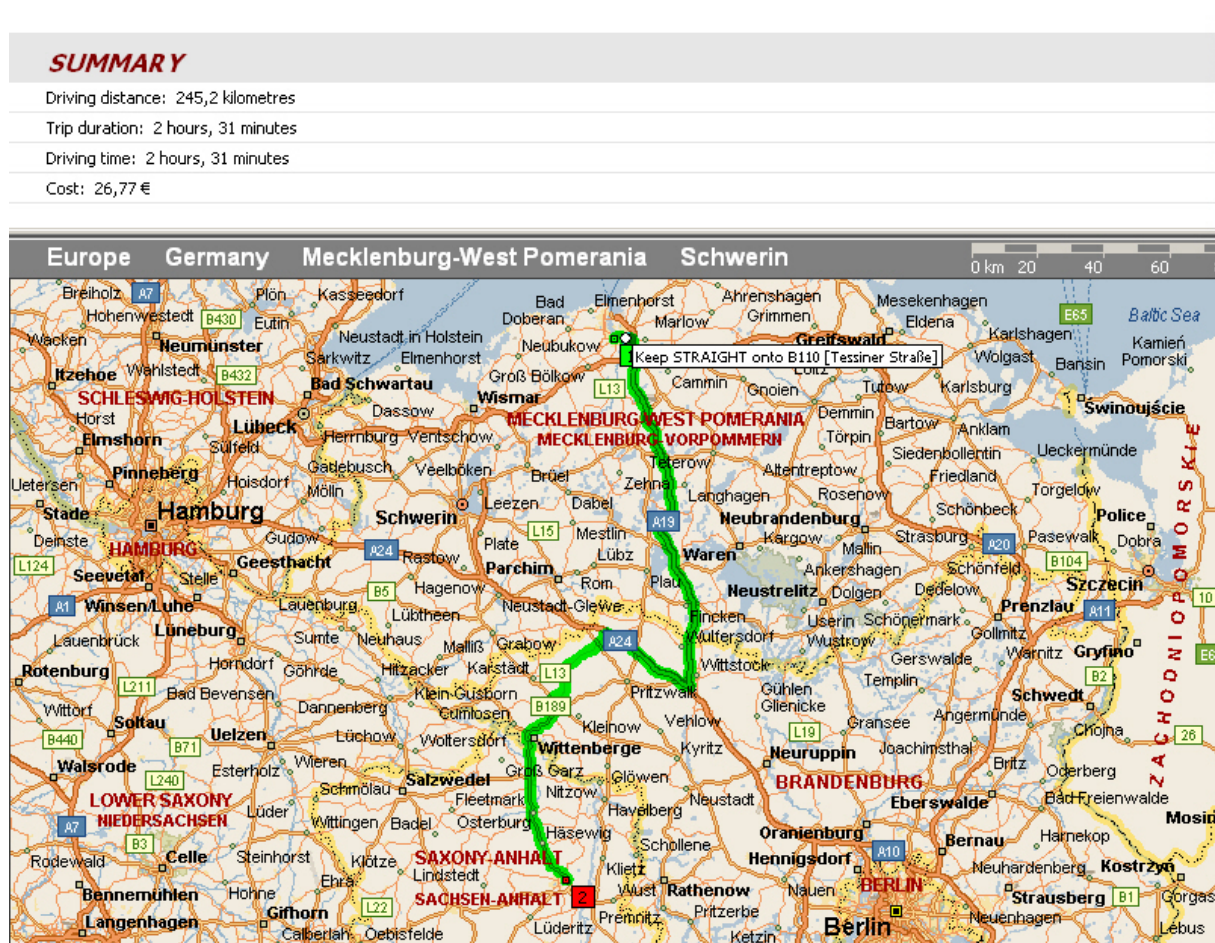


Bild 8.9: Routenplanung in MapPoint

## 8.4.2 Visualisierung

Mit Hilfe der Schnittstelle zu MapPoint können die in Abschnitt 8.3.2 dargestellten Visualisierungen auch im Kartenwerk von MapPoint dargestellt werden (Bild 8.10). Der Vorteil einer solchen Darstellung liegt in der geringeren Abstraktion des Netzwerkes. Der Betrachter kann unmittelbar erfassen, wo die Kunden und Depots exakt liegen, welche Depots über Transportrelationen verbunden sind und zwischen welchen Depots ggf. Transportrelationen fehlen.



Bild 8.10: Netzwerkvisualisierung im MapPoint Kartenwerk

## 8.5 Software-Validierung

In den folgenden Abschnitten wird zum einen die Validierung der umgesetzten Softwarelösung vorgenommen. Zum anderen werden Aussagen über das Laufzeitverhalten bei variierenden Eingangsdaten getroffen. Die Validierung umfasst dabei den Nachweis, dass die implementierte Lösung den in Abschnitt 7.1 definierten Anforderungen genügt. Dafür werden verschiedene Plausibilitätstests durchgeführt. Auf eine Verifikation des Programmcodes, also den formalen Nachweis der Korrektheit des Computerprogramms, wird aufgrund des Umfangs verzichtet.

### 8.5.1 Plausibilitätsprüfung

Zur Plausibilitätsprüfung der durch das Modell ermittelten Berechnungsergebnisse wurden ein fiktives Transportnetzwerk sowie ein fiktiver Auftragspool entwickelt. Mit diesen Modelleingangsdaten wurde eine Reihe von Berechnungsläufen durchgeführt.

Die dabei ermittelten Ergebnisse wurden dahingehend kontrolliert, ob zum einen alle berechneten Werte innerhalb der definierten Restriktionen liegen und ob zum anderen Widersprüche innerhalb des Ergebnisses auftreten. Um Widersprüche aufzudecken, wurde beispielsweise die Übereinstimmung theoretisch korrespondierender Teilergebnisse untersucht.

Das für die Plausibilitätsprüfung erstellte Transportnetzwerk ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- o 35 Depots bzw. Hubs
- o 150 Linienverbindungen
- o Zwei Werktage Planungshorizont
- o Die Zeitfenster der Linienverkehre werden in der Initialisierung auf ein FAB von 00:00 Uhr an Tag 1 und ein SAN von 23:59 an Tag 2 gesetzt
- o Individuelle Kapazitätsvorgaben für die Linienverkehre mit einem Maximum von 26 t und 30 qm
- o Hinterlegte Fahrzeiten für die Linienverkehre
- o Abgeleitete Frachtraten für die Kanten aus einer Entfernung zwischen den Depots, der maximalen Kapazität des jeweiligen Linienverkehrs und einem GFT-basierenden Tarifwerk

Der für die Plausibilitätsprüfung hinterlegte Auftragspool ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- o 1.000 Aufträge
- o 91 Versender bzw. Empfängerstandorte
- o Zufällige Versender-/Empfängerbeziehungen
- o Sendungsgrößen von 0,01 qm bis 3 qm
- o Sendungsgrößen von 4 kg bis 1.603 kg
- o Sendungsgröße von 1 bis 3 LE
- o Positiv korreliertes Gewichts-/Flächenverhältnis
- o 06:00 Uhr an Tag 1 ist die frühest mögliche Abfahrt beim Versender
- o 20:00 Uhr an Tag 2 ist die späteste Ankunft beim Empfänger

Tabelle 8.7: Ausschnitt des zu Grunde gelegten Auftragspools

Auftrags-ID	Start-knoten	Ziel-knoten	Startzeit	Zielzeit	Quadrat-meter	Ge-wicht	LE
5362	10070	10072	01.01.2008 06:00	02.01.2008 20:00	0,88	337,00	1
5363	10057	10007	01.01.2008 06:00	02.01.2008 20:00	0,88	334,00	2
5364	10053	10057	01.01.2008 06:00	02.01.2008 20:00	0,88	344,00	2
5365	10018	10045	01.01.2008 06:00	02.01.2008 20:00	0,88	431,00	2

Für die Plausibilitätsprüfung wurde die Ergebnisausgabe in Listenform genutzt. Zur Kontrolle der Ergebnisse kann die Höhe der Gesamtkosten herangezogen werden (Tabelle 8.8). Da während des Programmablaufes in der Kantentabelle (Tabelle 8.3) die für die einzelnen Kanten aufgelaufenen Kosten erfasst werden, kann die Summe über die Gesamtkosten mit den Transportkosten der Kanten verglichen werden.

Tabelle 8.8: Ausschnitt einer beispielhaften Ergebnisliste

ID	Kantenliste	Knotenliste	Gesamt-kosten	Nahverkehrs-kosten	Umschlags-kosten
5362	9901 13 179 24 9952	10070 6 10 4 8 10072	729,68 €	364,91 €	38,00 €
5363	9901 189 186 9952	10057 9 4 35 10007	173,99 €	57,51 €	60,00 €
5364	9901 179 188 9951	10053 10 4 9 10057	232,35 €	118,75 €	60,00 €
5365	9901 189 186 9952	10018 9 4 35 10045	151,72 €	35,26 €	60,00 €

Es ist zu berücksichtigen, dass die Gesamtkosten über die reinen Frachten der Linienverkehre hinaus auch Kosten der Vor- und Nachläufe, also des Nahverkehrs, sowie Kosten des Umschlags an den Depots bzw. beim Versender und Empfänger beinhalten (Tabelle 8.8). Die Gesamtkosten sind für den beschriebenen Vergleich folglich um diese Positionen zu korrigieren.

Ein weiterer Plausibilitätstest bestehen darin, zu überprüfen, ob die in der Ergebnisliste ausgewiesenen spätesten Ankünfte der Sendungen am Sammeldepot und die früheste Abfahrt der Sendungen am Verteildepot mit den im Auftrag hinterlegten Zeitrestriktionen vereinbar sind. Dabei muss die abgeschätzte Mindestdauer für die Vor- bzw. Nachläufe berücksichtigt werden.

Darüber hinaus kann die Kantentabelle auf Fehler überprüft werden. Zum einen dürfen sowohl bezogen auf das Gewicht als auch auf die Fläche nicht mehr Transportmengen an den Kanten verplant werden, als durch die Kapazitäten zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus muss für die ausgewiesenen Zeitfenster überprüft werden, dass die späteste Abfahrt nicht vor den frühesten Abfahrten der Kanten liegen und die Differenz aus frühester Ankunft und frühester Abfahrt der hinterlegten Kantendauer entspricht.

Für die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse wurden zum einen Berechnungsläufe mit den Auftragsortierungen nach Gewicht sowie Fläche der Sendungen in aufsteigender und absteigender Reihenfolge durchgeführt. Des Weiteren wurde für die Sortierung das Verhältnis aus der Gesamtzeit, die für den Auftrag zur Verfügung steht, und der Transportentfernung zwischen Versender und Empfänger gebildet. Die für jeden Auftrag zur Verfügung stehende Gesamttransportzeit von 38 h wurde dabei durch die aus den Koordinaten berechenbare Luftlinie geteilt. Die Sortierung des Auftragspools anhand dieses Quotienten wurde ebenfalls aufsteigend und absteigend vorgenommen. Die beschriebenen Sortierungen werden in Tabelle 8.9 durch drei beispielhafte Auftragsortierungen ergänzt, die mit Hilfe eines Zufallsgenerators erzeugt wurden.

Sowohl anhand der Gesamtkosten, als auch der aufgeführten Kennzahlen „Anteil erfüllter Aufträge“, „Verkehrsleistung“ und „Kosten der Verkehrsleistung“ wird deutlich, dass die Auftragsortierungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Damit verbunden weicht auch die Reihenfolge, in der Linienverkehre in die Planungen mit einbezogen wurden, stark voneinander ab. Alle Lösungen erfüllen allerdings gleichermaßen die aufgeführten Tests zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse und damit des implementierten Modells.

Tabelle 8.9: Auftragsortierungen für die Plausibilitätsprüfung

Sortierung	Kosten		Anteil erfüllter Aufträge	Verkehrs- leistung in t*m <sup>2</sup> *km	Kosten der Ver- kehrs- leistung	
	Gesamt Nahverkehr Umschlag	laut Kantenliste				
Gewicht, aufsteigend	312.875,17 € 193.648,94 € 41.038,00 €	78.188,19 €	82,5 %	300.881	1,04 €	
Gewicht, absteigend	305.279,18 € 183.080,94 € 39.743,00 €	82.455,24 €	73,3 %	327.316	0,93 €	
Fläche, aufsteigend	305.228,12 € 189.162,46 € 40.121,00 €	75.944,64 €	81,9 %	286.822	1,06 €	
Fläche, absteigend	304.749,44 € 183.173,20 € 39.233,00 €	82.343,21 €	73,2 %	326.353	0,93 €	
Zeit pro km, aufsteigend	304.118,55 € 191.010,57 € 37.598,00 €	75.509,98 €	74,4 %	299.537	1,02 €	
Zeit pro km, absteigend	323.028,89 € 194.589,97 € 43866,00 €	84.572,95 €	87,7 %	321.620	1,00 €	
Zufällige Reihenfolge	1	312.304,12 € 192.002,79 € 40.461,00 €	79.840,34 €	77,8 %	303.144	1,03 €
	2	304.250,69 € 187.672,50 € 40.146,00 €	76.432,24 €	79,1 %	307.324	0,99 €
	3	307.387,77 € 187.579,83 € 40.140,00 €	79.667,94 €	78,1 %	310.250	0,99 €

Bei der Position „Kosten laut Kantenliste“ handelt es sich um die Kosten, die aufgrund der Inanspruchnahme der Transportkapazitäten im Linienverkehr angefallen

sind. Da diese Kosten der Differenz von Gesamtkosten abzüglich der Kosten für Nahverkehr und Umschlag entsprechen müssen, ist mit diesem Wert eine Kontrolle der Berechnung möglich. Die Abweichung beträgt bei den gelisteten Versuchen maximal 0,04 €, was in Rundungsfehlern begründet ist.

Die ausgewiesene Verkehrsleistung, die anders als üblich nicht in tkm sondern als Produkt aus Gewicht in t, Flächenbedarf in m<sup>2</sup> und Transportentfernung in km ausgewiesen wird, unterstützt eine naheliegende Vermutung. Während der Anteil erfüllter Aufträge sowohl bei der Sortierung „Gewicht, absteigend“ als auch „Fläche, absteigend“ niedrige Werte aufweist, führt die ausgewiesene Verkehrsleistung im Verhältnis zur einer möglichen Gesamtleistung von ca. 378.737 t\*m<sup>2</sup>\*km zu einem Wert von 86,4 % bzw. 86,2 %. Das bedeutet, dass durch diese Sortierung tendenziell für weniger Aufträge eine Lösung gefunden wird, dass dafür aber ein großer Anteil der beauftragten Verkehrsleistung bearbeitet wird.

Eine ähnlich hohe Verkehrsleistung wird nur noch durch die Sortierung nach den zur Verfügung stehenden Zeiteinheiten pro km in absteigender Reihenfolge erreicht. Bei dieser Sortierung werden zunächst die Aufträge verplant, für die gemessen an der Gesamtentfernung viel Zeit zur Verfügung steht. Werden zuerst derartige Aufträge durch ein Netzwerk geroutet, für das noch kein Fahrplan besteht, führt das zu einer geringen Einschränkung der Zeitfenster, womit die Wahrscheinlichkeit groß bleibt, dass nachfolgende Aufträge die Kanten nutzen können. Für ein Transportnetzwerk mit Fahrplänen wird der Einfluss dieses Sortierkriteriums allerdings tendenziell abnehmen.

### **8.5.2 Laufzeit**

Seriöse Aussagen zum Laufzeitverhalten des vorgestellten Modells für praxisrelevante Probleminstanzen sind nach einem entsprechenden Praxistest möglich. Der Grund dafür liegt darin, dass in Abhängigkeit der Netzgröße sowie der Zeitrestriktionen unterschiedlich viele Wege zur Verfügung stehen und damit im kürzesten Wege Algorithmus untersucht werden müssen. Bei sehr dichten Netzen und einem Auftragspool mit wenig restriktiven Zeitfenstern muss von längeren Berechnungszeiten ausgegangen werden. Durch eine geeignete Parameterwahl kann diese Berechnungszeit allerdings zu Lasten der Lösungsqualität wieder deutlich reduziert werden.

Um einen Eindruck des Einflusses der gewählten Parameter zu erhalten, kann für die in Abschnitt 8.5.1 dargestellte Probleminstanz mit 1.000 Aufträgen auf einem Rechner mit einer Intel Core2Duo CPU mit 3,17 GHz folgendes festgehalten werden:

Wird der Algorithmus auf ein Netzwerk angewendet, für das keine konkreten Abfahrts- und Ankunftszeiten festgelegt wurden, und in dem alle erzeugten Label im kürzesten Wege-Algorithmus überprüft werden sollen, beträgt die Laufzeit 385 s. Wird im kürzesten Wege Algorithmus die Eliminierung dominierter Label alle 10 Iterationen aktiviert, erhält man, ohne dass es zu einer Verschlechterung des Ergebnisses kommen kann, eine Reduzierung der Laufzeit auf 69 s. Der Grund liegt in einer Reduzierung der erzeugten Label von 90.645 auf 14.872. Wird darüber hinaus die geografische Einschränkung mit einer numerischen Exzentrizität der zu Grunde liegenden Ellipsen von 0,6 aktiviert, beträgt die Laufzeit 46 s bei 8.729 erzeugten Labeln.

Wird dasselbe Netzwerk mit festgelegten Abfahrts- und Ankunftszeiten der Kanten genutzt, beträgt die Laufzeit 35 s mit 6.951 erzeugten Labeln. Für eine weitere Verkürzung der Laufzeit kann in einem terminierten Netz auf die Eliminierung dominierter Label verzichtet werden, da diese hier in einem wesentlich geringeren Maße auftreten und der damit verbundene Rechenaufwand größer als die Zeiteinsparung im kürzeste Wege Algorithmus ist. Wird darüber hinaus die Kantenbewertung mittels einer approximierten Kostenfunktionen durchgeführt, wird eine Laufzeit von 23 s bei 10.484 generierten Labeln realisiert.



## 9 Praktische Anwendbarkeit und weiterer Forschungsbedarf

Grundsätzlich gilt für die praktische Anwendbarkeit, dass die wesentlichen notwendigen Rahmenbedingungen, also die Informationsverfügbarkeit und Informationssicherheit, gegeben sein müssen.

### 9.1 Informationsverfügbarkeit

Hauptmotivation für den Ansatz bildet der Wettbewerbsdruck im Lkw-Sammelgutverkehr. Ziel des Ansatzes ist das Aufzeigen von Optimierungspotentialen durch eine sorgfältige Transportplanung. Allerdings fällt die Anwendung je nach Netzform unterschiedlich aus. Während es im Falle eines großen Konzerns möglich wäre, eine zentrale Datenbasis zu erstellen, in der alle relevanten Informationen zum Zeitpunkt eines Planungslaufes vorhanden sind, handelt es sich bei Stückgutkooperationen um selbstständige Gebietsspediteure, die für den Einsatz des dargestellten Ansatzes sowohl Tarifstrukturen und Kapazitäten als auch die Kundenaufträge komplett offenlegen müssen.

Die Transportaufträge lassen sich auf die beschränkten Transportkapazitäten sowohl der eigenen Fahrzeuge, als auch denen der Kooperationsteilnehmer aufteilen. Ein zentraler Ressourcenpool, in dem alle Kapazitäten der Teilnehmer erfasst und aufgeteilt werden, scheint ein geeignetes Mittel, das in Extremform einer Quasi-Fusion gleichkäme. Diesem Ideal widerspricht allerdings das Informationsschutzinteresse der Beteiligten. Zu diesen schützenswerten Informationen zählen die Auslastung der Fahrzeuge, sowie die Kosten und Erlössituation. Weiter verhindert die individuelle Rationalität einen unbegrenzten Austausch der Aufträge, da das globale Optimum der Kooperation durch die zentrale Instanz nicht gleich dem individuellen Optimum sein muss. Schließlich besteht noch ein Kundenschutzinteresse und Speditionen werden nur begrenzt gewillt sein, ihre Kundenbeziehungen zu teilen.

Eine Lösungsmöglichkeit kann in diesem Fall in der Verwendung eines dezentralen Multi-Agenten Systems, kurz MAS, in dem mehrere autonome Agenten in Form eines Softwaresystems mit anderen Agenten kommunizieren und zielgerichtet und eigenständig handeln, gesehen werden /WOO-1995/. In einer Stückgutkooperation kann der dargestellte Ansatz zum Einsatz kommen, um beispielsweise Überhänge

zentral abzuarbeiten oder auf Anfragen, die am Rande des Einzugsgebietes eines Gebietsspediteurs liegen, zu reagieren. In Summe handelt es sich dabei um die Fälle, in denen der jeweils zuständige Spediteur nicht zwingend von einer wirtschaftlichen Abwicklung durch eigene Kapazitäten ausgehen muss.

Unabhängig von einer aktiven Entscheidung über die zentrale Haltung aller Daten eines Transportnetzwerkes ist zu klären, ob für den Einsatz des vorgestellten Modells die definierten Daten vollständig und rechtzeitig verfügbar sind. Das bedeutet, dass jede Sendung, bevor ein Abholauftrag zum Versender ausgelöst wird, mit allen für die Planung relevanten Daten avisiert sein muss. Auch dieser Punkt stellt in der derzeitigen betrieblichen Praxis ein deutliches Hindernis dar.

## **9.2 Informationssicherheit**

Informationssicherheit bedeutet sowohl für Kundenaufträge als auch für Transportangebote, dass die Modelleingangsdaten verlässlich sein müssen. Damit dürfen keine unverbindlichen Kundenanfragen in das System eingelastet werden, sondern nur tatsächlich beauftragte Sendungen. Das Gleiche gilt für Transportangebote. Wird beispielsweise eine Restkapazität aus einer Frachtenbörse im Optimierungslauf berücksichtigt, muss diese für den Fall, dass Sendungen auf ihr verplant wurden, für die Durchführung auch zur Verfügung stehen. Die Tatsache, dass mehrfache Umschläge durch das Modell ermöglicht werden und damit eine einzelne Relation unter Umständen nur ein Element einer komplexen Transportkette ist, macht diese Forderung notwendig.

## **9.3 Einsatzgebiete und Übertragbarkeit des Modells**

Durch die derzeitige Entwicklung der Wirtschafts- und Verkehrssituation, namentlich die dichter werdende Integration der Wirtschaft, die zunehmenden Distanzen, die wachsende Überlastung der Verkehrsinfrastruktur sowie den zunehmenden Druck zur Energieeinsparung sieht Klaus für Europa erhebliche Chancen für sogenannte Advanced-Truckload-Netzwerke, kurz ATLF. Hierbei handelt es sich um Anbieter, die u. a. mit einer größeren Zahl von Kunden- und Operationsbasen, standardisiertem Equipment, professionellem Fuhrparkmanagement sowie Kommunikations- und Lokalisationstechnologien auf dem amerikanischen Markt für Ladungsverkehre sehr erfolgreich agieren /Klaus-2006b/.

Die Zentralisierung und Computerunterstützung von Kundenkontakten und Disposition ist nach Klaus ein weiterer Erfolgsfaktor der ATLF. Auch der hier entwickelte Ansatz zur Transportplanung beinhaltet die zentrale Auftragserfassung bzw. die Zusammenführung der Aufträge zu einem zentralen Pool und die zentrale Planung des Verkehrsnetzes. Die zunehmende Netzwerkgröße und die damit steigende Anzahl an alternativen Transportketten lässt das Optimierungspotential der Sammel-ladungsnetze überproportional steigen.

Der vorgestellte Ansatz zur ganzheitlichen Disposition ist in komplexen Netzwerken interessant, wo mehrere Wege durch ein Netz möglich sind. In angepasster Form ist der Ansatz auf Containerverkehrsnetze übertragbar. Hier bietet sich eine Vielzahl an Alternativen für einen geeigneten Transportweg. So kann beispielsweise das Routing eines Containers aus Zentraleuropa sowohl über Nordsee- als auch Mittelmeerhäfen erfolgen. Gleichzeitig müssen mehrere Verkehrsträger mit unterschiedlichen Kosten und Reisezeiten berücksichtigt werden.

Die Gesamtheit aller Containerlinien bildet ein globales Verkehrsnetz. Dieses Netz ist durch steigende Schiffsgrößen auf den Hauptstrecken, Überkapazitäten mit Anreizen zur Rationalisierung und Ungleichgewichten der Transportströme gekennzeichnet. Für die Steuerung werden neue Ansätze benötigt. Es wurde bereits aufgezeigt, dass für Systemverkehre eine genormte Ladungsbeschaffenheit eine wesentliche Rolle spielt. Eine weltweit einzigartige Verbreitung findet die Maßeinheit TEU in der internationalen Seeschifffahrt. Durch die Normung lassen sich diese einheitlichen Container nicht nur leicht und schnell umschlagen, sondern auch problemlos multimodal über den kompletten Transportweg befördern.

Die Transportnetze des Containerverkehrs befinden sich bereits im Wandel. Durch Größenrestriktionen einiger wichtiger Wasserstraßen, wie dem Panama- oder Suezkanal, können moderne Containerschiffstypen nicht mehr alle Häfen direkt miteinander verbinden. Daher müssen die Reedereien immer stärker mit Hubs arbeiten und kleinere Containerschiffe, die so genannten Feederschiffe, in Zubringerdiensten einsetzen. Dies wird auch schon dadurch notwendig, dass nicht mehr alle Häfen von den riesigen Schiffen angelaufen werden können.

Als Alternative zu zeitintensiven Seetransporten werden zunehmend auch Bahnli-niendienste auf Langstrecken eingerichtet, die einen Strukturwandel hin zu umspan-

nenden multimodalen Netzen unterstützen. So wurden beispielsweise in den USA als Alternative transkontinentale Eisenbahnverbindungen mit Containerwaggons in Doppelstockbeladung zwischen der Ost- und Westküste eingerichtet /CRA-2006/. Auch Liniendienste zwischen Deutschland und der Türkei /EGG-2005a/ und sogar ein Testzug aus China, der inzwischen regelmäßig angeboten wird, unterstreichen diesen Wandel /EGG-2005b/.

#### **9.4 Nutzung als Entscheidungsunterstützungssystem**

Im Rahmen der Entscheidungsfindung wird zwischen Entscheidungsautomatisierung und Entscheidungsunterstützung unterschieden. Während im ersten Konzept die formulierte Aufgabe an einen externen Löser übergeben wird, und erst das zurück gelieferte Resultat zur Entscheidungsfindung herangezogen wird, kommt im zweiten Konzept ein interaktiver Mensch-Computer-Dialog zum Einsatz. Die wesentlichen Vorteile der Entscheidungsunterstützung liegen darin, das Know-How und die Kreativität des Anwenders mit der Rechenleistung des Computers zu verbinden. Darüber hinaus lassen sich die Ziele und Bedingungen im Verlauf des Planungsprozesses verändern und somit der Umwelt anpassen /FEI-2008/.

In der betrieblichen Praxis spielen die Disponenten eine entscheidende Rolle. Neben dem Fehlen geeigneter Tools zur Optimierung ganzheitlicher Transportketten sind vor allem die Erfahrungen der Disponenten nicht zu unterschätzen. Auch wenn Optimierungsalgorithmen in der Lage sind, einen wesentlich größeren Lösungsraum zu berücksichtigen, verfügen die Disponenten über eine Reihe zusätzlicher weicher Informationen, die in einem Optimierungsalgorithmus kaum abgebildet werden können.

So können Disponenten über gutbezogene Informationen verfügen, so dass sie zwei Güter, die beim gemeinsamen Transport einen Qualitätsverlust erleiden, nicht zusammen transportieren. Die Informationen können aber auch kundenbezogen sein. Durch den persönlichen Kontakt mit Kunden wissen Disponenten beispielsweise, bei welchem Kunden eine Sendung wirklich zeitkritisch ist und wo eine Sendung unter Umständen auch zu einem späteren Zeitpunkt transportiert werden kann. Im Rahmen der Fahrereinsatzplanung können auch persönliche Kontakte zwischen Fahrern bzw. Frachtführern und den Versendern bzw. Empfängern eine Rolle spielen.

Vor dem Hintergrund der Modelllaufzeiten ist es im Rahmen der operativen Planung nicht möglich, bis zur Avisierung der letzten Sendung mit dem Beginn des Optimierungslaufes zu warten. Vielmehr scheint es sinnvoll zu sein, eine bestimmte Planungsperiode, beispielsweise einen Tag, in Zeitscheiben aufzuteilen. Die innerhalb einer Zeitscheibe aufgelaufenen Sendungen, werden nach Ablauf dieser Zeitscheibe als Batch, also im Stapel, optimiert. Dabei können in jedem Batch angepasste Auftragsortierungen verwendet werden. Die Gestaltung der Zeitscheibe kann dabei an die betrieblichen Belange angepasst werden. Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, die Zeitscheiben zu Beginn der Planungsperiode größer zu gestalten, während sie am Ende der Planungsperiode immer kleiner werden. Eine solche Einteilung wäre ein Kompromiss aus Laufzeitanforderungen und Optimierungspotential.

Zwischen den Optimierungsläufen kommen nicht nur permanent neue Aufträge hinzu, sondern es können auch Veränderungen am Transportnetz vorgenommen werden. So lassen sich Veränderungen an den Kapazitäten vornehmen, wenn andere Verkehrsmittel zum Einsatz kommen oder Kapazitäten manuell vergeben werden. Auch Kapazitäten von Drittanbietern und deren Zeitfenster können sich während der Planungsperiode verändern und müssen in der Datenbasis dementsprechend angepasst werden. Veränderungen der Datenbasis dürfen allerdings nur dann vorgenommen werden, wenn sie vor dem Hintergrund der bereits verplanten Aufträge zu keinen Restriktionsverletzungen führen.

Eine Interaktion zwischen Planungssystem und Disponent würde es auch ermöglichen, dass die Disponenten den Optimierungsalgorithmus zeitnah beeinflussen können. In Abhängigkeit von den zu einem bestimmten Zeitpunkt bereits verplanten Kapazitäten können die Disponenten den Sendungen Prioritäten zuweisen, womit sie die Auftragsreihenfolge unabhängig von der Art der Sortierung manuell übersteuern würden. Da eine Priorität im derzeitig geplanten Prozess nur innerhalb eines Batches wirkt, könnte mit Hilfe einer Erweiterung ein bereits eingetrossener Auftrag auf einen späteren Batch verschoben werden. Insbesondere zeitunkritische Sendungen würden damit erst zu einem Zeitpunkt in das System eingelastet zu dem sie keine Kapazitäten belegen, die für zeitkritische Aufträge benötigt werden.

Weiterhin sollten die durch das Modell generierten Zwischenergebnisse sowie das Endergebnis als Lösungsvorschlag verstanden werden, die durch den Disponenten

verändert werden können. Das bedeutet in erster Linie, dass Sendungen, für die bereits eine Transportkette entwickelt worden ist und die damit bestimmten Verkehrsmitteln zugeordnet wurden, jederzeit verschoben werden können. Die Kapazitäten und geplanten Kosten der Verkehrsmittel sind in diesem Fall zu korrigieren. Eine Einschränkung für nachträgliche Änderungen ergibt sich allerdings durch das vorgestellte Planungsmodell: Die durch die entsprechende Sendung in der Planung erstellten zeitlichen Abhängigkeiten zwischen den Netzwerkkanten können ohne weiteres nicht wieder aufgehoben werden. Damit ergibt sich ggf. eine zu starke Einschränkung der direkt und indirekt betroffenen Zeitfenster. Da im Rahmen der operativen Planung durch vorgegebene Fahrpläne allerdings ein hohes Maß an zeitlicher Entkoppelung der Kanten gegeben ist, fällt diese Einschränkung kaum ins Gewicht.

## 9.5 Weiterer Forschungsbedarf

Im Vergleich zur Tourenplanung stellt die Planung komplexer Transportketten trotz einiger entwickelter Ansätze ein wenig bearbeitetes Feld dar. Auch der im Forschungsvorhaben entwickelte Ansatz zur ganzheitlichen Transportplanung in Sammeladungsnetzwerken wirft weitere Forschungsfelder auf. Zum einen stellt es eine interessante Aufgabe dar, den vorgestellten Algorithmus in ein Entscheidungsunterstützungssystem für den täglichen operativen Einsatz zu überführen. Aber auch weitergehende Fragestellungen müssen in der Zukunft beantwortet werden. In erster Linie sollte untersucht werden, wie der entwickelte Ansatz in der taktischen Planung Anwendung finden kann und welche Erweiterungen dafür zu entwickeln sind. Darüber hinaus ist die Fragestellung nach der optimalen Sortierung des Auftragspools weiter zu bearbeiten.

Um mit dem vorgestellten Modellansatz auch Aufgaben der taktischen Planung, also das DSND-Problem, behandeln zu können, bedarf es wesentlicher Modellerweiterungen. Wird das Modell in der jetzigen Form mit unterminierten Kanten gestartet, wird ein Loadplan sowie ein Fahrplan für alle Kanten generiert. Für die taktische Planung müssen aber weitergehende Fragestellungen gelöst werden. Diese beziehen sich insbesondere auf die Abwicklung der Streckenverkehre und die damit verbundene Gestaltung der Kostenfunktionen.

## 10 Zusammenfassung

Die starke Fokussierung auf Kernkompetenzen, die Möglichkeit einer globalen Beschaffung und der immer noch anhaltende Trend zur produktions- bzw. absatzsynchronen Produktion und Beschaffung erfordern leistungsfähige und effiziente Verkehrssysteme. Neben wirtschaftlichen Interessen gewinnen immer stärker auch ökologische Aspekte an Bedeutung und führen damit zu steigenden Energie- und Infrastrukturpreisen. Transportunternehmen sind gezwungen, ressourcensparende Lösungen zu entwerfen und Maßnahmen zu ergreifen, um die Transportleistung zu erhöhen.

Für die Zukunft werden eine weitere Güterdiversifikation, kleinere Transportmengen, größere und grenzüberschreitende Transportdistanzen, höhere Transportfrequenzen und steigende Transportnutzerzahlen erwartet. Steigende Anforderungen an Flexibilität und Flächigkeit kann dabei nur der Straßengüterverkehr, an Zeitkriterien vor allem der Luftverkehr erfüllen. Bei einem weiteren Anstieg der Transportkosten werden auch Bahn und Binnenschiff, vor allem bei größeren Transportmengen sowie zeitungskritischen Sendungen, stärkere Wachstumsraten aufweisen. Es wird in Zukunft viel stärker gelten, die verkehrsmittelspezifischen Potentiale umfassend zu heben.

Die Entwicklung und der Einsatz von immer größeren Verkehrsmitteln, wie dem Airbus 380, Containerschiffen mit 21.000 TEU, oder dem Roadtrain sind Indiz dafür, dass eine Steigerung der Transportleistung und dadurch stärker sinkende Grenzkosten auf den Hauptverkehrsrouten weiter zunehmen. Da diese Verkehrsmittel spezielle Anforderungen an die Transportwege und Infrastruktur stellen, wird die Bedeutung von Feeder- und Sammelverkehren weiterhin steigen. Das H&S-System wird dadurch weiter an Stellenwert gewinnen. Durch eine Ausdehnung über Ländergrenzen hinaus und die Verwendung multimodaler Verkehre wird die Komplexität der Netze deutlich steigen, damit nehmen die Anwendungsmöglichkeiten des vorgestellten Ansatzes weiter zu.

Die starken Zuwachsraten auf der einen Seite und aktuelle Entwicklungstendenzen auf der anderen Seite lassen erahnen, dass sich in naher Zukunft auch die Containerdienste und dort vor allem der Seehafenhinterlandverkehr noch stärker zu multimodale Netzwerken entwickeln, die eine ähnliche Struktur haben werden, wie Sam-

melladungsverkehre. Alternativen zum Lkw werden vor allem im europäischen Seehafenhinterlandverkehr und in anderen Ballungsräumen eine immer größere Rolle spielen. Zum einen steigt die wirtschaftliche Attraktivität von Eisenbahn und Binnenschiff durch steigende Transportpreise beim Lkw. Zum anderen liegen die Engpässe von Häfen, wie Rotterdam und Hamburg, oftmals in der landseitigen Abwicklung der Containermengen. Hier können Sammel- und Verteildepots im Hinterland Sortier- und Pufferaufgaben übernehmen und damit die Seehäfen und die dort stark begrenzende Straßeninfrastruktur signifikant entlasten.

Das Modell zur Planung von Systemverkehren bietet hierzu einen Ansatz, vorhandene Kapazitäten effektiv zu nutzen und eine günstige Lösung anzubieten. Dabei zeichnet es sich durch eine hohe Flexibilität aus und passt sich täglich ändernden Bedingungen schnell an. Durch die Anpassungen einiger Elemente lässt sich der Ansatz zudem auf weitere Anwendungsbereiche übertragen.

Da die Berechnung der optimalen Wege für die einzelnen Aufträge sequentiell abläuft, hat die Reihenfolge, in der die Aufträge zur Berechnung anstehen, einen Einfluss auf die Höhe der Gesamtkosten. Das globale Kostenminimum kann nur durch die Berücksichtigung aller Interaktionen der Aufträge untereinander gefunden werden, was mit zunehmender Anzahl der Aufträge den Rechenaufwand aber exponentiell steigen lässt. Daher muss der Ansatz als Heuristik verstanden werden, die aber eine durchaus akzeptable Lösung aufzeigen kann. Dies gilt vor allem durch die implementierte Vorgehensweise zur Teilterminierung, die gänzlich neue Möglichkeiten bietet und das entwickelte Modell zur Disposition auch für Aspekte der taktischen Planung interessant macht.



## 11 Öffentlichkeitsarbeit

Die Themenstellung des Forschungsvorhabens wurde während der Projektlaufzeit insbesondere in Vorträgen, aber auch in der Lehre eingebracht. Schriftliche Veröffentlichungen sind geplant bzw. derzeit in der Bearbeitung.

Erste Grundlagen, Ideen und Vorüberlegungen zum Forschungsvorhaben wurden im Rahmen eines Vortrags bei der „12<sup>th</sup> International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies“ vorgestellt. Die Konferenz fand in der Zeit vom 8. bis 10. Dezember 2007 in Hong Kong statt. Eine Veröffentlichung erfolgte mit den Conference Proceedings.

In einem weiteren Vortrag bei der „Gemeinsamen Fachtagung der Gesellschaft für Operations Research und der Deutschen Gesellschaft für System Dynamics“ wurde insbesondere auf die Modellentwicklung und die damit verbundenen Herausforderungen eingegangen. Die Fachtagung fand am 13. und 14. November 2008 in Frankfurt am Main statt.

Darüber hinaus ist für März 2010 ein weiterer Vortrag bei der Bundesvereinigung Logistik geplant, der im Programm der Regionalgruppe Niedersachsen stattfindet. Im Rahmen des Vortrags sollen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens vorgestellt werden.

Ein plattformunabhängiger Demonstrator ist über Internet auf der Homepage des Instituts für Wirtschaftsinformatik ([www.iwi.uni-hannover.de/georouting/launch.html](http://www.iwi.uni-hannover.de/georouting/launch.html)) verfügbar. Damit ist Interessierten die Möglichkeit gegeben, sich über die Entwicklungsarbeiten zu informieren.

Im Bereich der Lehre wurden Problemstellungen und Ergebnisse des Vorhabens in Vorlesungen der beteiligten Forschungsstellen aufgegriffen. Darüber hinaus wurden themenbezogene Seminar-, Studien- und Diplomarbeiten zu einzelnen Fragestellungen an Studenten der Fachrichtungen der Wirtschaftswissenschaften und des Wirtschaftsingenieurwesens vergeben.

Die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Form einer Dissertation wird derzeit abgeschlossen. Zudem wird die Veröffentlichung in Fachzeitschriften angestrebt.

## 12 Schrifttum

- /ABE-2003/ Aberle, G.: Transportwirtschaft: Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen. München: Oldenbourg, 2003
- /BAG-2008/ Marktbeobachtung Güterverkehr - Jahresbericht 2007. Köln: Bundesamt für Güterverkehr, 2008
- /BAL-1989/ Balakrishnan, A.; Graves, S. C.; A Composite Algorithm for a Concave-Cost Network Flow Problem. In: NETWORKS, 19 (1989), S. 175-202
- /BAU-1997a/ Bauz, A.: Ladungsverkehr. In: Vahlens großes Logistiklexikon Hrsg. Bloech, J.; Ihde, G. B.). München: Vahlen, 1997, S. 475-476
- /BAU-1997b/ Bauz, A.: Teilladungsverkehr. In: Vahlens großes Logistiklexikon Hrsg. Bloech, J.; Ihde, G. B.). München: Vahlen, 1997, S. 1057-1058
- /BAU-1997c/ Bauz, A.: Sammelladungsverkehr. In: Vahlens großes Logistiklexikon Hrsg. Bloech, J.; Ihde, G. B.). München: Vahlen, 1997, S. 914-915
- /BLU-2005/ Blunk, S.: Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit beschränkter Sortierkapazität. Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH) Band 65, Universitätsverlag Karlsruhe, 2005
- /BRA-1971/ Braess, D.: Die Bestimmung kürzester Pfade in Graphen und passende Datenstrukturen. In: Computing (8) 1971, Nr. 1-2, S. 171-181
- /BRÄ-2005/ Bräysy, O.; Gendreau, M.: Vehicle Routing Problem With Time Windows, Part I: Route Construction An Local Search Algorithms. In: Transportation Science Vol. 39, 2005
- /BRO-1995/ Brockmann, K.-H.: Entwicklung eines Verfahrens zur Strukturierung mehrstufiger Warenverteilungssysteme. (Hrsg. Eversheim, W.; Luczak, H.) Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1995

- /BUG-1999/ Bugiel, S.; Hartmann, A.; Rosenberg, O.; Weddewer, M.; et al.: Nabe-Speiche-Systeme für den Straßengüterverkehr. 1999
- /CLI-1982/ Climanco, J. C. N.; Martins, E. Q. V.: A bicriterion shortest path algorithm. In: European journal of Operational Research. 11 (1982), S. 399-404
- /CRA-1988/ Crainic, T. G.; Roy, J.: OR tools for tactical freight transportation planning. In: European Journal of Operational Research, 33 (1988), Nr. 3, S. 290-297
- /CRA-1997/ Cranic, T.G.; Laporte, G.: Planing Models For Freight Transportation. In: European Journal of Operational Research, 97 (1997), Nr. 3, S. 409-438
- /CRA-2000/ Crainic, T. G.: Service network design in freight transportation. In: European Journal Of Operational Research, 122 (2000), Nr. 2, S. 272-288
- /CRA-2003/ Crainic, T. G.: Long-haul freight transportation. In: Handbook of transportation Science (Hrsg. Hall, R. W.), Kluwer Academic Publishers: New York, 2003
- /CRA-2006/ Crainic, T. G.; Kim, H. K.: Intermodal Transportation. In: Handbooks in Operations Research & Management Science: Transportation, 14 (Hrsg. Barnhart, L.; Laporte, G.) North-Holland, 2006
- /CUL-2000/ Cullinane, K.; Khanna, M.: Economies of scale in large container-ships: optimal size and geographical implications. In: Journal of Transport Geography, 8 (2000), S. 191-195
- /DAL-2004/ Dall'Orto, L. C.; Crainic, T. G.; Leal, J. E. et al.: The Single-Node Dynamic Service Scheduling And Dispatching Problem. In: European Journal of Operational Research 170 (2006), Nr. 1, S. 1-23
- /DAN-1960/ Dantzig, G. B.: On the Shortest Route Through a Network.

- /DES-1988/ Desrochers, M.; Soumis, F.: A generalized permanent labelling algorithm for the shortest path problem with time windows. In: INFOR, 26 (1988), Nr. 3, S. 191 - 212
- /DIN-1977/ DIN 70014, Teil 1: Fahrzeuge für den Transport von Wechselbehältern, Anschlußmaße. Berlin: Beuth Verlag, 1977
- /DIN-1991/ DIN 15146, Teil 4: Vierwege-Flachpalette aus Holz, 800 mm x 600 mm. Berlin: Beuth Verlag, 1991
- /DIN-1999/ DIN ISO 668: ISO-Container der Reihe 1, Klassifikation Maße Gesamtgewichte. Berlin: Beuth Verlag, 1999
- /DIN-2004/ DIN EN 13698-1: Produktspezifikation für Paletten - Teil 1: Herstellung von 800 mm x 1200 mm Flachpaletten aus Holz; Deutsche Fassung EN 13698-1:2003. Berlin: Beuth Verlag, 2004
- /DIN-2007/ DIN EN 284: Wechselbehälter - Nicht stapelbare Wechselbehälter der Klasse C - Maße und allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 284:2006. Berlin: Beuth Verlag, 2007
- /DIJ-1959/ Dijkstra, E. W.: A Note on Two Problems in connexion with Graphs. In: Numerische Mathematik, Band 1, 1959, S. 269-270
- /DOM-1995/ Domschke, W.: Logistik: Transport. 4. Aufl., München, Wien, Oldenbourg: Oldenbourg Verlag, 1995
- /DOM-1997/ Domschke, W.: Logistik: Rundreisen und Touren. 4. Aufl., München, Wien, Oldenbourg: Oldenbourg Verlag, 1997
- /DOM-2003/ Domschke, W.; Häselbarth, L.; Scholl, A.: WISU-Lexikon: Operations Research. In: WISU - das Wirtschaftsstudium 32 (2003), Beihefter zur Juni-Ausgabe
- /DSL-2008/ Jahresbericht 2007. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V., Bonn

- /EGG-2005a/ Eggers, H.: Türkei-Container-Shuttle. In: Bahn-Report, 23 (2005), Nr. 3, S. 23
- /EGG-2005b/ Eggers, H.: Testzug China-Duisburg. In: Bahn-Report, 23 (2005), Nr. 3, S. 22-23
- /EIK-1998/ Eikelau, M.: Ladungsverkehr. In: Handbuch der Verkehrslogistik (Hrsg. Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.), Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1998, S. 49-53
- /FEI-2008/ Feige, D.; Klaus, P.: Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Logistik. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2008
- /FOR-1956/ Ford, L. R.: Network Flow Theory. Santa Monica: The Rand Corporation, 1956
- /FRE-2004/ Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: Industrie Management, 20 (2004) 1, GITO, Berlin
- /GER-2008/ Gerasch, M.; Mettenheim, H.-J.; Schulte, C. et al.: Ganzheitliche Disposition von Strecken- und Flächenverkehren durch kombinierten Einsatz modifizierter Operations Research Verfahren. Vortrag: Gemeinsame Fachtagung der Gesellschaft für Operations Research und der Deutschen Gesellschaft für System Dynamics, 13. und 14.11.2008, Frankfurt/Main
- /GLO-1984/ Glover, F.; Glover, R.; Klingman, D.: Computational Study of an Improved Shortest Path Algorithm. In: Networks. 14 (1984), S. 25-36
- /GRA-1998/ Graf, H.-W.: Tourenplanungssysteme. In: Handbuch der Verkehrslogistik (Hrsg. Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.), Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1998, S. 236-240
- /GRÜ-1999/ Grünert, T.; Sebastian, H.-J.: Modelle zur taktischen Planung von Frachttransporten. In: Logistik Management - Intelligente I&K Tech-

- nologien (Hrsg. Kopfer, H.; Bierwirth, C.), Berlin: Springer-Verlag, 1999
- /GRÜ-2000/ Grünert, T.; Sebastian, H.-J.: Planning Models For Long-Haul Operations Of Postal And Express Shipment Companies. In: European Journal of Operational Research 122, 2000
- /GRÜ-2005a/ Grünert, T. ; Irnich, S.: Optimierung im Transport - Band II: Wege und Touren. Aachen: Shaker Verlag, 2005
- /GRÜ-2005b/ Grünert, T.; Irnich, S.:Optimierung im Transport - Band I: Grundlagen. Aachen: Shaker Verlag, 2005
- /GUE-2001/ Guerriero, F.; Musmanno, R.: Label Correcting Methods to solve Multicriteria Shortest Path Problems. In: Journal of Optimization Theory and Applications, 111 (2001), Nr. 3, S. 589 - 613
- /GVE-2008/ N. N.: Güterfernverkehrsentgelte. 63. Ausgabe, Düsseldorf: Verkehrs-Verlag J. Fischer, 2008
- /HAR-1968/ Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, Vol. SSC-4, No. 2, 1968, S. 100-107
- /HAR-1991/ Harmatuck, D.J.: Economies Of Scale And Scope In The Motor Carrier Industry. In: Journal of Transport Economics and Policy Vol. 25, (1991), No. 2
- /HEI-1983/ Heimes, A.: Handlexikon des Güterkraftverkehrs. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 1983
- /HEY-2006/ Heymann, E.: Containerschiffahrt - Überkapazitäten trotz steigender Nachfrage programmiert, 04/2006. Deutsche Bank Research, [http://www.dbresearch.de/PROD/DBR\\_INTERNET\\_DE-PROD/PROD0000000000197745.pdf](http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000197745.pdf), Stand: 01/2009

- /IRN-2002/ Irnich, S.: Netzwerk-Design für zweistufige Transportsysteme und ein Branch-and-Price-Verfahren für das gemischte Direkt- und Hubflugproblem. Aachen: 2002
- /ISO-1998/ ISO 1496-1 AMD 2: ISO-Container der Reihe 1 - Anforderungen und Prüfung - Teil 1: Stückgut-Container; Änderung 2, 1998
- /JAN-2003/ Janz, O.: Integriertes Transportnetzmanagement: Angebots- und nachfrageorientierte Planung und Steuerung komplexer Transportnetze. Mannheim: Josef Eul Verlag, 2003
- /JAC-2006/ Jacquemin, M.: Netzmanagement im Luftverkehr. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006
- /KBA-2008/ Statistiken - Kraftverkehr - Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge - Gesamtverkehr. Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de/>, Stand: 07/2008
- /KGS-2007/ Wilken, V.: Kostensätze Gütertransport Straße. Düsseldorf: Verkehrs-Verlag J. Fischer, 2007
- /KLA-2006/ Klaus, P.; Müller, S.: Advanced-Truckload-Netzwerke in den USA: Ein Erfolgsmodell auch für Europa? In: Logistik Management. 8 (2006), Nr. 2, S. 44-57
- /KLO-2001/ Kloster, T.: Gestaltung von Logistiksystemen auf Basis von Netzefekten. Peter Lang GmbH, Frankfurt am Main, 2001
- /KOP-1992/ Kopfer, H.: Konzepte genetischer Algorithmen und ihre Anwendung auf das Frachtoptimierungsproblem im gewerblichen Güterfernverkehr. In: OR Spectrum, 14 (1992), Nr. 3, S. 137-147
- /KOP-1999/ Kopfer, H.; Pankratz, G.: Das Groupage-Problem kooperierender Verkehrsträger. In: Proceedings of Operations Research 1998 (Hrsg. Kall, P.; Lüthi, H.-J.), Springer-Verlag, 1999



- /KOP-2006/ Kopfer, H.; Krajewska, M. A.: Inter- und intraspeditionelle Auftragsdisposition. In: Industrie Management, 2006, Nr. 3, S. 75-77
- /LEU-1988/ Leung, J. M. Y.; Magnati, T. L.; Singhal, V.: Routing in Point-to-Point Delivery Systems. Working Paper at the Yale School of Organization and Management, Series B, Nr. 103, 1988
- /LIN-2000/ Linke, W.: Orientierung mit Karte, Kompaß, GPS. 10. Aufl., Herford: Busse Seewald, 2000
- /LUB-1998/ Lublow, R.: Sammelgutverkehr. In: Handbuch der Verkehrslogistik (Hrsg. Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.), Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1998, S. 53-56
- /LUD-2008/ Ludwig, M.: Letzte Ausfahrt Streik? [http://www.azonline.de/lokales/kreis\\_coesfeld/luedinghausen/Letzte\\_Ausfahrt\\_Streik.html](http://www.azonline.de/lokales/kreis_coesfeld/luedinghausen/Letzte_Ausfahrt_Streik.html), Stand: 07/2009
- /LOR-2001/ Lorenz, W.: Leitfaden für Spediteure und Logistiker in Ausbildung und Beruf, Band 1. (Hrsg. Korf, Willy) 18. Auflage, Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, 2001
- /MAR-1984/ Martins, E. Q. V.: On a multicriteria shortest path problem. In: European Journal of Operational Research, 16 (1984), S. 236-245
- /MAY-2001/ Mayer, G.: Strategische Logistikplanung von Hub&Spoke-Systemen. Deutscher Universität-Verlag, Wiesbaden, 2001
- /MIY-2003/ Miyamoto, Y; Kubo, M.: Algorithms for the Freight Network Design Problem. The Fifth Metaheuristics International Conference, Kyoto, 25.08.2003 - 28.08.2003
- /MOU-2008/ Moura, A.; Oliveira, J. F.: An integrated approach to the vehicle routing and container loading problems. <http://www.springerlink.com/content/35hg2n207q1u0563>, Stand: 01/2009

- /NIC-2006/ Nicolai, B.: Im Sog der dicken Emma. In: Die Welt, erschienen 15.09.2006
- /OST-1999/ Ostkamp, P.: Methoden zur Planung von multimodalen, zeitrestriktiven Transportnetzen. (Hrsg. Jünemann, R.) Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1999
- /PAN-2001/ Pankratz, G.; Gehrling, H.: Ein genetischer Algorithmus für ein dynamisches speditionelles Dispositionsproblem. In: Proceedings of Operations Research 2000 (Hrsg. Fleischmann, B.; Lasch, R.; Derings, U.; Domschke, W.; Rieder, U.), Berlin: Springer-Verlag, 2001, S. 420-425
- /PFO-1995/ Pfohl, H.-Ch.: Logistiksysteme. 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996
- /PIE-2006/ Pietsch, T.: Partner gesucht. In: Logistra, 18 (2006), Nr. 1-2, S. 44 f.
- /POW-1983/ Powell, W. B.; Sheffi, Y.: The Load Planning Problem of Motor Carriers: Problem Description and a proposed Solution Approach. In: Transport Research, 17A (1983), Nr. 6, S. 471-480
- /POW-1986/ Powell, W. B.: A Local Improvement Heuristic For The Design Of Less-Than-Truckload Motor Carrier Networks. In: Transportation Science, 20 (1986), Nr. 4
- /POW-2007/ Powell, W. B.; Bouzaiene-Ayari, B.; Simao, H. P.: Dynamic Models for freight Transportation. In: Handbooks in Operations Research (Hrsg. Barnhart, C.; Laporte, G.) Amsterdam: North-Holland, 2007
- /ROY-2001/ Roy, J.: Recent Trends In Logistics And The Need For Real-Time Decision Tools In The Trucking Industry. Proceedings of the 34<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Science, Montreal, 2001
- /SCH-2004/ Schönberger, J.; Kopfer, H.: A collaborative approach for solving the portfolio recomposition problem in transport cooperations. In: Logistik

- Management (Hrsg. T. Spengler et al.). Heidelberg: Physica Verlag, 2004
- /SCH-2005/ Schönberger, J.: Operational Freight Carrier Planning. Berlin: Springer-Verlag, 2005
- /SCH-2006/ Schulze, L.; Gerasch, M.: New Approaches For Groupage Freight Transport Planning. In: Logistics Research Network 2006, Newcastle, 2006
- /STÖ-2007/ Stöffges, P.: Riesen im Netz der kleinen. In: trans aktuell, 2008, Nr. 1, S. 6
- /THÜ-1975/ Thümer, R.: Ein Verfahren zur Auswahl von Teilnetzen bei der Bestimmung kürzester Wege in Verkehrsnetzen. In: Zeitschrift für Operations Research, 19 (1975), Nr. 6, S. B149-B153
- /VAH-2003/ Vahrenkamp, R.: Quantitative Logistik für das Supply Chain Management. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003
- /VAH-2005/ Vahrenkamp, R.: Die Rolle der Luftfracht in der internationalen Logistik II. In: Arbeitspapier der Logistik No. 55 (2004), Oldenburg Verlag, München, 2005
- /VAH-2007a/ Vahrenkamp, R.; Siepermann, C.: Logistik. 6. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007
- /VAH-2007b/ Vahrenkamp, R.; Mattfeld, D. C.: Logistiknetzwerke. 1. Auflage, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 2007
- /VAS-1998/ Vastag, A.; Buchholz, J.; Clausen, C.: Handbuch der Verkehrslogistik. Springer, Berlin, 1998
- /VOI-2008a/ Zonentarif 2007. Herbert Voigt GmbH & Co. KG, <http://www.voigt-logistik.de/pdf/Stueckgut/zonentarif.pdf>, Stand: 07/2009
- /VOI-2008b/ Voigt Ladungstabelle 2007. Herbert Voigt GmbH & Co. KG, <http://www.voigt-logistik.de/pdf/Ladungen/Ladungstab.pdf>, Stand: 07/2009

- 
- /WIE-2008/ Wieberneit, N.: Service network design for freight transportation: a review. In: OR Spectrum, 30 (2008), Nr. 1, S. 77-112
- /WOO-1995/ Wooldridge, M.; Jennings, N.R.: Intelligent Agents: Theory And Practise. In: The Knowledge Engineering Review 10 (1995) 2
- /ZIE-1988/ Ziegler, H.-J.; Binder, G.; Niemeier, H.-V.; et al.: Computergestützte Transport- und Tourenplanung. Expert Verlag, Esslingen, 1998