Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der

Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr

vorgelegt von

Thomas Bednarczyk,
geboren am 17.02.1977 in Wurzen

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2012

Hamburg 20. Juni 2012

Erster Gutachter: Prof. Dr. Andreas Fink

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Tüshaus

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit an der Helmut–Schmidt–Universität (Universität der Bundeswehr) am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Hamburg, und während meiner Arbeit bei der Firma PROLOGOS Planung und Beratung.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Andreas Fink bedanken, der mir die Promotion ermöglichte und mich tatkräftig unterstützte. Mein Dank gilt außerdem den Geschäftsführern der Firma PROLOGOS Dr. Martin Gietz, Andreas Kindt und Torsten Henneberg für die konstruktiven Gespräche und für die zur Verfügungstellung der Datensätze. Dank auch an Herrn Prof. Dr. Ulrich Tüshaus für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Klaus Zoller, der mir den Weg zur Helmut–Schmidt–Universität öffnete, Herrn Prof. Dr. Ulrich Tüshaus, der mich hilfreich beim Programmieren mit CPLEX unterstützte und Herrn Dr. Ianigro, der mir die Ressourcen des EDV-Labors zur Verfügung stellte, danke ich ebenfalls. Auch möchte ich allen Mitstreitern der QBWL-Workshops danken, die mit ihren Anregungen eine große Unterstützung waren. Schließlich möchte ich mich bei Frau Gerda Sprogies bedanken, die mich jederzeit tatkräftig unterstützte und einen Anteil am Erfolg dieser Arbeit hat.

Diese Arbeit ist meiner Frau und meinen Söhnen Simon und Jonas Gottlieb gewidmet.

Hamburg, November 2009

Thomas Bednarczyk

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ix

Tabellenverzeichnis xi

Algorithmenverzeichnis xiii

Abkürzungsverzeichnis xv

1. Einführung 1
- 1.1. Problemstellung . . . 1
- 1.2. Aufbau der Arbeit . . . 3

2. Charakterisierung der Problemstellung 5
- 2.1. Allgemeine Abgrenzungen . . . 5
  - 2.1.1. Logistik . . . 5
  - 2.1.2. Speditionen und KEP-Dienste . . . 8
  - 2.1.3. Transportsysteme . . . 9
  - 2.1.4. Transportmittel . . . 12
  - 2.1.5. Transportgut . . . 14
  - 2.1.6. Logistisches Netz . . . 15
  - 2.1.7. Umschlaganlage . . . 16
  - 2.1.8. Transportketten . . . 18
- 2.2. KEP-Dienste . . . 19
  - 2.2.1. Logistikdienstleistung als Teilbereich der Logistik . . . 19
  - 2.2.2. Unterscheidung zwischen Kurier-, Express- und Paketdiensten . . . 22
  - 2.2.3. Die geschichtliche Entwicklung der KEP-Dienste . . . 23
  - 2.2.4. KEP-Dienste aus heutiger Sicht . . . 27
- 2.3. Planungsprobleme im Rahmen einer Transportdurchführung . . . 29
  - 2.3.1. Planungsaufgaben für KEP-Dienstleister . . . 29
  - 2.3.2. Leistungserbringung der KEP-Dienste im logistischen Netz . . . 30
  - 2.3.3. Strategische Planung . . . 36
  - 2.3.4. Taktische Planung . . . 37
  - 2.3.5. Operative Planung . . . 41
- 2.4. Internationale Logistik . . . 43
  - 2.4.1. Merkmale der internationalen Logistik . . . 43
  - 2.4.2. Grenzüberschreitender Güterverkehr . . . 44

2.4.3. Internationale Netze 47

3. Verwandte Probleme in der Literatur 51
3.1. Mehrgüter-Netz-Flussprobleme 51
3.2. Service Netz Design Probleme 53
3.3. Zeit-Raum-Netze 57
3.4. Beispiele für SND Probleme 59
3.4.1. Expressdienst Problem in einem Flugnetz 59
3.4.2. Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen 65
3.4.3. Direkt- und Hubflugproblem für Briefsendungen 69
3.4.4. Planung von Stückgut-Transporten in Nordamerika 73
3.4.5. Güterverkehrsnetzplanung in Deutschland 77
3.5. Zusammenfassung und Ableitungen 81

4. Modell zur Linienverkehrsplanung 87
4.1. Abgrenzung der Problemstellung 87
4.2. Modellierung der Problemstellung 93
4.2.1. Beschreibung des Modells 93
4.2.2. Parameter 97
4.2.3. Lösungsvariablen 103
4.2.4. Konsolidierung der Mengen 106
4.2.5. Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen 115

5. Lösungsverfahren und Fallstudien 117
5.1. Hardware- und Softwareumgebung 118
5.2. Datensätze 119
5.3. Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen 123
5.3.1. Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen 126
5.3.2. Diskretisierung der Zeit 128
5.3.3. Identifizierung von ungeeigneten Mengen 130
5.4. Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren 134
5.4.1. Mathematisches Modell 139
5.4.2. Symmetrie-brechende Restriktionen im mathematischen Modell für ILOG CPLEX 140
5.4.3. Parametertests für ILOG CPLEX 143
5.4.4. Ergebnisse mit ILOG CPLEX 145
5.4.5. Lokale Suchmethoden 154
5.4.6. Ergebnisse mit lokalen Suchmethoden 161
5.4.7. Bewertung der Verfahren 1 und 2 163
5.5. Zusammenfassung für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen 169
5.6. Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen 171
5.6.1. Mathematisches Modell 172
5.6.2. Lösungsverfahren und Tests 173

6. Zusammenfassung und Ausblick **177**
6.1. Zusammenfassung 177
6.2. Ausblick 178

7. Literaturverzeichnis **181**

A. Anhang **189**

B. Hilfsmittel **207**

Abbildungsverzeichnis

2.1. TUIL-Prozesse als logistische Grundfunktionen 6
2.2. Ausprägungsformen des Güterverkehrs 12
2.3. Typisierung der Rampenformen für die Verladung 17
2.4. Auslastung eines Depots im zeitlichen Verlauf 18
2.5. Eingliedrige und mehrgliedrige Transportketten 19
2.6. Offenes und geschlossenes Dienstleistungssystem - Merkmale und Beispiele 20
2.7. Ausprägungsbeispiele von Logistiksystemen 21
2.8. Übersicht des KEP-Marktes bis 1998 26
2.9. Übersicht des KEP-Marktes in Deutschland ab 1998 27
2.10. Planungsebenen der Verkehrsorganisation in KEP-Dienste 31
2.11. Darstellung eines Direktverkehrs-, Hub-and-Spoke-, Regionalhub- und Feederhubnetzes 33
2.12. Darstellung eines Mehrhub- und gemischten Transportnetzes 33
2.13. Darstellung des Vor-, Haupt- und Nachlaufs beim Sendungstransport vom Versender zum Empfänger 34
2.14. Beispiel für die zeitliche Abfolge in Transportketten für KEP-Dienste . . 35
2.15. Beispiel für die Einrollverteilung an einem Versanddepot 39

3.1. Beispiel für eine nicht ganzzahlige Lösung eines MCNF-Problems 52
3.2. Zusammenfassung der Klassifikation von SND-Problemen 54
3.3. Pfad in einem SND-Problem 55
3.4. Beispiele für ein Time-Line-Netz und ein Time-Connection-Netz 58
3.5. Beispiel für die Bündelung von Knoten in einem Time-Line-Netz 59
3.6. Beispiel für Express-Paketdienst Operationen 61
3.7. Iteratives Lösungsverfahren für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz 62
3.8. Abgeleitetes Abholnetz für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz 63
3.9. Abgeleitetes Zuliefernetz für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz 63
3.10. Darstellung des Grundproblems für die Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen 66
3.11. Zusammenfassung des Lösungsverfahrens für die Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen 68
3.12. Beispiel für das Direkt- und Hubflugproblem für Briefsendungen 71
3.13. Verbesserung einer Lösung für die Planung von Stückgut-Transporten in Nordamerika 77

3.14. Lösungsverfahren für die Güterverkehrsnetzplanung in Deutschland . . . 79

4.1. Vereinfachtes Beispiel für die Konsolidierung von zu transportierenden Mengen zu Ladegefäßen . . . 88
4.2. Beispiele für die technische Auswirkung einer Servicezeit größer als 24 Stunden . . . 96

5.1. Planungstool PRODISI CEP . . . 120
5.2. Beispieldatensatz Frankreich . . . 121
5.3. Beispieldatensatz Europa . . . 122
5.4. Einzelne Transportabschnitte der Relationen Stufen zuteilen . . . 123
5.5. Bezüglich des Servicegrades 10 ausgewählte Ergebnisse für die Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen . . . 127
5.6. Ausgewählte Ergebnisse für die Diskretisierung der Zeit . . . 130
5.7. Zeitraum für die Verfügbarkeitszeitpunkte an einem Versanddepot . . . 131
5.8. Zeitraum für die Verfügbarkeitszeitpunkte an einem Hub . . . 131
5.9. Bezüglich des Servicegrades ausgewählte Ergebnisse für die Identifizierung ungeeigneter Mengen . . . 133
5.10. Bezüglich der Rechenzeit ausgewählte Ergebnisse für die Identifizierung von ungeeigneten Mengen . . . 134
5.11. Beispiel für die Zuordnung des Ladegefäßes 3 zu einem Eingangstor . . . 135
5.12. Ergebnisse der Tests mit den symmetrie-brechenden Restriktionen im mathematischen Grundmodell für ILOG CPLEX . . . 142
5.13. Ergebnisse der Parametereinstellungen zur Bestimmung des Weges vom Algorithmus im Baum . . . 147
5.14. Ergebnisse der Parametereinstellungen zur Lösung der Start-Relaxation und der Teilprobleme nach der Start-Relaxation in einem MIP . . . 149
5.15. Ergebnisse der weiteren Parametereinstellungen für empirische Tests . . . 151
5.16. Ergebnisse aus Kombination bester Parametereinstellungen mit Sifting in MIP Start . . . 153
5.17. Beispiele für Shifts und Swaps als Nachbarschaftsbeziehungen in einer Lösung . . . 158
5.18. Ergebnisse für getestete Steepest Descent Varianten . . . 162
5.19. Ergebnisse für Verfahren 1 . . . 164
5.20. Die besten erlangten Servicegrade bezüglich der Gruppierung des Parameters für die maximal zulässige Rechenzeit zur Lösung eines Zuordnungsproblems „Ladegefäße zu Eingangstore“ ($maxZeit$) im Verfahren 2 . . . 166
5.21. Bezüglich des Servicegrades ausgewählte Testergebnisse für das Verfahren 2 167
5.22. Verglichene Servicegrade bei gleichem *alpha*-Wert und unterschiedlichen $maxZeit$- (≥ 100) bzw. $maxPermut$-Werten . . . 168
5.23. Bezüglich der Rechenzeit ausgewählte Ergebnisse für das Verfahren 2 . . . 168
5.24. Vergleich von Anzahl Fahrzeugtransporte und Servicegrad für die Datensätze Europa und Frankreich . . . 175

Tabellenverzeichnis

2.1. Hauptmerkmale für nationale, kontinentale und interkontinentale Transportnetze der KEP-Branche 48

3.1. Hauptmerkmale der betrachteten Arbeiten 83
3.2. Eigenschaften der Lösungsmethoden 84

4.1. Beispiel für die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen 88
4.2. Hauptmerkmale des betrachteten KEP-Dienstes 89

5.1. Hauptmerkmale des Beispieldatensatzes Frankreich 121
5.2. Hauptmerkmale des Beispieldatensatzes Europa 122
5.3. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.5 dargestellten Werte 127
5.4. Beispiel für die Diskretisierung der Zeit für die Einrollverteilung an einem Versanddepot 128
5.5. Beispiel für die Diskretisierung der Zeit für die Einrollverteilung an einem Hub 129
5.6. Zahlenwerte für die in der Abbildung dargestellten Werte 129
5.7. Beispiel für die Identifizierung ungeeigneter Mengen 131
5.8. Beispiel für die Identifizierung ungeeigneter Mengen 132
5.9. Beispiellösungen für Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren an einem Standort 136
5.10. Beispiel für die stückweise lineare Kostenfunktion 137
5.11. Beispiel für die Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren an einem Empfangsdepot 138
5.12. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.12 dargestellten Werte 142
5.13. Parametereinstellungen für Bestimmung des Weges des Algorithmus im Baum 144
5.14. Parametereinstellungen für Lösung der Start-Relaxation und der Teilprobleme nach der Start-Relaxation in einem MIP 144
5.15. Weitere Parametereinstellungen für empirische Tests 145
5.16. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.13 dargestellten Werte 146
5.17. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.13 dargestellten Werte 150
5.18. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.15 dargestellten Werte 152
5.19. Kombination der Parametereinstellungen mit *Sifting* für den MIP-Start-Algorithmus 152
5.20. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.16 dargestellten Werte 154

5.21. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.18 dargestellten Werte 163
5.22. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.19 dargestellten Werte 165

A.1. Zahlenwerte für die in den Abbildungen 5.9 und 5.10 dargestellten Werte 190
A.2. Zahlenwerte für die in den Abbildungen 5.22 und 5.23 dargestellten Werte 198
A.3. Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.24 dargestellten Werte 206

Algorithmenverzeichnis

1. Pseudocode des Verfahrens für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen 124
2. Pseudocode des alternativen Verfahrens für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen 125
3. Steepest Descent Decode Konstruktion 155
4. Steepest Descent Decode Zufall 156
5. Steepest Descent Shift Swap Konstruktion 159
6. Steepest Descent Shift Swap Zufall 160
7. Pseudocode des Verfahrens Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen 174

Abkürzungsverzeichnis

ADK	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Kurierdienste
AZD	Alternativer Zustelldienst
B2C	Business-to-Consumer
BR	Branching-Richtung
BZ	Briefzentrum
CEP	Courier-Express-Postal
DHL	Dalsey, Hillblom, Lind
DPD	Dynamic Parcel Distribution (bis 2007 Deutscher Paketdienst)
DZFW	durchschnittlicher Zielfunktionswert
FedEx	Federal Express
GP	German Parcel
GVZ	Güterverkehrszentren
HGB	Handelsgesetzbuch
ISO	Internationale Organisation für Normung
JIT	Just in Time
KAS	Knotenauswahlstrategie
KEP-Dienste	Kurier-, Express- und Paketdienste
LEM	Location Elimination Modell
LP	Lineare Programmierung
MCNF	Multi-Commodity Network Flow
MIP	Mixed Integer Problem

MIP DS ..... MIP Emphasis Indikator

MIP SA ..... MIP Start Algorithmus

MIP TA ..... MIP Teilproblem Algorithmus

MIT ..... Massachusetts Institute of Technology

NAFTA ..... Nordamerikanische Freihandelsabkommen

RZ ..... Rechenzeit

SB ..... Symmetrie brechend

SD ..... Steepest Descent

SG ..... Servicegrad

SND ..... Service Netz Design

TEN ..... Transeuropäische Netze

TNT ..... Thomas Nationwide Transports

TUIL ..... Transport-, Umschlag-, Informations- und Lagerlogistik

TUL ..... Transport-, Umschlag- und Lagerlogistik

UPS ..... United Parcel Service

VAS ..... Variablenauswahlstrategie

1. Einführung

1.1. Problemstellung

Der logistische Dienstleistungsmarkt der Kurier-, Express- und Paketdienstleister (KEP-Dienstleister) bezieht sich im Kern auf Kleingut bis 31,5 kg, wie z.B. Briefe, Dokumente und Pakete. Die Teilmärkte Kurier-, Express- und Paketdienste werden anhand der spezifischen Leistungen und der Preisstruktur voneinander abgegrenzt, wobei in der Praxis ausgeprägte Überschneidungen auftreten. Da die zulässigen Güter im KEP-Markt hinsichtlich Vielfalt, Maß und Gewicht eingeschränkt sind, lässt sich für Transport, Lagerung und Umschlag eine hohe Standardisierung erreichen. Dies führt dazu, dass entsprechende Güter zuverlässig und in kurzen Laufzeiten (etwa 24 oder 48 Stunden) in getakteten Verkehren transportiert werden können.

Der Versand von KEP-Sendungen zwischen Versendern und Empfängern umfasst die logistischen Funktionen Sammeln, Sortieren, Umschlagen, Transportieren und Verteilen. Hierbei fallen Planungsaufgaben auf strategischer, taktischer und operativer Ebene an. Die wesentlichen Standorte des logistischen Netzes werden auf der strategischen Ebene längerfristig geplant. In der taktischen Planung sind in dem gegebenen Netz die grundsätzlichen Verkehrsabläufe zu organisieren. Die operative Planung bezieht sich auf die eigentliche Realisierung.

Die als Start- und Endpunkte von Sammel- und Verteiltouren definierten Knoten werden als Depots bzw. Versand- und Empfangsdepots bezeichnet. In den Versanddepots werden Sendungen hinsichtlich der Versandziele sortiert. Sendungsschwache Relationen (mit relativ geringen Transportmengen zwischen bestimmten Versand- und Empfangsdepots) werden zweckmäßigerweise zu größeren Transporten zu zentralen Umschlageinrichtungen (Hubs) gebündelt (Konsolidierung von Mengen). Der Transport der Sendungen wird im gebrochenen Verfahren typischerweise in einer dreigliedrigen Transportkette durchgeführt: Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf.

Beim Vorlauf werden die Transporte von Sendungen zwischen Versendern und Depots betrachtet. Von einem Depot starten in der Regel mehrere Sammeltouren, die das Sendungsaufkommen innerhalb der Region aufnehmen und zum Depot befördern. Im Depot ankommend werden die eintreffenden Sendungen umgeschlagen und für den Hauptlauf sortiert. Beim Nachlauf erfolgt analog zum Vorlauf die Auslieferung der Sendungen an die Empfänger auf mehreren Verteiltouren.

Während des Hauptlaufs werden alle Sendungen, die vom gleichen Versanddepot in Gebiete gleicher Empfangsdepots befördert werden sollen, zu einer so genannten Menge gebündelt und auf ein Fahrzeug verladen (Fernverkehre). Diese Mengen werden grundsätzlich in Gewicht und Volumen angegeben. Bei KEP-Diensten können zur genaueren Planung weitere Kenngrößen angegeben werden (etwa Anzahl Pakete, Paletten und Dokumente). Bei den im Hauptlauf vor allem in Europa eingesetzten Transportfahrzeugen handelt es sich in der Regel um Wechselbrückenfahrzeuge, die zwei normierte Ladegefäße aufnehmen können.

Je nach Anzahl der Depots können im Hauptlauf viele Transportrelationen vorliegen. Um die Transportmittel angemessen auszulasten, werden im Hauptlauf Konsolidierungsschritte durchgeführt. In der Regel erfolgt dies durch Abwicklung mehrerer Transporte über einen weiteren Umschlagpunkt (Hub). Somit kann der Verlauf der Transporte über mehrere Hubs mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln erfolgen.

Das in dieser Arbeit betrachtete Problem der Linienverkehrsplanung zählt zur taktischen Planungsebene. Vorausgesetzt werden ein Netz aus Depot- und Hubstandorten sowie die darauf basierende Netzstruktur. Mit der Linienverkehrsplanung ist der Transport der Mengen im Fernverkehr (Depot-Depot-Relationen, kurz: Relationen) zu gestalten. Aufgrund des Vorlaufs bilden sich an den Versanddepots Sammelladungen, die im Hauptlauf vom Versand- zum Empfangsdepot transportiert werden müssen. Die Verkehre im Hauptlauf werden in der Regel fahrplanmäßig getaktet gestaltet (Linienverkehre). Für die Linienverkehrsplanung wird das tägliche Mengenaufkommen, welches sich aus den einzelnen Sendungsdaten und den Einzugsgebieten der Depots ergibt, für jede Relation vorgegeben. Der Linienverkehrsplan soll mittelfristig gültig sein (etwa für mehrere Monate).

Aufgrund praktischer Vorgaben stehen bei der Linienverkehrsplanung die folgenden vier Entscheidungsfelder im Mittelpunkt:

- Bestimmung der Transportwege je Relation,
- Bündelung der Mengen zu Ladegefäßen,
- Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen und
- Bestimmung der genauen Touren der Fahrzeuge mit Identifizierung von geschlossenen Umläufen, Begegnungsverkehren und One-Way-Fahrten (= einfache Fahrt, keine Rückfahrt).

In dieser Arbeit werden die Bündelung der Mengen zu Ladegefäßen und die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen betrachtet. Die Transportwege je Relation sind aus einem vorgelagerten Planungsschritt vorgegeben. Als zukünftige Aufgabe verbleibt die Bestimmung der genauen Touren der Fahrzeuge mit Identifizierung von geschlossenen Umläufen, Begegnungsverkehren und One-Way-Fahrten.

Für KEP-Dienstleister sind der kostenorientierte Einsatz von Fahrern und Fahrzeugen und ein hoher Servicegrad die vorrangigen, konkurrierenden Planungsziele. Bei einer gegebenen Fahrer- und Fahrzeugverfügbarkeit sind bei Vorgabe von Zeitfenstern für die einzelnen Relationen verspätet ankommende Transportmengen an den Empfangsdepots zu minimieren. Ziel ist damit die Maximierung des Servicegrades unter gegebenen Rahmenbedingungen.

Als Fallstudie für diese Arbeit liegen die Netze und Sendungsdaten europaweit tätiger KEP-Dienstleister zugrunde. Das Hauptziel der Arbeit ist, einen heuristischen Lösungsansatz für die Problemstellung Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste zu entwickeln, der zentrale Aspekte der praktischen Fallstudien berücksichtigt und mit geringen Rechenzeiten hochwertige Lösungen erzielt.

1.2. Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 steht die Beschreibung der Leistungserbringung der KEP-Dienste im logistischen Netz im Mittelpunkt. Hierfür werden zunächst allgemeine Abgrenzungen diskutiert. Anschließend werden die KEP-Dienste als Logistikdienstleistung vor allem hinsichtlich der geschichtlichen Entwicklung genauer betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt eine ausführliche Beschreibung der Planungsprobleme im Rahmen einer Transportdurchführung für KEP-Dienste. Abschließend wird auf die Internationalisierung der KEP-Dienste in Europa und deren Auswirkung auf die Linienverkehrsplanung eingegangen.

Welche vergleichbare Problemstellungen in der Literatur vorkommen, wird im Kapitel 3 besprochen. Diese Problemstellungen werden häufig als Service Netz Design Probleme modelliert. Diese bauen auf den zuvor einzuführenden Mehrgüter-Netz-Flussprobleme auf.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung und Analyse von Instrumenten, mit denen auf Basis von praktischen Vorgaben die Linienverkehre von KEP-Dienstleistern geplant werden können. Dazu entwickeln wir im Kapitel 4 ein Modell, das die Aufgabenstellung definiert. Dazu wird zunächst die Problemstellung abgegrenzt und anschließend das Modell vorgestellt.

Im Kapitel 5 entwickeln wir ein heuristisches Lösungsverfahren, welches auf einer Zerlegung in Teilprobleme beruht: Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen und Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen. Hierbei baut das letztere Teilproblem auf das Ergebnis des ersten Teilproblems auf. Die Leistungsfähigkeit des heuristischen Verfahrens wird anhand zweier praxisbezogener Fallstudien untersucht.

Im abschließenden Kapitel 6 werden die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Weiterhin erfolgt eine Diskussion über zukünftige Forschungserfordernisse.

2. Charakterisierung der Problemstellung

Das Ziel dieses Kapitels ist, die Leistungserbringung der KEP-Dienste im logistischen Netz und somit die Linienverkehrsplanung genau zu beschreiben. Dazu werden zunächst im Abschnitt 2.1 allgemeine Abgrenzungen bezüglich der Logistik, der Speditionen und KEP-Dienste, der Transportsysteme, der Transportmittel, des Transportgutes oder des logistisches Netzes gemacht. Anschließend werden im Abschnitt 2.2 die KEP-Dienste als Logistikdienstleistung vor allem hinsichtlich der geschichtlichen Entwicklung genauer betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt im Abschnitt 2.3 eine ausführliche Beschreibung der Planungsprobleme im Rahmen einer Transportdurchführung für KEP-Dienste. Da es sich bei den hier zu betrachtenden KEP-Dienstleistern um europaweit tätige Anbieter handelt, wird im Abschnitt 2.4 die Internationalisierung der KEP-Dienste in Europa und deren Auswirkung auf die Linienverkehrsplanung diskutiert.

2.1. Allgemeine Abgrenzungen

2.1.1. Logistik

Ursprünglich kommt der Begriff *Logistik* aus dem militärischen Bereich, wo Logistik als Sammelbezeichnung für die Versorgungsaufgaben steht, die zur Unterstützung des Militärs dienen. In den 1950er Jahren begann die Entwicklung der Logistik als eigenständige betriebswirtschaftliche Disziplin. Eine genaue Ableitung des Begriffs Logistik und dessen geschichtliche Entwicklung findet sich in Ihde (2001, S. 13ff).

Heute lassen sich in Veröffentlichungen aus dem wissenschaftlichen oder unternehmerischen Bereich oder in nationalen oder internationalen Normen[1] unterschiedliche Definitionen der Logistik finden. Eine ausführliche Begriffsdiskussion ist in Pfohl (2004b, S. 12ff) nachlesbar. Für diese Arbeit ist eine flussorientierte Definition der Logistik zweckmäßig. Hierbei steht der Güterfluss im Mittelpunkt logistischer Betrachtungen:

Die Logistik umfasst sowohl „Tätigkeiten der Planung und Steuerung als auch die Realisierung von Güterflüssen. Mit anderen Worten kann man sagen, dass die Funktion der

[1] Beispiele: die DIN 69906 „Logistik. Grundbegriffe“ oder der europäische Normentwurf CEN 273001 „Logistik. Struktur, Basisbegriffe und Definitionen der Logistik“.

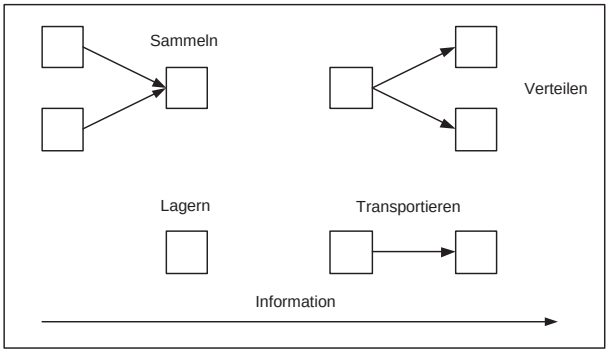

Abbildung 2.1.: TUIL-Prozesse als logistische Grundfunktionen (in Anlehnung an Vahrenkamp & Siepermann (2005, S. 8))

Logistik sowohl im Management als auch in der Durchführung von effizienten unternehmensübergreifenden Güterflüssen und den damit zusammenhängenden Informationsflüssen zur anforderungsgerechten Versorgung von Kunden besteht. Der Fluss der Güter und Informationen erstreckt sich im Idealfall auf die gesamte Versorgungskette und beginnt mit der Güterentstehung und endet mit dem Verbrauch durch den Endkunden.“ (Pfohl, 2004a, S. 4f)

Die Gesamtfunktion der Logistik kann auf unterschiedliche Art und Weise in Grundfunktionen gegliedert werden. Eine Möglichkeit ist die von Klaus & Krieger (2000, S. 483), wo allgemein die Logistik mit den Funktionen des Transportierens, Umschlagens und Lagerns (*TUL-Prozesse*) dargestellt wird. Mit diesen Funktionen werden Transportleistungen bzw. Veränderungen von Objekten im (geographischen) Raum, Umschlagleistungen mit Veränderung der Ordnungen und Anordnungen von Objekten, z.B. in der Kommissionierung und Verpackungslogistik, und Lagerleistungen zum Überbrücken von Zeitdifferenzen angeboten. Als Erweiterung der TUL-Prozesse können die Grundfunktionen der Logistik nach Vahrenkamp & Siepermann (2005, S. 7f) als Überbrückung von Differenzen im Güter- und Informationsstrom verstanden und als Transport-, Umschlag-, Informations[2]- und Lagerlogistik spezifiziert werden (*TUIL-Prozesse*, siehe Abbildung 2.1).

Hierbei sind als Aufgaben im Netz die Lagerung, der Transport, die Sammlung, die Verteilung von Gütern und die Verwendung von fortgeschrittenen Informationssystemen zu unterscheiden. Die Lagerung von Gütern ermöglicht, Zeitdifferenzen zu überbrücken, wenn z.B. die Produktion oder Anlieferung zeitlich vor der Verwendung liegen. Der Transport dient zur Überwindung von Raumdifferenzen. Um zum einen im Vergleich zu Einzeltransporten Transportkosten zur Befriedigung der Güternachfrage zu senken und zum anderen um gemeinschaftliches wirtschaftliches Nutzen von Transportressourcen zu ermöglichen, werden einzelne Güter von mehreren Quellen in einem Sammeltransport

[2]Der Begriff Informationslogistik als Grundfunktion der Logistik ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff Informationslogistik aus der Wirtschaftsinformatik, wo es um die Steuerung von Informationsflüssen in einem Informations- und Kommunikationssystem geht (Fink et al., 2005, S. 5 oder S. 73).

zusammengeführt. Das gemeinsame Nutzen bewirkt gegenüber der Einzelnutzung positive Skaleneffekte. Bei der Verteilung von Gütern sollen durch einen Sammeltransport von einer Quelle (Versender) zu mehreren Senken (Empfänger) gegenüber einem Direkttransport Transportkosten verringert werden. Informationssysteme dienen zur Gewinnung eines Informationsnutzens in der Logistikkette. Einerseits wird dieser Nutzen durch die dem Güterfluss vorausgehenden und diesen begleitenden Informationen generiert. Dies kann die Übernahme der eintreffenden Güter vereinfachen. Andererseits begünstigen die nachkommenden und dem Güterfluss entgegenlaufenden Informationen die Abrechnung der Leistungen.

Daraus kann abgeleitet werden, dass sich die logistischen Grundfunktionen als Dienstleistungen auffassen lassen, da Aufträge/Güter bewegt und verwaltet, nicht aber produktionswirtschaftlich umgeformt werden. Genauer gesagt liegt der Unterschied zwischen der Dienst- und Sachleistung in deren Verwertbarkeit. Hierbei können materielle Güter in der Regel produziert werden, ohne dass sie unmittelbar im Anschluss durch den Verbraucher konsumiert werden müssen. Das hergestellte Gut kann bis zum Verbrauch zwischengelagert werden. Dahingegen kann das Produzieren einer Dienstleistung nicht unabhängig vom Kunden erfolgen. Eine realisierte Dienstleistung wird sofort verbraucht, hierbei hat der Kunde die Aufsicht über die durchgeführte Veränderung (Lehmann, 1989, S. 77).

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, dass in den letzten Jahren die Logistik eine schnelle Entwicklung genommen hat. Aus Sicht der Betriebswirtschaft hat sie sich weg von der Hilfsfunktion in der Materialwirtschaft hin zu einem eigenständigen Produktionsfaktor entwickelt. Dazu können folgende Gründe aufgeführt werden (Vahrenkamp & Siepermann, 2005, S. 3):

- in Relation zu den Massengütern ist der Anteil an hochwertigen Transportgütern gestiegen;
- der Übergang von der Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft führte zu einem vermehrten Transportbedarf an Kleinsendungen;
- aufgrund von zuverlässigen und preisgünstigen Transporten wurde die Arbeitsteilung zwischen verschiedenen Stufen der Produktion begünstigt;
- durch die steigende Massenindividualisierung von Leistungen im Hinblick auf Kundenwünsche[3] und der damit immer komplexeren Produktionsvorgänge hat die klassische Massenproduktion von Konsumgütern an Bedeutung verloren.

[3]Bei der Massenindividualisierung von Leistungen im Hinblick auf Kundenwünsche sind eine derart große Mannigfaltigkeit von preiswerten und in der Ausgestaltung (Aussehen und Funktion) variierenden Gütern anzubieten, dass sich für nahezu jeden Kunden die aktuellen Wünsche realisieren lassen.

2.1.2. Speditionen und KEP-Dienste

Nach §453(1) des HGB „sind *Speditionen* als Unternehmen definiert, die sich durch den Abschluss von Speditionsverträgen verpflichten, Güterversendungen zu besorgen“. Die Auswahl der Transportmittel und der ausführenden Unternehmen sowie die Sicherstellung der Schadenersatzansprüche des Versenders sind die wichtigsten Aufgaben einer Spedition. Darunter zählt auch der Abschluss von erforderlichen Verträgen mit anderen Dienstleistern wie z.B. Frachtführern, Verpackern oder Lagereien, die im eigenen Namen oder im Namen des Versenders abgeschlossen werden. Weitere Aufgaben einer Spedition können die Ausführung sonstiger auf die Beförderung bezogener Leistungen sein. Nach dem HGB zählen darunter z.B. die Versicherung und Verpackung des Gutes, die Kennzeichnung sowie die Zollabwicklung. Pfohl (2004b, S. 299) weist darauf hin, dass heute Speditionen umfangreichere Dienstleistungen anbieten. Angebote von Speditionen beinhalten auch Leistungen wie die Lagerung und Kommissionierung von Gütern oder die Konfiguration von Endprodukten oder Montagetätigkeiten beim Empfänger der Ware. Sie erwerben nationale und internationale logistische Dienstleistungen und dazugehörige Nebenleistungen. Diese werden im notwendigen Umfang durch eigene Leistungen erweitert und anschließend als Gesamtleistung an Auftraggeber verkauft.

Speditionen spezialisieren sich häufig auf festgelegte Transportmittel wie Kraftwagen-, Bahn-, Schifffahrts- und Luftfrachtspeditionen, auf festgelegte Gütergruppen wie Möbel-, Kleider- oder Schwergutspeditionen, auf festgelegte Transportrelationen oder auf Inlands-, Grenz- oder internationale Transporte oder auf einzelne Funktionsbereiche wie z.B. Versand-, Empfangs-, Platz-, Abfertigungs- oder Umschlagspeditionen (Pfohl, 2004b, S. 300).

Die Auswahl von geeigneten Marktbereichen, auf die die einzelnen Speditionen ihre Dienstleistungen ausrichten, bekommt eine immer größere Bedeutung (Bock, 2004, S. 43). Durch Spezialisierungen auf bestimmte logistische Aufgaben versprechen sich die Unternehmen größere Erträge. Begründet werden kann dies mit der erforderlich werdenden besseren Abstimmung zwischen Auftraggeber (Verlader) und Spedition und der verbesserten Kundenbindung. Weiterhin ermöglicht die Konzentration auf bestimmte Marktbereiche und Funktionen, spezielle Systemstrukturen zu erstellen, die eine kostengünstigere und effizientere Abwicklung der nachgefragten Dienstleistungen zulassen (Wlček, 1998, S. 23f). Hierbei sind klar erkennbare Spezialisierungstendenzen im Bereich des Stück- und Kleingutmarktes zu nennen. Unter Stückgut versteht man ein Gut mit fester Konsistenz, das stückweise transportiert werden kann. Diese Güter lasten die Fahrzeugkapazität nicht vollständig aus und werden im gebrochenen Verkehr transportiert. Dazu werden die beim Versender gesammelten Stückgüter für dieselben Zielgebiete im Streckenverkehr gebündelt und in den Zielgebieten an die Empfänger verteilt. Daher wird das Stückgut auch als Sammelgut[4] bezeichnet. Das Kleingut wird durch Gewicht und Größe vom

[4]Die Begriffe Sammelgut und Stückgut werden in dieser Arbeit synonym benutzt.

Stückgut abgegrenzt (siehe Abschnitt 2.1.5). Die vorherrschende Marktstellung der in diesem Bereich als Generalisten tätigen Speditionen ist zunehmend durch das Erscheinen von spezialisierten KEP-Diensten gefährdet (Wolf, 2001, S. 31ff). Die größten Effizienzvorteile gegenüber undifferenzierten Sammelgutsystemen erreichen die KEP-Dienste aus der Verwendung hochspezialisierter Transportnetze. Diese Netze sind auf die jeweils zu befördernden homogenen Güter eingestellt und besitzen äußerst ergiebige automatisierte Umschlagsysteme (Kleeberg, 2000, S. 50). Hierbei erfolgt in diesen Verkehrsnetzen in der Regel als erstes eine Fokussierung in hochspezialisierten Sortierzentren, die eine geringe Umschlagdauer vorweisen. Anschließend findet die Auslieferung mit dem schnellsten Transportmittel (z.B. LKW oder Flugzeug) statt. Aufgrund der leistungsfähigen Systemstruktur können die KEP-Dienste neben den erwähnten Effizienzvorteilen auch eine hohe Lieferqualität erzielen. Dies kommt den gestiegenen Anforderungen der Kunden entgegen (Wolf, 2001, S. 33).

Allgemein lassen sich die KEP-Dienste als eigenständiger Bereich im Transportmarkt von speditionellen Angeboten durch ein breiteres Serviceangebot unterscheiden, wobei die zu transportierenden Güter vor allem in ihren Gewichten begrenzt sind. Jedoch sind die Grenzen der KEP-Dienste zu Speditionen fließend (Schieck, 2008, S. 60). Eine genaue Beschreibung des Wesens der KEP-Dienste erfolgt im Abschnitt 2.2.

2.1.3. Transportsysteme

Für eine Transportaufgabe sind *Transportsysteme* „so zu gestalten, zu dimensionieren, zu organisieren und zu disponieren, dass ein bestimmter Beförderungsbedarf unter Berücksichtigung der räumlichen, zeitlichen und technischen Rahmenbedingungen kostenoptimal erbracht wird“ (Gudehus, 2005, S. 807). Um die jeweils gegebene Transportaufgabe abarbeiten zu können, muss dazu bezüglich der einzusetzenden Transportmittel und Transportprozesse die Transportplanung eine Vielzahl von Entscheidungsproblemen lösen. Bei der Frage nach dem günstigsten Transportmittel geht es um die Instrumente zur Beförderung der einzelnen Transportgüter. Nach Pfohl (2004b, S. 163) sind mit Bestimmung des günstigsten Transportprozesses „ablauforganisatorische Entscheidungen“ gemeint, die von

- den zu befördernden Gütern,
- den Anforderungen der auszuführenden Transportaufträge,
- der Struktur, Dimension und Beschaffenheit des betrachteten Liefergebietes und
- den geographischen Positionen der darin liegenden Abhol- und Zulieferorte abhängen.

Weiterhin haben gesetzliche Vorschriften und zeitliche, finanzielle und technische Einschränkungen bezüglich der einsetzbaren Transportmittel und der verwendbaren Ver-

kehrsnetze Einfluss auf die zutreffenden Entscheidungen.

Zwei zentrale Begriffe für diese Arbeit sind *Transport* und *Transportprozess*. Als Abgrenzung beider Begriffe wird folgende Definition von Pfohl (2004b, S. 162) herangezogen:

„Unter Transport versteht man die Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern mit Hilfe von Transportmitteln. Jedes Transportsystem besteht aus dem Transportgut, dem Transportmittel und dem Transportprozess. Soll ein Transportgut vom Lieferpunkt A zum Empfangspunkt B transportiert werden und ist am Lieferpunkt A nicht das gewünschte Transportmittel vorhanden, so kann ein Transportprozess notwendig werden, den man als Leertransport bezeichnet."

Daher ist die zentrale Aufgabe des Transportes die Übertragung verschiedener Mengen von Gütern zwischen unterschiedlichen Orten. Dabei geht der Arbeitsumfang des Transportes über die reine Beförderungsfunktion hinaus. So können sämtliche Umschlagleistungen zum Hauptaufgabenbereich eines Transportes hinzugezählt werden. Als sekundäre Transportfunktion wird die Wahrnehmung bestimmter Haftungsaufgaben genannt (Pfohl, 2004b, S. 162). Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die Beförderungsfunktion und die damit in der Regel verbundene Umschlagfunktion betrachtet.

Pfohl (2004b, S. 162) unterscheidet bei Transportprozessen *innerbetriebliche* und *außerbetriebliche* Transporte. Dabei sind mit innerbetrieblichen Transporten die Beförderung von Gütern zwischen Orten innerhalb eines Werkes oder Lagerhauses gemeint. Außerbetriebliche Transporte stehen für die Beförderung von Gütern zwischen Lieferanten und Kunden oder zwischen verschiedenen Werken und/oder Lagerstätten eines Unternehmens. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur noch außerbetriebliche Beförderungsdienstleistungen betrachtet werden, nehmen alle weiteren Erläuterungen ausschließlich Bezug auf den außerbetrieblichen Transport.

Weitere Unterscheidungsmerkmale für Transportprozesse können räumliche und zeitliche Eigenschaften sein (Wlček, 1998, S. 10). Der *räumliche* Umfang kann als flächendeckend oder relationsbezogen klassifiziert werden. Die *flächendeckenden* Transporte erstrecken sich zwischen Versendern und Empfängern innerhalb eines eng „abgegrenzten" Gebiets; es können Transporte von jedem beliebigen Versender zu jedem Empfänger abgedeckt werden. Dies kann bei regionaler, nationaler, kontinentaler oder interkontinentaler Ausdehnung der Gebiete gelten. Für die regionale Ausdehnung kann für flächendeckende Transporte auch der Begriff *regionenbezogener* Transport verwendet werden. *Relationsbezogene* Transporte verlaufen von einem bestimmten Versand- in ein Empfangsgebiet (Fernverkehr). Diese Beziehung zwischen einem Versand- und Empfangsgebiet wird in dieser Arbeit als Relation bezeichnet, die über mehrere Stufen (Versanddepot, Hub und Empfangsdepot[5]) verlaufen kann.

[5]Für weitere Informationen zu diesen Begriffen siehe Abschnitt 2.3.2.

Zeitliche Eigenschaften können hinsichtlich von Regel- oder Garantielaufzeiten, Transportfrequenzen oder Terminverkehren gegeben sein. *Regellaufzeiten* sind auf Erfahrungswerten basierende Aussagen über die Laufzeit des Transportprozesses. Hierbei sind bei Überschreitung der Laufzeit im Gegensatz zur Garantielaufzeit keine rechtlichen Schritte möglich. Bei der *Garantielaufzeit* ist für die Laufzeit eine vertraglich fixierte Obergrenze vereinbart. *Transportfrequenzen* zeigen die Häufigkeit der Transporte zwischen Standorten im Netz an. Dabei sind nationale Netze weitgehend im 24-Stunden-Rhythmus getaktet, d.h., die Transporte werden in regelmäßigen, sich periodisch wiederholenden Abständen (hier im 24-Stunden-Rhythmus) durchgeführt. Internationale oder interkontinentale Netze haben etwas größere Intervalle. *Terminverkehre* zeichnen sich durch Vorgabe von Abhol- und Zulieferzeiten für die Sendungen aus. Hierbei gibt es für die Laufzeit im Allgemeinen keine Restriktionen.

Eine weitere wichtige Bezeichnung für diese Arbeit sind die *Linienverkehre*. Hierbei ist eine Linie im Verkehrswesen die regelmäßige Bedienung (täglich oder an bestimmten Betriebstagen, in der Regel mehrmals an einem Tag) eines bestimmten Transportweges durch ein Transportmittel. Es wird auch von Linien-, Fahr- oder Taktfahrplänen gesprochen, die ohne Berücksichtigung der Auslastung durchgeführt werden und hohe Fixkosten verursachen können[6]. Die Anzahl der Abfahrten in einem bestimmten Zeitraum ist die Taktfrequenz. *Gelegenheits-* bzw. *Bedarfsverkehre* als Gegenstück zu den Linienverkehren sind in Abhängigkeit verbindlicher Abmachungen zwischen den teilnehmenden Parteien durch Quellen (Versender), Senken (Empfänger) und zeitlichen Ablauf charakterisiert. Sie werden vor allem dann genutzt, wenn Linienverkehre für die zu transportierenden Güter nicht oder nicht rechtzeitig vorhanden sind oder wenn die Güter das Transportmittel hinsichtlich des Volumens oder Gewichts vollständig auslasten. Diese Verkehre haben im Vergleich zum Linienverkehr einen großen Anteil variabler Kosten.

[6]Die Begriffe Linien-, Fahr- und Taktfahrpläne werden in dieser Arbeit synonym benutzt.

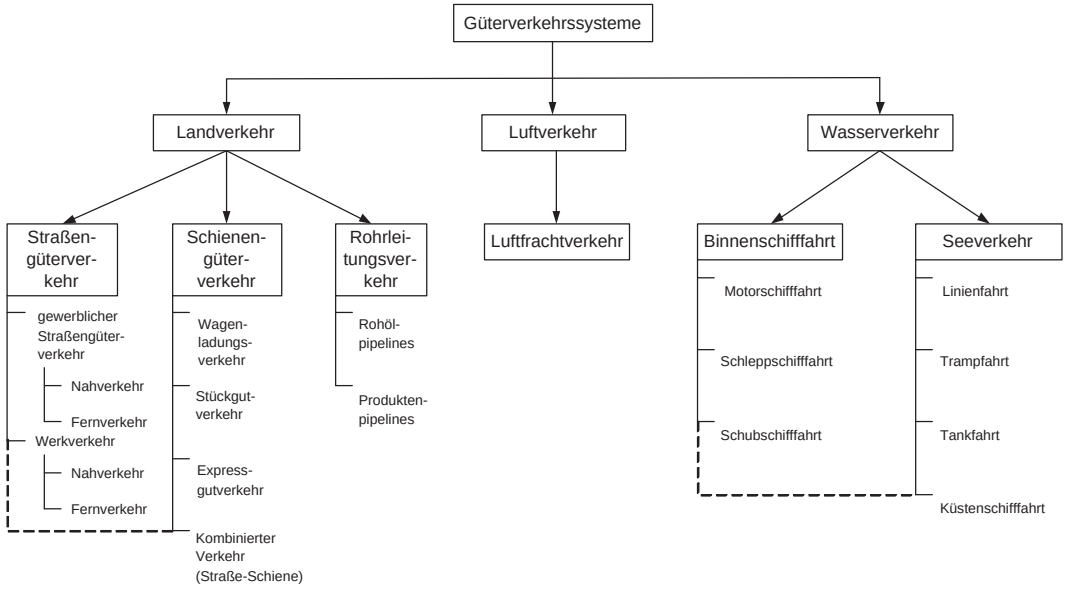

Abbildung 2.2.: Ausprägungsformen des Güterverkehrs (in Anlehnung an Bock (2004, S. 15))

2.1.4. Transportmittel

Da in dieser Arbeit KEP-Dienste betrachtet werden sollen, eignen sich zur Beförderung von Gütern in der Regel *Transportmittel* wie LKWs, Schienenfahrzeuge oder Flugzeuge. Transportmittel zur Übermittlung von Informationen/Nachrichten oder zum Transport von Personen spielen hier keine Rolle. Für die Durchführung der Transportleistung erfolgt die Bewegung der Transportmittel auf verschiedenen Verkehrsträgern wie Straße, Schiene, Wasser oder Luft (Gudehus, 2005, S. 841). Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die Ausprägungsformen des Güterverkehrs. In Abhängigkeit der gewählten Verkehrsträger wird zunächst zwischen dem Land-, Luft- und Wasserverkehr differenziert. Darauf aufbauend erfolgt eine feinere Gliederung nach verschiedenen auf die Verkehrsträger bezogenen Kriterien.

Zwecks der Entscheidung, welche Transportmittel für das in dieser Arbeit zu definierende Problemmodell der Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste verwendet werden sollen, werden im Folgenden in Anlehnung an Pfohl (2004b, S. 167) Vor- und Nachteile ausgewählter Transportmittel wiedergegeben.

See- und Binnenschiff

- *Vorteile:* meistens geringere Transportkosten (vor allem bei Transport großer gleichförmiger Gütermengen über weite Entfernungen); niedrige Umweltbelastung.
- *Nachteile:* häufig längere Anschlusstransporte ins Hinterland; häufig Transportmittelwechsel notwendig; eingeschränktes Wasserstraßennetz bei der Binnenschifffahrt

(auch wegen Wasserstand oder Eisbildung).

Eisenbahn

- *Vorteile:* hohe durchschnittliche Transportgeschwindigkeit und Zuverlässigkeit beim Fernverkehrstransport; niedrige Umweltbelastung.
- *Nachteile:* hohe Wirtschaftlichkeitsschwelle (erst ab ca. 30 LKW-Einheiten und Entfernungen von über 300 km), kleinere Dichte des Schienennetzes gegenüber dem Straßennetz; häufiger Transportwechsel; lange Transportzeiten im Nahverkehr wegen eines großen Anteils von Stillstandszeiten.

Lastkraftwagen

- *Vorteile:* wirtschaftlich im Nahverkehr; dichtes Verkehrsnetz; geringe Transportkosten.
- *Nachteile:* Gewichts- und Volumenbeschränkungen; bei großen Entfernungen höhere Transportkosten als beim Schienenverkehr möglich; hohe Umweltbelastung.

Flugzeug

- *Vorteile:* hohe Liefergeschwindigkeit bei großen Entfernungen; hohe Transportsicherheit; Beitrag zur Erhöhung des Lieferserviceniveaus.
- *Nachteile:* bei kürzeren Entfernungen Verlust des Geschwindigkeitsvorteils; hohe Kosten des einzelnen Transportes; hohe Umweltbelastung.

Bei Analyse von Vor- und Nachteilen der einzelnen Transportmittel zeigt sich in Bezug auf Europa die Beförderung von Gütern auf der Straße als eine günstige Variante. Die Gründe dafür liegen vor allem in den geringen Transportkosten und der sehr hohen Dichte des verwendeten Verkehrsnetzes. Bestätigt wird dies durch die Studie „Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs bis 2050“ (o.V., 2007a). Daraus ist zu entnehmen, dass bezüglich Deutschland heute der Marktanteil des Verkehrsträgers Straße etwa 70% beträgt und sich bis zum Jahr 2050 eventuell kaum ändern wird (ca. 72% im Jahr 2050). Vom zunehmenden Verkehrsaufkommen würde am meisten der Schienenverkehr profitieren, deren Anteil dann bei etwa 19% liegen werde. Der Anteil der Binnenschifffahrt werde voraussichtlich von heute ca. 11% bis 2050 auf etwa 8% zurückgehen. Die deutliche Dominanz des Straßenverkehrs begründet sich auch in der besonders positiven Bewertung des LKW-basierten Straßenverkehrs von Auftraggebern logistischer Dienstleistungen (Pfohl, 2004b, S. 169).

Bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Straßengüterverkehrs[7] in Europa wird insbesondere bei den grenzüberschreitenden Transporten von einem weiteren Wachstum

[7]In der Logistik wird von Straßengüterverkehr gesprochen, wenn Kraftfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht (einschließlich Anhänger) von mehr als 3,5 Tonnen Güter auf der Straße transportieren (Isermann, 2004, S. D2-8).

ausgegangen. Hierbei dürfte das Wachstum der Linienverkehre über dem der Gelegenheitsverkehre liegen (Ihde, 2001, S. 171).

Auf Erdteilen wie Asien oder Nordamerika können wegen ihrer geographischen Größe und der vorliegenden Infrastruktur bezüglich der Transportmittel andere Verteilungen vorliegen. So entfielen 2002 in der Volksrepublik China auf die Binnenschifffahrt etwa 55% der Verkehrsleistung, gefolgt vom Verkehrsträger Schiene mit ca. 31%. Auf der Straße wurden rund 13% und im Luftfrachtverkehr etwa 1% transportiert (Flender et al., 2006, S. 42).

Durch staatliche Regulierung wird versucht, die Entwicklung der einzelnen Verkehrsträger zu beeinflussen. Beispielsweise wird versucht, die ökologisch negativen Auswirkungen des Verkehrs zu mindern (Haas & Neumair, 2005, S. 161). Mögliche Maßnahmen des Staates sind z.B. der Erlass rechtlicher Normen für die zulässigen Schadstoffemissionen oder die Schaffung von Anreizen zum Wechsel von Transporten auf Verkehrsträger mit besseren ökologischen Merkmalen (Eisenkopf, 2004, S. D4-13f).

2.1.5. Transportgut

Das Transportgut kann entweder ein Massengut, Stückgut oder eine aus Massengut und Stückgut zusammengefasste und vereinheitlichte „diskrete Ladeeinheit“ sein (Gudehus, 2005, S. 807). Hierbei sind Massengüter Verbrauchs- oder Gebrauchsgüter, für die seitens eines großen Verbraucherkreises eine große Nachfrage besteht und die über einen längeren Zeitraum produziert werden. Beispielhaft nach Wirtschaftsbranchen unterteilt gibt es folgende Massengüter:

- Bergbau: Kohle, Erz, Stahl (Montangüter),
- Chemie: Mineralölprodukte,
- Bauwirtschaft: Erde, Steine, sonstige Baustoffe,
- Landwirtschaft: Agrarprodukte und
- Entsorgungswirtschaft: Entsorgungs- und Recyclinggüter.

Hierbei werden die zu transportierenden Einheiten nicht wie beim Stückgut nach Stückzahl, sondern nach Volumen und Gewicht festgelegt (Gast & Pintsch, 2000, S. 169).

Beim Stückgut handelt es sich um verpacktes oder unverpacktes Gut, das ein Gewicht von bis zu 3 Tonnen haben kann. Bei Transport-, Umschlag- und Lagerungsvorgängen können diese Güter als Handhabungseinheit behandelt werden. Die Transportmittel werden von einer Stückgutsendung nicht vollständig ausgelastet und werden deshalb meistens im gebrochenen Verkehr (siehe Abschnitt 2.1.8) transportiert (Klaus & Krieger, 2000, S. 445).

Als Transportvarianten für die Güter werden die *Komplettladungs-* und *Stückgutverkehre* unterschieden. Unter Komplettladungsverkehr wird verstanden, dass eine Ladungsgröße die Fahrzeugkapazität nahezu vollständig belegt, also Beiladung in der Regel nicht möglich ist. Daher findet beim Komplettladungsverkehr im Allgemeinen kein Umschlag der Ladung statt. Beim Stückgutverkehr werden mehrere Teilladungen auf einem Fahrzeug gebündelt (Buchholz et al., 1998, S. 51). Für die Entscheidung, welche Verkehre eingesetzt werden, sind Eigenschaften wie Transportentfernungen, Maße der Ladung (Größe, Gewicht, Volumen), Terminvorgaben, Häufigkeit der Beförderung, Qualitätsanforderungen und erforderliche Zusatzleistungen wichtige Parameter (Arnold, 2004, S. C3-5). In Bezug auf den Transport der Sendungen heißen diese Merkmale *Sendungseigenschaften* (Wlček, 1998, S. 9). Hierbei ist eine *Sendung* eine bestimmte Menge von Gütern, die innerhalb einer vorgegebenen Zeit vom Versender zum Empfänger befördert werden muss (Gudehus, 2005, S. 920).

Hinsichtlich der Größe der Sendungen gibt es bei den Stückgütern im weiteren Sinne eine genauere Einteilung: Kleingut und Stückgut im engeren Sinne (Wlček, 1998, S. 9). In den Bereich des Kleingutes gehören insbesondere Briefe, Dokumente, Päckchen und Pakete. Diese werden durch Gewicht und Größe vom Stückgut abgegrenzt. Stückgutsendungen sind weniger stark normiert und sind daher wesentlich inhomogener. Die dazugehörigen Verkehre bezeichnen wir als *KEP-Verkehre* und *Stückgutverkehre*. In dieser Arbeit geht es um das Kleingut und die KEP-Verkehre.

2.1.6. Logistisches Netz

In einem *Transportnetz der Logistik* werden die Logistikdienstleistungen durchgeführt. Diese Netze werden in der Literatur auch als Servicenetze oder Dienstleisternetze bezeichnet (Wieberneit (2008b), S. 77ff, Bretzke (2008), S. 213ff). Unter einem solchen Netz werden die unbeweglichen Ressourcen verstanden, die in einem Graphen durch ihre geographische Anordnung definiert werden. Diese Ressourcen stehen einem betrachteten Unternehmen zur Ausführung der Transportaufträge zur Verfügung. Die im Graphen befindlichen Knoten stehen für Abhol-, Auslieferungs-, Lager- oder Umschlagpunkte des betrachteten Netzes. Die zwischen den Knoten befindlichen Kanten repräsentieren die Transportverbindungen im Netz. Mit Hilfe von unternehmenseigenen oder -fremden Transportmitteln wird dieses Netz genutzt. Die Aufgabe der Transportmittel ist die Beförderung von auszuführenden Transportaufträgen entlang festzulegender Transportwege innerhalb des Netzes (weiteres dazu im Abschnitt 2.3.2).

Aus Sicht von Bretzke (2008, S. 65ff) besitzen zweckmäßig gestaltete logistische Netze eine Reihe von Vorteilen. So können mit Hilfe von Netzen die zu transportierenden Güter in Vor-, Haupt- und Nachläufen (siehe Abschnitt 2.1.8) gebündelt werden. Dadurch können die Ressourcen des Netzes besser genutzt und Größendegressionseffekte (z.B. Senkung der Transportkosten je Sendung) bei den logistischen Kosten erzielt werden. Weiterhin erlauben die Netze eine häufigere Bedienung der Transportrelationen und

eine Senkung der Kosten und Durchlaufzeiten bei den logistischen Tätigkeiten. Das Letztere ist durch den Zusammenschluss sich immer wiederholender logistischer Tätigkeiten in den Knoten und Kanten der Netze erreichbar, indem z.B. spezialisierte, kapazitätsgerechte Transport-, Umschlag- und Lagermittel angeschafft werden. Als Beispiel sind die automatischen Umschlaganlagen in den Umschlagpunkten von KEP-Diensten zu nennen.

Schließlich können sich mit Hilfe von gut funktionierenden Netzen die in ihnen ablaufenden Prozesse stabilisieren. Dadurch ist eine höhere Systemzuverlässigkeit erreichbar. Somit können z.B. die KEP-Dienste die Einhaltung vorgegebener Servicegrade garantieren. Dabei ist mit *Servicegrad* oder Logistikqualität die Wahrscheinlichkeit gemeint, dass ein Kunde die bestellte Ware termingerecht und vollständig erhält (Gudehus, 2005, S. 78).

Die möglichen Nachteile von Logistiknetzen wie Umwege und dadurch verursachte größere einzelne Transportkosten und Durchlaufzeiten sind von untergeordneter Bedeutung sofern Netze sachgerecht gestaltet sind und damit die logistischen Ziele bei insgesamt günstigeren Kosten erreicht werden können (Bretzke, 1997, S. 626).

2.1.7. Umschlaganlage

Da bei der in dieser Arbeit betrachteten Problemstellung auch Standorteigenschaften wie Einrollverteilung[8], Umschlagkapazität oder Anzahl Eingangstore eines Depots/Hubs[9] Berücksichtigung finden, sollen kurz die wesentlichen Merkmale einer Umschlaganlage in Netzen für KEP-Dienste beschrieben werden. Diese Anlagen bilden in Netzen die Verbindung zwischen der außerbetrieblichen Funktion „Transport auf der Straße“ (Nah- und Fernverkehr) und der innerbetrieblichen Funktion „Umschlag der Sendungen zwischen den Fahrzeugen“ (Clausen et al. (2004), S. 158, Chmielewski (2007), S. 12). Neben den Verkehrsträgern sind sie für das Leistungsvermögen und die Leistungsgrenzen des Netzes entscheidend (Schieck, 2008, S. 425).

Die Umschlaghalle ist das wichtigste Bauwerk einer *Umschlaganlage*. Dieses Gebäude hat eine bestimmte Größe und Form und befindet sich auf dem Gelände eines Standortes (Depot/Hub). An dessen Außenwänden ist eine festgelegte Anzahl von Toren angeordnet. Hierbei wird zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Multifunktionstoren unterschieden. An den *Ein-* bzw. *Ausgangstoren* werden die Fahrzeuge aus den Nah- und Fernverkehrstouren entladen bzw. für die Nah- und Fernverkehrstouren beladen. Die *Multifunktionstore* stehen für beide logistische Funktionen (Be-, Entladung) zur Verfügung.

Der Umschlag findet im Wesentlichen höhengleich zwischen der Verladerampe der Um-

[8] Für eine genaue Beschreibung siehe Abschnitt 2.3.4.

[9] Für eine genauere Erläuterung der Begriffe Depot und Hub siehe Abschnitt 2.3.2.

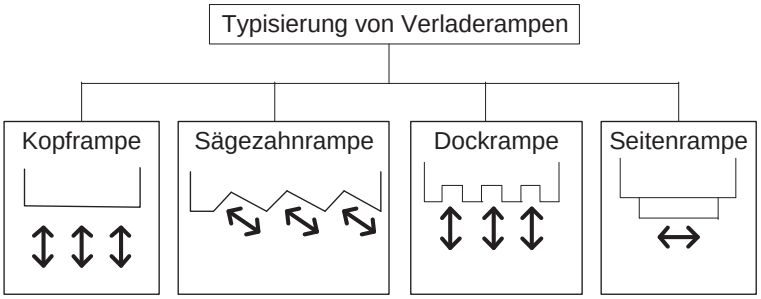

Abbildung 2.3.: Typisierung der Rampenformen für die Verladung (in Anlehnung an Worbs et al. (2004, S. B3-52))

schlaghalle und der Ladefläche von LKWs/Wechselaufbauten statt (horizontaler Umschlag). Bei Typisierung von Verladerampen wird zwischen Kopf-, Sägezahn-, Dock- und Seitenrampe unterschieden (Worbs et al., 2004, S. B3-52) (vgl. Abbildung 2.3), wobei bei KEP-Diensten überwiegend Sägezahn- oder Dockrampen zur Anwendung kommen. Das Andocken der LKWs/Wechselaufbauten erfolgt entsprechend der gewählten Ausführungsvariante über das Heck oder die Seite des Transportmittels.

Nach dem Andocken an einem Eingangstor werden die Transportgüter entladen und zwischengelagert bzw. zu den Toren befördert, an denen die Beladung der Fahrzeuge für die Anschlussrelationen erfolgt. Aufgrund homogener Güter bei den KEP-Diensten werden in den Anlagen beim innerbetrieblichen Transport der Güter zwischen den Toren automatisch gesteuerte Sortiersysteme eingesetzt (anders als in den Anlagen der allgemeinen Stückgut-Branche). Bei Sortiersystemen wird über eine oder mehrere Zuführungen das zu ordnende Stückgut unsortiert dem System zugeführt. Anschließend wird es nach bestimmten Merkmalen (z.B. Ziel) sortiert und verlässt über eine oder mehrere Ausschleusstellen geordnet das System. In der KEP-Branche verwendete Sortieranlagen sind beispielsweise Kippschalensorter, Quergurtsorter oder Schuhsorter (für mehr Informationen über Sortiersysteme: Beumer (2004, S. C2-78ff)).

Umschlaganlagen können im Rahmen eines Verkehrstags als Versanddepot, Hub und Empfangsdepot[10] agieren. Daher ist die Auslastung einer Anlage im zeitlichen Verlauf in der Regel nicht ausgeglichen. Abbildung 2.4 zeigt beispielhaft die Auslastung eines Versand- und Empfangsdepots. Würde dieses Depot zusätzlich als Hub fungieren, dann wäre typischerweise die Auslastung des Standortes durch Fernverkehrs- und Umschlagaktivitäten um Mitternacht sehr groß.

[10]Für weitere Informationen zu diesen Begriffen siehe Abschnitt 2.3.2.

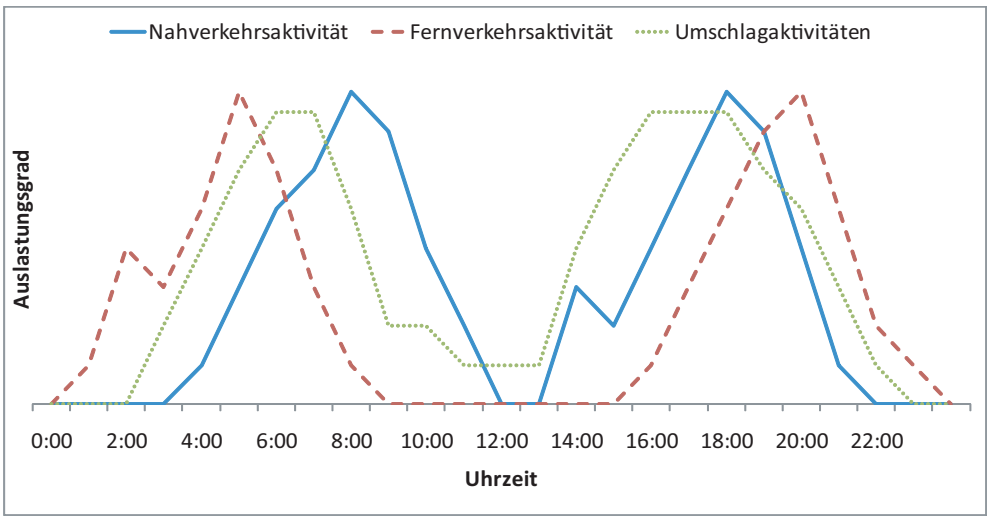

Abbildung 2.4.: Auslastung eines Depots im zeitlichen Verlauf

2.1.8. Transportketten

Für den Transport von Gütern von einer Quelle zu einem Ziel werden sogenannte *Transportketten* gebildet, die eine „Folge von technischen und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen“ darstellt (Klaus & Krieger, 2000, S. 479). Transportketten können eingliedrig und mehrgliedrig gebildet werden (siehe Abbildung 2.5). In einer *eingliedrigen Transportkette* erfolgt der Verkehr direkt (ungebrochen) vom Abhol- zum Zulieferort, ohne Wechsel des Transportmittels. In einer *mehrgliedrigen Transportkette* findet mindestens ein Wechsel des befördernden Transportmittels statt. Mehrgliedrige Transportketten setzen sich allgemein aus drei Teilen zusammen: Vorlauf, Hauptlauf, Nachlauf. Im *Vorlauf* werden die jeweiligen Güter an Sammelpunkten gebündelt. Da durch diesen Transport Güter in einem bestimmten Gebiet eingesammelt werden, kann dieser Gütertransport auch als *Flächenverkehr* bezeichnet werden. Im *Hauptlauf* findet der *Fern- oder Streckenverkehr* statt. In ihm wird die größte Entfernungsleistung erbracht, da Güter von einem Sammelpunkt nahe dem Abholort zu einem Verteilpunkt nahe dem Zulieferungsort gelangen. Im *Nachlauf* findet erneut in einem Flächenverkehr die Auslieferung der Güter vom Verteilpunkt zum Zulieferungsort statt. Im Hinblick auf die KEP-Dienste findet im Abschnitt 2.3.2 eine genauere Betrachtung der Transportkette statt.

Bei Umschlagoperationen wird zwischen mittelbarem und unmittelbarem Umschlag unterschieden. Beim *mittelbaren* Umschlag werden die Güter in den Ladeeinheiten, die sie zusammen mit ihrem Ladungsträger bilden, von einem Transportmittel auf ein anderes umgeschlagen. Dabei werden die Ladeeinheiten nicht in ihre Bestandteile aufgelöst. Beim *unmittelbaren* Umschlag werden z.B. in mehrgliedrigen Stückgutverkehren einzelne Güter aus den Laderäumen der Transportmittel entnommen und umgeschlagen (Schieck, 2008, S. 85). Bei KEP-Diensten kommt meistens der unmittelbare Umschlag

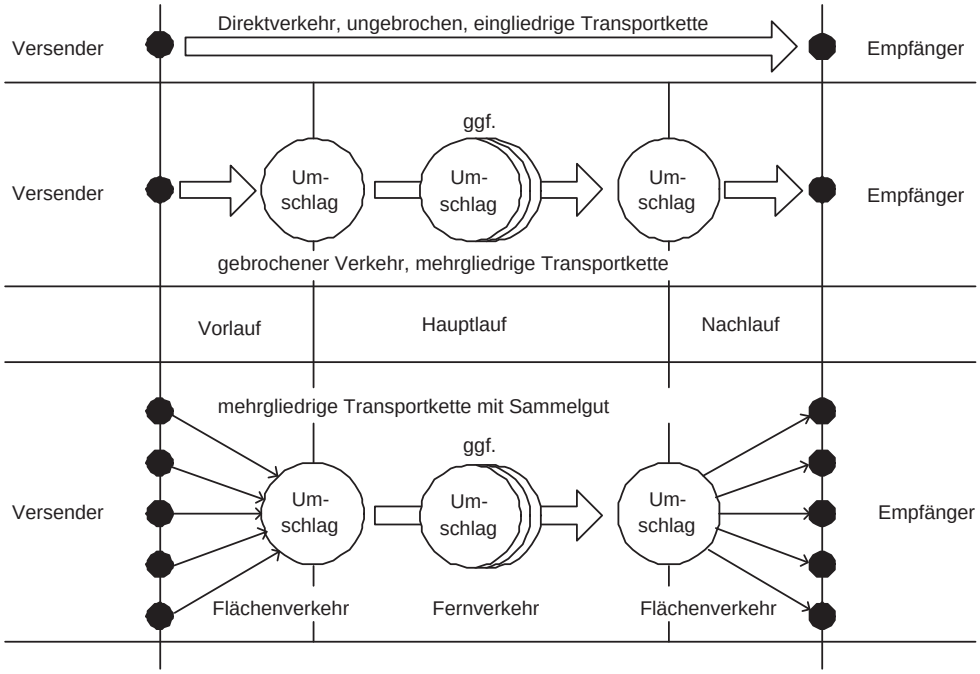

Abbildung 2.5.: Eingliedrige und mehrgliedrige Transportketten

zur Anwendung.

In einer mehrgliedrigen Transportkette sind Umschlagoperationen notwendig. Um die Transporte mit den zusätzlichen Umschlagoperationen effizient durchzuführen, müssen die Umschlagpunkte bezüglich ihrer Lage und Ausgestaltung angemessen konzipiert sein. Eine technische Infrastruktur, eine darauf abgestimmte Ablauforganisation und eine möglichst umfassende Verkehrsanbindung sind für eine schnelle Umladung der einzelnen Güter wichtige Erfolgsfaktoren.

2.2. KEP-Dienste

2.2.1. Logistikdienstleistung als Teilbereich der Logistik

Nach Abgrenzung des Begriffs Logistik im Abschnitt 2.1 können die logistischen Grundfunktionen als Dienstleistungen betrachtet werden. Der logistische Leistungserstellungsprozess stellt bei der Dienstleistung die Verbindung zwischen dem Abnehmer und dem Hersteller materieller Güter dar. Dies trifft für speditionelle Aktivitäten wie die der KEP-Dienste zu. Die dabei erbrachten Leistungen innerhalb eines *Logistiksystems* werden laut Helmke (2006, S. 12) als *Logistikdienstleistungen* bezeichnet. Hinsichtlich der Bedeutung des Servicegrades bei einer Dienstleistung hat sich ein Bewusstseinswandel

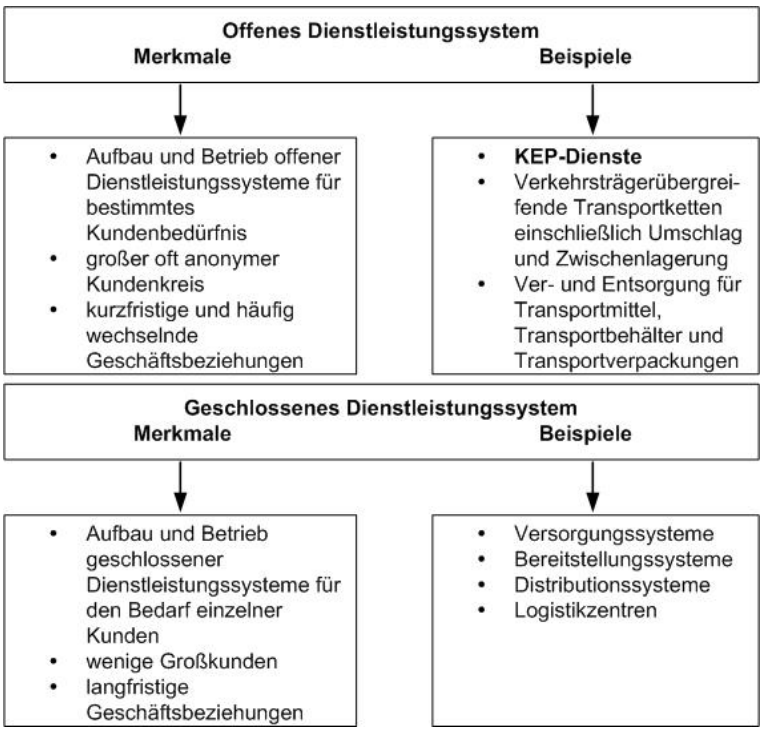

Abbildung 2.6.: Offenes und geschlossenes Dienstleistungssystem - Merkmale und Beispiele (in Anlehnung an Rumpf (1997, S. 82, S. 85))

in der Logistik vollzogen: Die Unternehmen nehmen zunehmend die Bedeutung der Logistikdienstleistung wahr. Diese setzen sie auch als einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Konkurrenten ein.

Wird eine Logistikdienstleistung nicht persönlich erstellt, sondern an jemanden als Auftrag erteilt, dann kann sie in *offenen und geschlossenen Dienstleistungssystemen* (siehe Abbildung 2.6) durchgeführt werden (Rumpf, 1997, S. 81f). Klassische Anbieter von offenen Dienstleistungssystemen sind KEP-Dienstleister wie auch Sammelladungsverkehre und verkehrsträgerübergreifende Transportketten mit Nebenleistungen. Sie sind jederzeit dazu in der Lage, logistische Leistungen für eine Großzahl von Verladern[11] durchzuführen. Die Anbieter betrachten dieses Produkt als ihr Kerngeschäft (Ihde, 2001, S. 43). Aufgrund höherer Flexibilität und des offenen Zugangs für alle Kunden können Anbieter von offenen Dienstleistungssystemen sowohl individuelle Kundenwünsche als auch den Transport besonders zeitkritischer Sendungen ermöglichen. Dass hinsichtlich Gewicht und Volumen in offenen Systemen geringe oder keine Beschränkungen gelten, sind weitere Vorteile (Blochmann, 1994, S. 21).

Bei den geschlossenen Dienstleistungssystemen kann es sich um die Übernahme eines gesamten logistischen Systems handeln, also die Steuerung und Durchführung aller logistischen Prozesse für den Kunden. Nach Auffassung von Blochmann (1994, S. 22) stehen

[11] Der Verlader übergibt als unmittelbarer Besitzer das Gut dem Beförderer zur Lieferung.

Systemaus-prägungen	**Modul-Systeme**	**Netz-Systeme**
Offene Systeme	Gebietsspediteur mit Umschlagterminal Ladungs-/ Teilladungsverkehre Fachspediteur, z.B. Flüssigkeits-, Kfz-Transporte	Sammelgutdienste, **KEP-Dienste** Textillogistik für hängende Ware Kühlgutdienste
Dedizierte Systeme	JIT-Lieferketten mit/ohne externes Beschaffungslager Gebietsspediteur mit Regionallager oder Regio-Warenhotel Übernahme spezialierter Werkverkehre	Transshipmentkonzept für Handelsketten Markenartikeldistribution mit externem Distributionslager oder Distributionszentren Textillogistik mit Fashion-Center

Abbildung 2.7.: Ausprägungsbeispiele von Logistiksystemen (in Anlehnung an Buchholz et al. (1998, S. 45))

diese Systeme dem Gelegenheitskunden (sporadischer Kunde) im Allgemeinen nicht zur Verfügung. Denn erst ein festes Mindestvolumen des Transportes und feste Verträge ermöglichen die automatische Abholung in einem festgelegten Rhythmus.

Abbildung 2.7 zeigt eine Differenzierungsmöglichkeit von Logistiksystemen in der Logistikdienstleistung. Nach dieser Herangehensweise wird zwischen *Modul-* und *Netzsystem* unterschieden. Die KEP-Dienstleister gehören in den Bereich der Netzsysteme. Eine weitere mögliche Unterscheidung einer Systemausprägung sind die *offenen* und *dezidierten* Systeme. Im Unterschied zu geschlossenen Systemen ist bei dedizierten Systemen eine Verbindung mit Teilsystemen anderer Verlader möglich, die zur Bildung eines homogenen Gesamtsystems führen (Buchholz et al., 1998, S. 40). Die KEP-Dienste gehören zu den offenen Systemen.

Der Begriff Logistikdienstleistung ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff *Dienstleistungslogistik*. Mit Dienstleistungslogistik wird die Logistik in Dienstleistungsunternehmen zusammengefasst. Dabei kann es sich z.B. um die Logistik in Krankenhäusern, Unternehmensberatungen oder Banken handeln. Im Bereich der Logistikdienstleistung befinden sich Anbieter wie Speditionen, Kontraktlogistikanbieter oder KEP-Dienstleister. Sie bieten Logistik als externe Dienstleister für Unternehmen an (Walter, 2003, S. 35).

2.2.2. Unterscheidung zwischen Kurier-, Express- und Paketdiensten

Im Folgenden sollen die Teilmärkte Kurier-, Express- und Paketdienste nach Thomas (2004, S. C3-70ff) abgegrenzt werden.

Kurierdienste:
In diesem Marktsegment werden Sendungen im Direktverkehr individuell abgeholt und zugestellt. Das Gewicht der Sendungen wie Dokumente und Kleinsendungen beträgt typischerweise maximal 3 kg und hat ein Durchschnittsgewicht von etwa 1,5 kg. Der Transport der Sendungen erfolgt in kürzestmöglicher Zeit mit hoher Zuverlässigkeit vom Versender zum Empfänger. Ein besonderes Merkmal des Kurierdienstes ist eine den jeweiligen Bedürfnissen der Kunden angepasste Logistik (z.B. die garantierte Zustellung zu einem festgelegten Zeitpunkt).

Unternehmen, die im Markt der Kurierdienste tätig sind, können regional, national oder international handeln. Zu regionalen Kurierdiensten zählen z.B. Stadtkuriere, die Sendungen den Kundenwünschen entsprechend direkt vom Versender zum Empfänger senden. Die national handelnden Kurierdienste sind meistens bundesweit tätige Unternehmen mit eigenem Transportnetz, auf dem nach Linienfahrplänen organisierte Transporte zwischen den Knoten des Netzes erfolgen. Unternehmen, die den internationalen Markt der Kurierdienste beherrschen, werden als Integratoren bezeichnet. Diese Unternehmen sind Transportdienstleister, die sich vornehmlich weltweit in dem Markt für Haus-zu-Haus-Verkehr von Dokumenten und Paketen bis zu einer Gewichtsgrenze von ca. 30 kg betätigen. Deren Verkehrsnetze sind weltumspannend. In diesen Netzen werden die Transporte häufig mit eigenem Fuhrpark und eigener Flugzeugflotte durchgeführt.

Expressdienste:
Abgrenzend von Kurierdiensten sind bei Expressdiensten für die Transportgüter keine Gewichts- und Maßbeschränkungen definiert. Dabei werden die Einzelsendungen nicht wie beim Kurierdienst im Direktverkehr, sondern hauptsächlich systemgeführt im Sammelverkehr distribuiert. Die Expressdienste berücksichtigen die Bedürfnisse der Kunden z.B. dadurch, dass sie die Zustellung vor einer bestimmten Uhrzeit garantieren.

Paketdienste:
Im Teilmarkt der Paketdienste konzentrieren sich die Unternehmen auf das in Paketform verpackte Kleingut. Das Gewicht der Pakete beträgt dabei maximal 31,5 kg, die üblicherweise über Nacht transportiert werden. Die Gewichtsgrenze garantiert die Handhabung des Pakets bei Abholung oder Zustellung durch eine einzige Person. In den USA ist dieses Gewicht auch die Grenze für den genehmigungsfreien Güterverkehr (70 lbs = 31.5 kg, o.V. (2008b)). Sollen von einem Auftraggeber mehrere Pakete transportiert werden, werden diese vom KEP-Dienstleister zu einer Sendung zusammenge-

fasst.

Unterschieden werden die drei Teilmärkte Kurier-, Express- und Paketdienste hauptsächlich durch die Leistungen und die Preisstruktur. Theoretisch sind diese Begriffe eindeutig definiert. In der Praxis kommt es jedoch oft zu Überschneidungen. So wird z.B. die Unterscheidung der Marktsegmente der KEP-Dienste mittels der Sendungsgewichte zunehmend schwieriger (Thomas, 2004, S. C3-71).

2.2.3. Die geschichtliche Entwicklung der KEP-Dienste

Die folgenden Ausführungen sollen die Bildung eines eigenen Marktsegmentes für KEP-Dienste skizzieren.

Mit der Entstehung des Bedürfnisses zum Informationsaustausch und zur Kommunikation zwischen den Menschen bildeten sich Kurier- und Botendienste. Erste Anzeichen dafür gab es schon bei den Sumerern in früher vorchristlicher Zeit (3. Jahrtausend v. Chr.) (Ditsch, 1987, S. 2). Von da an bis zur Neuzeit sind Tätigkeiten von Kurieren und Boten belegbar: im alten Ägypten, im Griechenland der Antike und im Römischen Reich (Manner-Romberg, 1995, S. 4ff). Hierbei gab es Abhängigkeiten zwischen der Entwicklung der Kurierdienste und der Entstehung der Post. Wo sich ein Markt für den Austausch von Gütern und Nachrichten entwickelte, bildeten sich die dazu notwendigen Infrastrukturen. Dazu entstanden spezielle Transportketten, die zur Sicherstellung der Beständigkeit und Schnelligkeit des Transportes dienten. 1385 ist ein weiteres wichtiges Jahr für die Entwicklung der KEP-Dienste in Europa: In diesem Jahr gründete die Familie Tassis aus Bergamo (später Thurn und Taxis) unweit des in dieser Zeit als Handelszentrum geltenden Mailand eine Post zur Nachrichtenübermittlung. Wegen der großen Nachfrage nach regelmäßigem Informationsaustausch aus den Bereichen des Handels und der Diplomatie gelang es der Familie, den Nachrichtendienst von Italien auf ganz Mitteleuropa zu erweitern. Die angebotene Dienstleistung und die dazugehörige Internationalität waren zu jener Zeit konkurrenzlos.

In Bezug auf Deutschland gehen zahlreiche Veröffentlichungen davon aus, dass das Jahr 1516 ein markanter Punkt für die Dienste war. Denn in diesem Jahr wurde die Thurn-und-Taxis-Post gegründet, die das zum damaligen Zeitpunkt vorhandene Kuriergewerbe vollständig ersetzte (Manner-Romberg, 1995, S. 4f). Durch die Auflösung der Reichshoheit konnte sich die damalige Post nicht als Monopolist durchsetzen. Vielmehr gründeten die einzelnen Reichsgebiete ihre eigene Landespost. Daher existierten bis zur Reichsgründung 1871 zahlreiche Postbetriebe. Das damalige florierende Kurierwesen setzte sich aus Kurieren des Kaisers, des Klerus und der entsprechenden Landesherrscher, Stände und Universitätskuriere zusammen. Mit der Reichsgründung entstand ein einheitlich geregelter Postbetrieb und die damit verbundene Gründung der Deutschen Reichspost. Dadurch wurden die Leistungen privater Postdienstleister eingeschränkt. Die Reichspost rechtfer-

tigte dies durch die Sicherstellung der Versorgung in der Peripherie, wobei die Gewinne aus den Stadtbereichen als Subventionen herangezogen wurden. Die Folgejahre waren durch das Verschwinden der Kuriere und Boten aus dem öffentlichen Leben gekennzeichnet. Gebraucht wurden diese Dienste nur noch im politischen und militärischen Bereich. Durch das so genannte Wirtschaftswunder in den 1950er Jahren erlebte das Transportwesen in Deutschland eine Renaissance (Manner-Romberg, 1995, S. 8). Mit der wachsenden Wirtschaft bildete sich eine Nachfrage nach schnellen Transporten.

In Australien und Nordamerika entstanden bereits Anfang des 20. Jahrhunderts die ersten Unternehmen, die sich auf den Transport von Dokumenten und Kleingutsendungen per Express konzentrierten. Die als *Integrator-Gesellschaften* bezeichneten Unternehmen führten ihre Geschäfte vorerst auf nationaler Ebene durch. Durch die Liberalisierung des Luftverkehrsmarktes in der USA konnten Neuanbieter Dienstleistungen im Bereich der Luftfracht anbieten. Das 1909 in Boston gegründete Expressunternehmen United Parcel Service (UPS) setzte als erstes 1929 eigene Frachtflugzeuge ein. TNT (Thomas Nationwide Transports) in Australien folgte 1946. Ende der 1960er Jahre boten weitere Unternehmen wie DHL (Dalsey, Hillblom, Lind), FedEx (Federal Express) oder World Curier zunächst auf dem nordamerikanischen und kurze Zeit später auf dem internationalen Markt ihre Expressdienste an (Ditsch, 1987, S. 13f). Mit der Einführung von Übernachtzustellungen im Jahre 1973 verwirklichte der FedEx Gründer Fred Smith das Konzept des Hub-and-Spoke Netzes[12] und konnte auf diese Weise integrierte Transporte bereitstellen (Mayer, 2001, S. 39f).

Nach Auffassung von Blochmann (1994, S. 6f) sind Länder mit einer gering entwickelten Infrastruktur und kontinentaler Größe wie Nordamerika oder Australien Paradebeispiele für die Bildung fortschrittlicher Transportfirmen, wie diese im Bereich der Expressdienste. International beschleunigte sich der Dokumententransfer durch die wachsende Verflechtung der Weltwirtschaft (Woitek, 1987, S. 26). Für die erhöhten Anforderungen der Kunden nach zuverlässiger, schneller und kostengünstiger Beförderung von Schriftstücken, Dokumenten und Warensendungen geringen Gewichts waren der Eisenbahnverkehr und der Lufttransport unterentwickelt und daher unpraktisch. Ebenso konnten die Post- und Speditionsdienste die wachsenden Ansprüche der Wirtschaft nach sicherer und schnellerer Beförderung von Kleingütern nicht nachkommen (Schumacher, 1987, S. 82). In den siebziger Jahren entwickelte sich die KEP-Branche als eigenständiger Bereich im Transportmarkt. In dieser Zeit begann die Untergliederung in die einzelnen Marktbereiche Kurier-, Express- und Paketdienste und etwa 20 Jahre später wurden diese auch Gegenstand einer näheren wissenschaftlichen Behandlung (Manner-Romberg, 1995, S. 11).

Die KEP-Branche globalisierte sich durch die steigende Nachfrage nach grenzüberschreitenden Transporten. Aus den nationalen KEP-Diensten entstanden die Integratoren. Nach der Preisfreigabe für den Sammelgutverkehr in Deutschland im Jahre 1975 baute UPS als erster Privatanbieter einen Dokumenten- und Expressdienst auf (Vahrenkamp

[12] Vergleiche dazu Abschnitt 2.3.2.

& Siepermann (2005), S. 137f und Hector (1987), S. 14ff). Um der neuen Konkurrenz etwas entgegenzuwirken, antworteten 17 mittelständische Speditionen mit der Unternehmensgründung des Deutschen Paketdienstes (DPD)[13]. Neben den schon genannten internationalen Expressdiensten und der Deutschen Post konnten sich die Firma trans-o-flex mit zunächst Konzentration auf die Pharmaindustrie und das aus 25 mittelständischen Speditionen gegründete Gemeinschaftsunternehmen German Parcel (GP) etablieren (Vahrenkamp & Siepermann, 2005, S. 155f).

Im Stadtbereich konnte sich als KEP-Dienstleister das im Jahre 1979 gegründete Unternehmen Der Kurier etablieren. Im Verband Arbeitsgemeinschaft Deutscher Kurierdienste (ADK) schlossen sich die regional tätigen Kurierdienste zusammen und vereinbarten, überregionale Sendungen in einem vertraglich festgelegten Gebiet zu transportieren.

In der Wirtschaft entstand eine große Nachfrage nach flächendeckenden und zeitgenauen Transporten von eiligen Kleinsendungen. Unternehmen wie die Deutsche Post oder bereits vorhandene Paketdienste wollten oder konnten diese Nachfrage nicht befriedigen. Mittelständische Unternehmen füllten diese Marktlücke und entwickelten die Dienstleistung *Overnight*. Der Begriff steht für Sammeltransporte dringender Kuriersendungen, die zu fest vorgegebenen Tarifen und Zeiten zwischen Stadtgebieten über Nacht abgearbeitet werden. Aufgebaut wurde dieser Service unter Einbindung der Bundesbahn, denn die teilnehmenden Unternehmen besaßen zu dieser Zeit noch keine eigenen Transportnetze mit überregionaler Größe. Das Termingut, eine Dienstleistung von Stadt zu Stadt mit festen Tarifen und Laufzeiten, wurde Ende der 1970er Jahre von der Bahn eingeführt. Zahlreiche Overnight-Dienstleister errichteten ihren Service auf dieser bereits vorhandenen Infrastruktur. Die lokal agierenden Kurierdienste stellten die von ihren Kunden eingesammelten Sendungen zu Sammelsendungen zusammen, transportierten sie zur Bahn und die Sendungen wurden mit dem Zug zum betreffenden Zielort geliefert. Ein am Zielort befindlicher Kurierdienst teilte die Sendungen an die unterschiedlichen lokalen Empfänger aus (Manner-Romberg, 1995).

Als die Bahn ihre Termingut-Dienstleistung beendete, wurden die Kurierdienste praktisch genötigt, die Güter auf der Straße zu befördern. Der Transport der Güter auf der Straße wurde zusätzlich begünstigt durch die Marktentwicklung. Viele Dienstleister boten weitere Frachtkapazitäten im Markt für Schnelllieferungen an, die genutzt werden konnten. Durch die von den Speditionen durchgeführte Abwicklung der Transporte verbesserte sich die Zuverlässigkeit der Dienstleistung.

Gründe für das Wachstum im KEP-Markt lagen vor allem in der Entwicklung neuer Produktionsverfahren. Just-in-Time-Produktion ist das dabei am häufigsten genannte Verfahren. Es beinhaltet im Kern die Synchronisation der aufeinanderfolgenden Produktions- und Transportvorgänge. Dies erfolgt so, dass jeder Vorgang das Material genau dann zur Verfügung stellt, wenn der jeweilige Nachfolgevorgang es benötigt (Fleischmann, 2004a,

[13]Seit dem 1. Januar 2008 steht DPD für Dynamic Parcel Distribution.

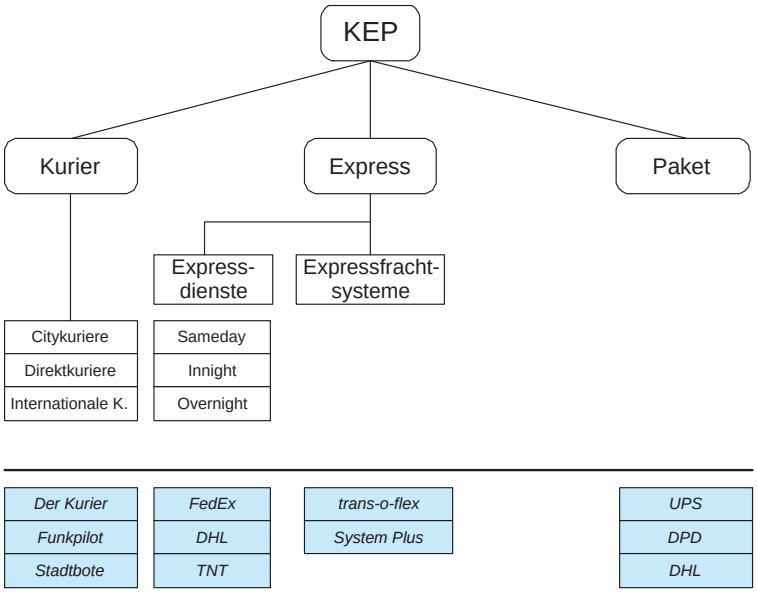

Abbildung 2.8.: Übersicht des KEP-Marktes bis 1998 (in Anlehnung an o.V. (2001b))

S. A1-10f). Dieses wurde von vielen Unternehmen eingeführt und setzte eine schnelle und zuverlässige Verfügbarkeit von Gütern voraus. Ein Schwerpunkt von internationalen Express-Dienstleistern ist z.B. die Just-in-Time-Distribution von Ersatzteilen in der Maschinenbauindustrie. In den 1980er-Jahren wurden dabei jährliche Wachstumsraten von etwa 5% erreicht (Läpple, 1993, S. 73).

In Deutschland lässt sich die Entstehung der KEP-Bereiche in zwei Phasen aufteilen. Der KEP-Markt wird in der ersten Phase bis 1998 entwickelt (siehe Abbildung 2.8) und in der zweiten Phase ab 1998 vor allem wegen der Liberalisierung des Postgesetzes (Gutthal, 1999, S. 29) neu geordnet (siehe Abbildung 2.9). Die klassische Unterteilung in die Bereiche Kurier-, Express- und Paketdienste gab es noch bis 1998. Die City-, Direktkuriere und internationale Kuriere waren sowohl in der ersten als auch in der zweiten Phase Bestandteil des Kurierbereichs. Demgegenüber beinhaltete das Segment der Expressdienste die Expressdienste und Expressfrachtsysteme. Im Vergleich zum Markt bis 1998 sind im Markt ab 1998 die Expressfrachtsysteme ein Bestandteil der Expressdienste. Expressfrachtsysteme beinhalten Anbieter, die den Expresstransport von hochgewichtigen Sendungen bereitstellen. Ein weiterer großer Bereich der Markteinteilung bis 1998 bildeten die Paketdienste. Diese und die Expressdienste gingen ab 1998 ineinander über. Die postalischen Dienste wurden ab 1998 ein neuer Bereich der KEP-Dienste. Dieser Bereich enthält Produkte wie Dokumentenaustausch oder Standardbrief.

Da die neue Unterteilung mit postalischen Diensten eine rein auf Deutschland zugeschnittene Ansicht ist, wird im Weiteren eine allgemein gültige Betrachtungsweise (international) zugrunde gelegt, nämlich die Marktsegmente Kurier, Express und Paket.

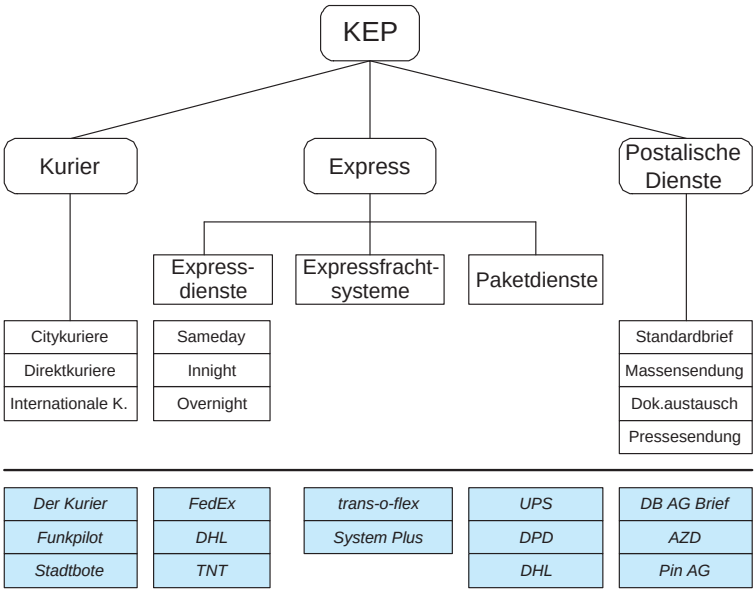

Abbildung 2.9.: Übersicht des KEP-Marktes in Deutschland ab 1998 (in Anlehnung an o.V. (2001a))

2.2.4. KEP-Dienste aus heutiger Sicht

Der Markt der KEP-Dienste wird vom Stückgutmarkt vor allem durch das Transportgewicht der Güter abgegrenzt. Anbieter von KEP-Diensten transportieren *Kleingut* bis 31,5 kg, wie z.B. Briefe, Dokumente und Pakete. Im Stückgutmarkt wird *Stückgut* mit bis zu zwei Tonnen transportiert. Während beim Stückgut die Zahl der Sendungen niedriger ist, aber das einzelne Sendungsgewicht hoch, verhält es sich beim Kleingut umgekehrt. Die akzeptierten Güter im KEP-Markt sind hinsichtlich Vielfalt, Maße und Gewicht eingeschränkt. Daraus lässt sich bezüglich des Transportes, Umschlags und der Sortierung eine hohe Standardisierung erreichen (Mayer, 2001, S. 41). Dies führt dazu, dass KEP-Dienste zuverlässig und in kurzer Zeit (24 Stunden, 48 Stunden, Sameday- oder Overnight-Delivery) Sendungen in getakteten Verkehren transportieren können.

Im Hinblick auf die Kosten unterscheidet sich der Markt der KEP-Dienste vom Stückgutmarkt durch geringere Handhabungskosten aufgrund der Verwendung von automatisierten Sortieranlagen und höheren Zustellkosten auf der „letzten Meile“ infolge relativ kleiner Auslieferungsmengen je Empfänger. Letzteres tritt häufig im Privatkundengeschäft auf, bei dem es wegen nicht vorhandener betriebsüblicher Öffnungszeiten zu häufigen Zustellversuchen kommt und/oder die Bereitstellung von Abholzentren („Paketshops“) notwendig ist (Bretzke, 2008, S. 217). Analog gilt dies für das Einsammeln der zu transportierenden Güter.

Die Struktur von Netzen änderte sich in den letzten Jahren im großen Umfang. Steigende

Kundenanforderungen wie Termintreue, kurze Transportzeitfenster oder Flächendeckung und anhaltender Preisdruck sind dafür verantwortlich. Die Einführung innovativer Netzstrukturen (Hub-Systeme[14]) und die noch nicht abgeschlossene Konzentration der Anbieter im Markt sind die wichtigsten Anpassungen an das veränderte Umfeld. Um die Qualitätsanforderungen des Marktes gegenwärtig erfüllen zu können, müssen die Netze hinsichtlich der Verkehre im Hauptlauf streng durchgetaktet sein, d.h., die Verkehre finden in rhythmischen, sich periodisch wiederholenden Intervallen statt. Hierbei werden die Verkehre des Hauptlaufs in der Regel nachts durchgeführt. Dabei haben große Anbieter Kosten- und Qualitätsvorteile: Zum einen können sie dichtere Netze knüpfen als kleinere und dadurch ihre Transportleistung zu niedrigeren Kosten durchführen. Zum anderen können sie unabhängig von der Lage des Versenders und Empfängers dem Kunden einen hochfrequenten flächendeckenden Service anbieten. Ein weiterer größenabhängiger Wettbewerbsvorteil zeigt sich durch kleinere Auswirkungen bei den Schwankungen der täglichen Transportmengen auf die durchschnittlichen Kapazitätsauslastungen der LKWs (Bretzke, 2008, S. 217, S. 221, S. 226).

Bekannte KEP-Dienstleister sind FedEx, UPS, DHL, DPD oder TNT. Die Wachstumsaussichten des Marktes werden als positiv bewertet. Als Gründe für dieses Wachstum werden internationale und Business-to-Consumer(B2C)-Dienste[15] angeführt (o.V., 2007c). Aus den national geprägten KEP-Diensten wie in Deutschland, Frankreich oder Italien entwickeln sich durch die Nachfrage nach länderübergreifenden Transporten internationale KEP-Dienste. Auf Europa bezogen ist diese Entwicklung zurückzuführen auf die zunehmende Europäisierung mit gestiegenen grenzüberschreitenden Austauschbeziehungen und Geschäftsverflechtungen. Immer mehr Unternehmen fordern Leistungsangebote, die sie aus dem nationalen Geschäft gewohnt sind, nun auch für die europaweite Paketzustellung. Für den Markt bedeutet dies, dass sich kleine KEP-Dienstanbieter zu großen zusammenschließen und versuchen werden, die lukrativen Geschäfte mit Großkunden europaweit an sich zu binden. Nach Auffassung von Clausen et al. (2005, S. 28) wird dabei die konsequente Harmonisierung der einzelnen Ländergesellschaften zu einer einheitlichen europäischen Netzstruktur eine Kernaufgabe der führenden Paketdienste in den nächsten Jahren sein (siehe Abschnitt 2.4). Dabei werden die übrig gebliebenen Anbieter zunehmend unter Druck geraten und es wird zu einem weiteren Konzentrations- bzw. Ausleseprozess kommen (Bretzke, 2008, S. 218).

Die positiven Wachstumsaussichten liegen weniger in den europäischen Kernmärkten in Westeuropa, wo die Märkte weitestgehend gesättigt sind. Durch den EU-Beitritt vieler ost- und zentraleuropäischer Länder sind große Handelshemmnisse weggefallen. Die in diesen Ländern vorliegenden Standortvorteile im Bereich der produzierenden Wirtschaft führen zu einem hohen Wirtschaftswachstum. Daher ist in diesen Ländern der Express- und Paketmarkt vielversprechend. Von etwa 2 Milliarden Euro im Jahr 2008 könnte sich der Umsatz im KEP-Markt in den ost- und zentraleuropäischen Ländern bis zum

[14] Vergleiche dazu Abschnitt 2.3.2

[15] Dies ist die Electronic-Commerce-Klasse „Unternehmen zu Verbraucher“, z.B. elektronische Kaufhäuser im Web wie z.B. Amazon (Fink et al., 2005, S. 219).

Jahr 2011 verdoppeln. Durch Firmenübernahmen, Partnerschaften oder Neugründungen sind die globalen Marktführer bereits in den Markt eingetreten (Schönershoven, 2008, S. 29f).

Der Markteintritt in Russland gestaltet sich schwierig. Die geographischen Gegebenheiten lassen es kaum zu, ein flächendeckendes Netz aufzubauen. Politisch aufgebaute Hindernisse, das Zollprozedere oder die weit verbreitete Korruption erschweren den Eintritt. Aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklung in Asien dürften die Märkte wie China, Indien, Malaysia oder Singapur für den KEP-Bereich starkes Marktpotential haben. Beispielsweise wird für den chinesischen Markt in den nächsten Jahren ein Wachstum von 25 bis 30% prognostiziert. Jedoch gelang es den globalen Unternehmen bis jetzt noch nicht, sich im stark fragmentierten chinesischen Markt zu positionieren. Sie sind auf enge Kooperation mit chinesischen Unternehmen angewiesen. Kulturelle Eigenheiten sowie unterschiedlichste Markteintrittsbarieren in den Ländern erschweren den Einstieg großer Integratoren in Asien. Im Hinblick auf das Wirtschaftswachstum bietet auch Lateinamerika Wachstumspotential für die KEP-Branche. Da jedoch die Warenströme in diesem Erdteil mehr auf Nordamerika als auf Europa ausgerichtet sind, dürfte diese Region für europäische KEP-Unternehmen weniger interessant als für global aktive Unternehmen sein (Schönershoven, 2008, S. 31).

2.3. Planungsprobleme im Rahmen einer Transportdurchführung

2.3.1. Planungsaufgaben für KEP-Dienstleister

Hinsichtlich der für eine Planung verwendeten Datenbestände müssen unsichere Abschätzungen durchgeführt werden. Der zeitliche Einflussbereich für die zu fällenden Entscheidungen spielt für die Art der Planung bzw. die eingesetzten Verfahren und die an die erzielten Ergebnisse gestellten Erwartungen eine zentrale Rolle. Im Allgemeinen reduziert sich mit Erweiterung des Planungshorizontes die Verlässlichkeit der verwendeten Daten und die von den zu erzeugenden Plänen verlangte Exaktheit. Hierbei wird oft zwischen der strategischen, taktischen und operativen Planungsebene differenziert. Dabei stehen die drei Planungsebenen in einem hierarchischen Zusammenhang (Scholl, 2004, S. A2-2).

Auf der *strategischen Planungsebene* werden auf Basis verhältnismäßig ungenauer Daten langfristige Entscheidungen getroffen. Diesbezüglich bilden die Erschließung, Erhaltung und der Ausbau von ausreichenden Erfolgschancen zur Sicherung des Unternehmens den Fokus. Darauf aufbauend wird im Rahmen der *taktischen Planung* versucht, die Vorgaben der strategischen Planung durch gezielte mittelfristige Handlungen zu präzisieren. Dadurch sollen die formulierten Strategien verwirklicht werden. Wiederum darauf aufbauend wird in der *operativen Planung* die Umsetzung der angestrebten Ziele

anvisiert. Die für die Durchführung der Abläufe erforderliche Planung erfolgt in den von der strategischen und taktischen Planung vorgegebenen Strukturen. Hinsichtlich des Planungszeitraumes unterscheiden sich die drei Ebenen dahingehend, dass die typischen Planungshorizonte für die strategische Planung mindestens ein Jahr, für die taktische Planung maximal ein Jahr und für die operative Planung kürzestmöglich wie z.B. tage- oder stundenweise betragen (Ballou, 2004, S. 38). Daher werden der Planung von Transporten sämtliche notwendigen Aufgaben zur Vorbereitung des jeweiligen Transportprozesses im Vorfeld der eigentlichen Transportausführung zugeschrieben. Hieraus resultiert auch der Unterschied zwischen der Planung und *Steuerung*. Auf Grundlage der durch die Planung gelieferten Vorgaben und mittels der erstellten Ausführungspläne kann die Steuerung durchgeführt werden. Dadurch beschränkt sich der Zuständigkeitsbereich der Steuerung auf die zielgerichtete Verwirklichung der Planung und beginnt zu dem Zeitpunkt, ab dem der zu realisierende Prozess zur Umsetzung kommt (Bock, 2004, S. 6).

Wie allgemein die Speditionsunternehmen sind auch die KEP-Dienstleister einem hohen Kosten- und Qualitätsdruck ausgesetzt. Einerseits müssen wegen des hohen Wettbewerbsdrucks die einzelnen Transportleistungen wirtschaftlich durchgeführt werden. Andererseits verlangt der Kunde umfassende Leistungsangebote mit besonderen Qualitätsansprüchen. Erfüllt werden können diese Wettbewerbsbedingungen nur von Transportunternehmen, die ein effizientes und leistungsfähiges Transportnetz haben, in dem die Verkehre intelligent organisiert werden. Die dazu benötigte Netzstruktur und die Optimierung der Abläufe darin sind wichtige Erfolgsfaktoren. Daraus resultieren vielseitige Aufgabenstellungen.

Die auftretenden Planungsaufgaben können in strategische, taktische und operative Probleme gegliedert werden. Bei strategischen Problemen muss das verwendete logistische Netz langfristig geplant werden. In der taktischen Planung werden die Verkehrsabläufe organisiert. Dabei werden die Vorgaben der strategischen Planung als Rahmenbedingungen übernommen. Erneut darauf aufbauend wird in der operativen Planung die Realisierung der Transporte zielgerichtet geplant. In Anlehnung an Wlček (1998) zeigt Abbildung 2.10 den Zusammenhang zwischen den einzelnen Planungsebenen der Verkehrsorganisation in Speditionen, die Sammelgut transportieren. Diese Problemaufgaben sind auf die Branche der KEP-Dienstleister übertragbar. Bevor diese Planungsebenen genauer erläutert werden, wird zunächst die Leistungserbringung von KEP-Diensten in logistischen Netzen genauer beschrieben.

2.3.2. Leistungserbringung der KEP-Dienste im logistischen Netz

Um KEP-Dienstleistungen anbieten zu können, benötigt der KEP-Dienstleister ein Transportnetz. Die im Netz zu transportierenden Mengen sind KEP-Sendungen zwischen Versendern und Empfängern. Nach Abschnitt 2.1.1 müssen die logistischen Grundfunktionen

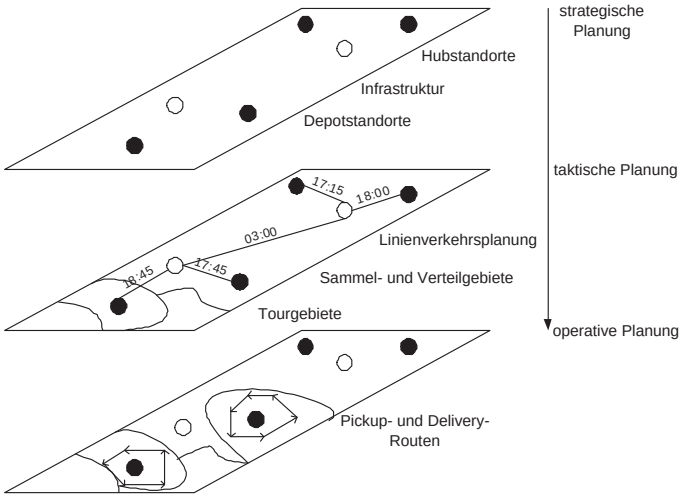

Abbildung 2.10.: Planungsebenen der Verkehrsorganisation in KEP-Dienste (in Anlehnung an Wlček (1998, S. 30)

Sammeln, Transportieren, Lagern, Verteilen, Umschlagen von Gütern erbracht werden. Für die Durchführung von Umschlagleistungen in einem Standort eines logistischen Netzes müssen Mengen von Sendungen in ihrer Ordnung geändert werden. Hierbei treten *Sortierleistungen* auf, wo eingehende Mengen von Sendungen gebrochen, d.h. definierten Zielen zugeordnet und somit neu zusammengestellt werden. Dadurch sollen zum einen ein abgehendes Nah- bzw. Fernverkehrsfahrzeug möglichst optimal ausgelastet und zum anderen bestehende Kundenaufträge anforderungsgerecht erfüllt werden. Die Bildung von zielspezifischen Mengen in einem logistischen Standort erfolgt meist ohne vorherige Lagerung. In der wissenschaftlichen Literatur und der Praxis wird dies in der Regel als *Konsolidierung* von Sendungen für einen Verteilknoten einer Spedition in einem Depot bezeichnet. Dabei werden folgende Ordnungsleistungen erbracht: Eine an den logistischen Standort angelieferte Menge von Sendungen wird entladen, nach Art (z.B. Zielrelation) aufgelöst (dekonsolidiert) und zu neuen Mengen mit neuer Struktur (z.B. kumuliertes Sendungsgewicht für einen Empfänger) gebündelt (konsolidiert), um schließlich auf ein neues Transportmittel verladen zu werden (Klaus & Krieger, 2000, S. 488f). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird für die Bündelung von Sendungen der Fachbegriff Konsolidierung verwendet.

Wie jedes Transportnetz setzt sich auch das für KEP-Dienstleister aus Knoten und (gerichteten) Verbindungen zwischen diesen Knoten zusammen. Bei den Knoten werden hier hauptsächlich *Depots* und *Hubs* unterschieden. Ein Depot ist als ein unterhaltener Umschlag- und Sammelpunkt zu charakterisieren. Ihm ist ein Versand- und Empfangseinzugsgebiet zugeordnet, wobei diese Gebiete meistens deckungsgleich sind. Somit geschieht in einem Depot der Wechsel des eingesetzten Transportmittels für die einzelnen dort umgeschlagenen Sendungen mit der Absicht einer Konsolidierung für die darauffolgenden Weitertransporte. Für die Vorbereitung einer solchen Konsolidierung wird jeder zu befördernden Sendung ein *Versand-* und *Empfangsdepot* zugeteilt. Dazu

werden meist die Depots eingeplant, deren geographische Position am nächsten zum gegebenen Versender- bzw. Empfängerort der betrachteten Sendung liegt. Im Gegensatz zu Depots als dezentrale Umschlag- und Sammelpunkte für Sendungen sind Hubs „in erster Linie zentrale Umschlageinrichtungen innerhalb des gesamten Transportnetzes“ (Thomas, 2004, S. C3-71). Dadurch dienen Hubs zur Verbesserung der Auslastungen auf den Streckenverkehren. So gibt es bei n vorliegenden Depots insgesamt $n * (n - 1)$ mögliche Relationen (Beziehungen zwischen den verschiedenen Depots), deren Transportaufkommen meistens einzeln eingesetzte Transportmittel nicht auslastet. Um angemessen ausgelastete Transportmittel zu erzielen, werden im Hauptlauf oft Konsolidierungsschritte durchgeführt. In der Regel erfolgt dies durch Abwicklung mehrerer Transporte über einen weiteren Umschlagpunkt (dem Hub).

Die Netze für KEP-Dienste lassen sich in zwei grundlegende Netztypen unterteilen: *Direktverkehrsnetzwerk* und *Hub-and-Spoke-Netz* (Abbildung 2.11). Im Direktverkehrsnetz wird jedes Depot direkt mit jedem anderen Depot über eine Relation verbunden. Der Transport der Sendungen in diesem Netz erfolgt einstufig, d.h., der Transport der Sendungen wird nicht durch einen Umschlag unterbrochen. Das Hub-and-Spoke-Netz besteht aus einem oder mehreren zentralen Umschlagpunkten (Hub) und sternförmig auf diese Punkte zulaufenden Relationen (Spoke). Bei diesem mehrstufigen Transportnetz werden normalerweise alle Sendungen vom Versanddepot zum Empfangsdepot über einen Hub geleitet. Daher existieren keine direkten Verkehre zwischen den Depots.

Als Erweiterung des Hub-and-Spoke-Netzes gibt es das *Regionalhub-*, *Feederhub-* (Abbildung 2.11) und *Mehrhubnetz* (Abbildung 2.12). In einem Regionalhubnetz finden die Sendungsverkehre der Depots über Regionalhubs statt. Der Transport der Sendungen zwischen den Regionalhubs erfolgt durch Direktverkehre. Diese Netzstruktur wird wegen des zweimaligen Sendungsumschlags in den Hubs auch als zweistufig bezeichnet. Im Feederhubnetz werden die Transporte zwischen den Regionalhubs wie in einem einfachen Hub-and-Spoke-Netz über einen zentralen Hub abgewickelt. Da der zentrale Hub über die sogenannten Feederhubs versorgt wird und alle ausgehenden Transporte vom Hub zu den Feederhubs laufen, wird auch von einer dreistufigen Hubstruktur gesprochen. Im Mehrhubnetz können die Sendungsverkehre, die gemäß einer gegebenen Relation existieren, alternativ über den einen oder den anderen Hub abgewickelt werden. Jedoch ist dabei ein Direkttransport zwischen den Depots und ein Austausch von Sendungen zwischen den Hubs nicht erlaubt. Für ausführliche Beschreibungen der Charakteristiken der genannten Netze siehe z.B. Bock (2004, S. 48ff).

In der Praxis kommen diese Netze jedoch nur selten in ihrer reinen Form vor. Vor allem KEP-Dienstleister bieten ihre Dienste über Mischstrukturen aus den bereits erwähnten Netzstrukturen an. Der Aufbau eines sogenannten *gemischten Transportnetzes* wird in Abbildung 2.12 dargestellt. In einem solchen Netz kann eine Sendung auf unterschiedlichen Wegen transportiert werden. Beispielsweise kann der Verkehr einer Relation mit einem ein- bzw. zweimaligen Umschlag der Sendungen in einem Hub oder als Direkt-

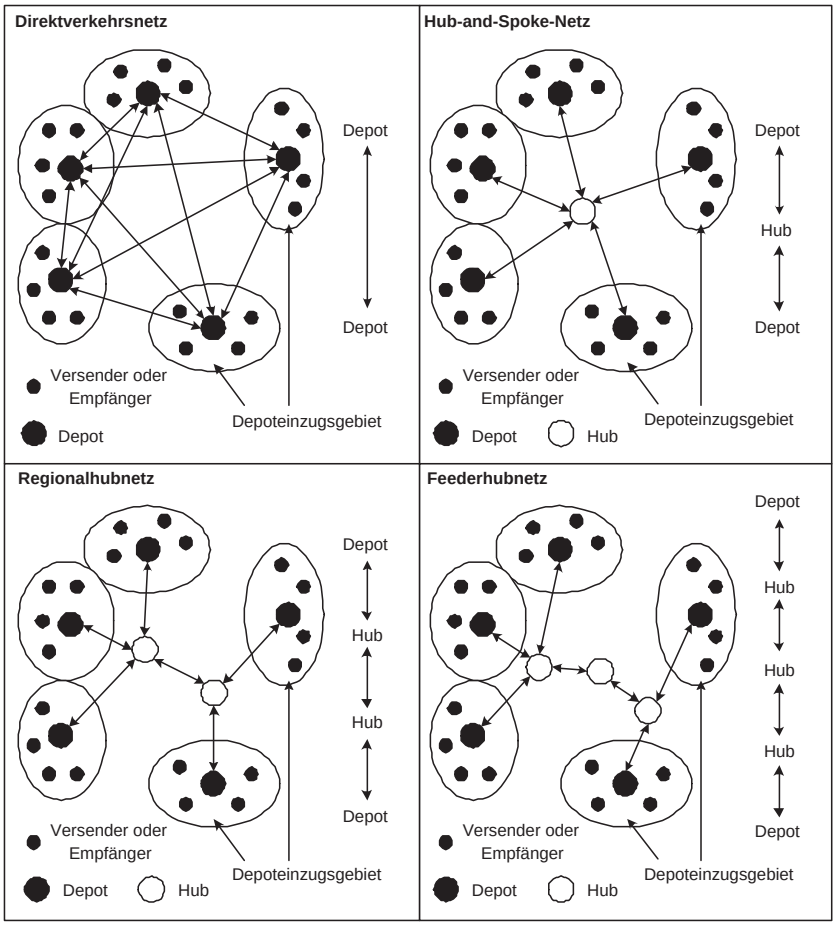

Abbildung 2.11.: Darstellung eines Direktverkehrs-, Hub-and-Spoke-, Regionalhub- und Feederhubnetzes (in Anlehnung an Bock (2004, S. 51f))

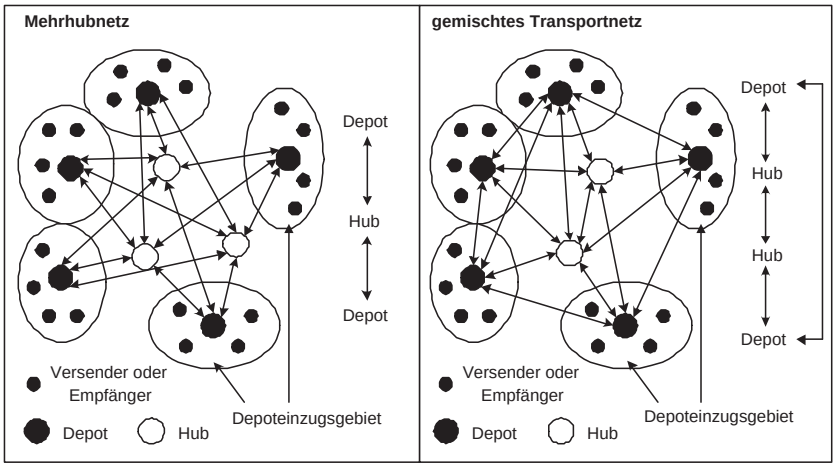

Abbildung 2.12.: Darstellung eines Mehrhub- und gemischten Transportnetzes (in Anlehnung an Bock (2004, S. 52))

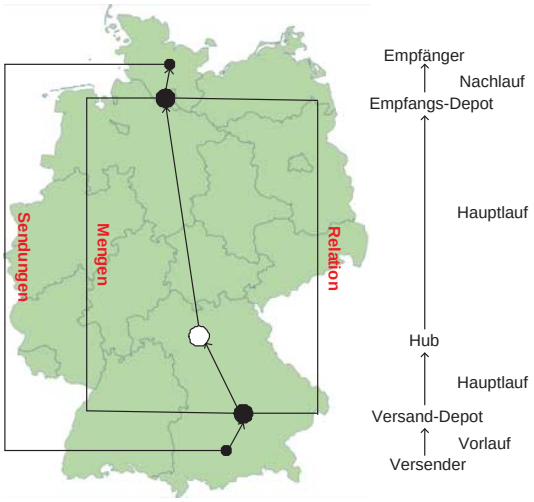

Abbildung 2.13.: Darstellung des Vor-, Haupt- und Nachlaufs beim Sendungstransport vom Versender zum Empfänger

verkehr erfolgen. Oder ein als Hub definierter Standort kann auch als Versand- und Empfangsdepot dienen.

Die in der Praxis vorkommenden Mischstrukturen zeigen, dass Depots und Hubs nicht klar voneinander getrennt werden. Ein Standort kann sowohl als Versand- und Empfangsdepot als auch als Hub dienen. Dabei wird bei den verschiedenen Funktionen von Standorten auch von *Stufen* gesprochen. Die Stufen eines Standortes werden zu verschiedenen Tageszeiten angenommen (vgl. Abbildung 2.14).

Der Transport der Sendungen in einem KEP-Dienst wird im gebrochenen Verfahren in einer dreigliedrigen Transportkette durchgeführt: Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf (siehe Abbildung 2.13).

Beim Vorlauf werden die Transporte von Sendungen zwischen Versendern und Depots betrachtet. Dabei werden die Sendungen in der Regel nicht auf direktem Weg zwischen den Kunden und Depots transportiert, sondern ausgehend von einem Depot starten mehrere Sammeltouren, die das Sendungsaufkommen innerhalb der Region aufnehmen und zum Depot befördern (Flächenverkehre). Im Depot ankommend werden die eintreffenden Sendungen umgeschlagen und für den Hauptlauf sortiert. Beim Nachlauf erfolgt analog zum Vorlauf die Auslieferung der Sendungen an die Empfänger auf mehreren Verteiltouren. Da sich beim Vor- und Nachlauf die Transportrichtungen unterscheiden (beim Vorlauf zum Depot hin und beim Nachlauf vom Depot weg), werden die Vor- und Nachläufe üblicherweise miteinander zu Rundtouren kombiniert (Wlček, 1998, S. 28f).

Während des Hauptlaufs werden alle Sendungen, die vom selben Versanddepot in das Gebiet des selben Empfangsdepots befördert werden sollen, zu einer Menge konsolidiert und auf ein Ladegefäß verladen (Fernverkehre). Aufgrund oben genannter Gründe werden

Abbildung 2.14.: Beispiel für die zeitliche Abfolge in Transportketten für KEP-Dienste

im Hauptlauf oft über Hubs Konsolidierungsschritte durchgeführt.

Bei der Konsolidierung von Transporten wird vorausgesetzt, dass sich die Güter zur gleichen Zeit am gleichen Ort befinden. Dazu ist eine genaue zeitliche Abstimmung der Verkehre zwischen den Vor- und Hauptläufen, den Haupt- und Nachläufen und den einzelnen Hauptlauftransporten untereinander wichtig. Der genaue Zeitrhythmus in den einzelnen Netzen ist unterschiedlich. Er hängt von der Region (z.B. ihrer Größe) ab, in der KEP-Dienste angeboten werden.

Abbildung 2.14 zeigt beispielhaft eine zeitliche Abfolge in Transportketten: Von unterschiedlichen Versendern der Region gehen am späten Nachmittag Sendungen in die Depots ein (Vorlauf). Im Depot erfolgt die Sortierung und Konsolidierung im Hinblick auf den jeweils nächsten Zielort. Können Mengen für ein Empfangsdepot ein Fahrzeug ausreichend auslasten, dann fährt das Fahrzeug direkt an das Empfangsdepot (Hauptlauf). Diese Fahrzeuge fahren abends ab und erreichen am Morgen des Folgetages den Zielort. Können Fahrzeuge in einer Relation nicht ausreichend ausgelastet werden, dann erfolgen die Transporte über ein oder mehrere Hubs (Hauptlauf). Dort treffen sie gewöhnlich gegen Mitternacht ein, werden entladen und die Mengen werden auf den nächsten Zielort sortiert. Am Hub sind der Sortiervorgang und die Beladung der Fahrzeuge z.B. um 2 Uhr nachts abgeschlossen. Nach Eintreffen der Mengen am Empfangsdepot werden diese zu Auslieferouren zusammengestellt. Kleintransporter bringen bis zum Nachmittag die Sendungen zu den Empfängern (Nachlauf).

Ob die konsolidierten Mengen nun am Morgen des Folgetages oder an einem späteren Morgen am Empfangsdepot eintreffen, hängt vom Verlauf des Transportes ab. Auf nationaler Ebene wie z.B. innerhalb Deutschlands können die Sendungen den Empfänger schon am Folgetag erreichen. Können die Sendungen erst innerhalb von 48 oder sogar 96 Stunden zugestellt werden, dann handelt es sich meistens um europäische oder interkontinentale KEP-Dienste. Der Verlauf der Transporte kann dann über mehrere Hubs

mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln erfolgen.

Die Zeit, die für den Transport der Sendungen vom Versender zum Empfänger zur Verfügung steht, wird als *Servicezeit* bezeichnet. So müssen z.B. bei einer Servicezeit von 24 Stunden innerhalb dieser Zeit die Sendungen vom Versender zum Empfänger transportiert werden. Bei Überschreitung der Servicezeit gelten die Sendungen als verspätet.

2.3.3. Strategische Planung

Die Planung von logistischen Netzen für KEP-Dienstleister gehört in den Bereich der strategischen Planung und hat somit einen längerfristigen Charakter. Nach Bock (2004, S. 53f) sind folgende Gestaltungsentscheidungen zu treffen:

- Festlegung der Anzahl, Lage und Dimensionierung von Depots,
- Festlegung der Einzugsgebiete der Depots,
- Festlegung der Anzahl, Lage und Dimensionierung von Hubs und
- Festlegung der Netzstruktur/Depot-Depot-Relationen.

Bei diesen Gestaltungsentscheidungen ist der Neuaufbau eines Transportnetzes lediglich der Ausnahmefall. Vielmehr müssen die bereits bestehenden Strukturen an neue veränderte Ansprüche angepasst werden. Dabei fallen zusätzliche Restriktionen an, die sich durch bereits vorhandene Netze ergeben (Wlček, 1998, S. 31).

Für die Planung geeigneter Transportnetze werden unterschiedliche mathematische Modelle eingesetzt. Grundsätzlich lassen sich unter anderem Standortprobleme und Netz-Design-Ansätze unterscheiden. Bei Standortproblemen stehen die Standortfestlegungen von Hubs und Depots in einem gegebenen Netz und die dadurch zu deckende Bedarfe im Vordergrund. Dahingegen wird bei Netz-Design-Modellen der Güterfluss zwischen allen Knoten abgebildet, d.h., neben den Standorten müssen die Verbindungen zwischen den Standorten festgelegt werden. Ausführliche Darstellungen und Vergleiche der unterschiedlichen Modellformulierungen finden sich z.B. in Fleischmann (1998, S. 61ff) oder Mayer (2001, S. 57ff) und in den dort aufgeführten Literaturhinweisen.

Da die Standortplanung komplex ist, erscheint der Einsatz von hierarchischen Lösungsverfahren innerhalb der strategischen Planung als sinnvoll. Dazu wird das Gesamtproblem hierarchisch in leichter lösbare Teilaufgaben zerlegt, die über „Koordinationsmechanismen“ miteinander verbunden eine zulässige und möglichst gute Lösung des Gesamtproblems ermöglichen (Stadtler, 2004, S. A4-16). Weiterhin werden mit Hilfe von Simulationen die Auswirkung alternativer Strukturentscheidungen auf die taktische, operative Planungs- und Steuerungsebene untersucht. Dadurch kann durch die Untersuchung unterschiedlicher Szenarien vor allem die Anpassungsfähigkeit einer gewählten Netzstruk-

tur gesichert werden. Dies ist gerade in der strategischen Planung wichtig, da die in diesem Bereich verwendeten Datenbestände einer hohen Unsicherheit unterliegen (Bock, 2004, S. 55).

2.3.4. Taktische Planung

Die Ergebnisse aus der strategischen Planung des Netzes bilden die Rahmenbedingungen für die taktische Planung. Das langfristig vorgegebene Netz besteht aus den Depot- und Hubstandorten sowie der darauf aufgebauten Netzstruktur und den Depoteinzugsgebieten. In der mittelfristigen Planung sind sowohl für jedes Depot die Tourgebiete für den Nahverkehr zu planen als auch für den Transport der Mengen im Fernverkehr ein *Linienfahrplan* zu erstellen.

Planung der Tourgebiete für den Nahverkehr

Da bei der Einsammlung und Verteilung von Sendungen im Nahverkehr meistens enge Zeitrestriktionen vorgegeben sind, die Anzahl der einzusammelnden bzw. zu verteilenden Sendungen mit bis 1000 Sendungen (Stumpf, 1998, S. 63) sehr hoch ist und schließlich innerhalb der vorgegebenen Zeitspanne das zur Verfügung stehende Verkehrsnetz meist stark ausgelastet ist, werden für die kombinierten im Nahverkehr stattfindenden Einsammel- und Verteiltransporte in der Regel feste Tourgebiete vorgegeben. Diese werden meist von den gleichen Fahrern bedient. Dadurch können einerseits die eingesetzten Fahrer eine besondere Ortskenntnis erlangen, mit der sie auf die variierenden Verkehrssituationen im jeweiligen Tourgebiet flexibel reagieren können. Andererseits können die Fahrer aufgrund einer längerfristigen Verantwortlichkeit für ein bestimmtes Tourgebiet bessere Beziehungen zu den verschiedenen Kunden aufbauen, was zur besseren Erfüllung von Kundenanforderungen führen kann. Mit der mittelfristigen Planung der Tourgebiete für den Nahverkehr können schließlich die zeitkritischen Umschlagarbeiten in den einzelnen Depots besser koordiniert werden. Beispielsweise ist durch eine fixierte Tourgebietsaufteilung eine schnellere Konsolidierung der angelieferten Sendungen für die darauffolgenden Verteiltouren möglich. Jedoch muss die Bestimmung der jeweiligen Tourgebiete mehrmals in einem Jahr angepasst werden, um mögliche Verbesserungen in der aktuellen Aufteilung oder eine Änderung der anzufahrenden Kundenmenge berücksichtigen zu können (Wlček, 1998, S. 38ff).

Wie so oft in der mittel- bis langfristigen Planung ist auch hier die mangelnde Genauigkeit der benutzten Datenbestände ein Problem für die zielgerichtete Bestimmung der Tourgebiete im Nahverkehr. Zur Messung des zukünftigen Transportaufkommens können nur Abschätzungen oder stochastische Größen eingesetzt werden. Jedoch sollten die festgelegten Tourgebiete sich zum einen durch eine Unterstützung der wirtschaftlichen Transportrealisierung im Nahverkehr und zum anderen durch eine im operativen Bereich noch ausreichende Gültigkeit/Verwendbarkeit charakterisieren lassen. Der letz-

te Punkt wird aber nur dann erreicht, wenn die Anzahl der Sendungen, die gegenüber der ursprünglichen Bestimmung das Tourgebiet wechseln müssen, übersichtlich bleibt. Dadurch können auch die bereits genannten Vorteile einer festgelegten Aufteilung der Tourgebiete realisiert werden (Wlček, 1998, S. 39). Im Hinblick auf die Lösung solcher Aufgabenstellungen scheinen hierarchische Verfahren geeignet. Unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Szenarien können die erzielten Aufteilungen der Tourgebiete einer Qualitätskontrolle unter Berücksichtigung möglicher Anpassungen unterzogen werden. Zur Planung möglicher Tourgebiete werden vor allem Vehicle-Routing-Modellformulierungen verwendet (Crainic & Laporte, 1997; Golden et al., 2008).

Linienverkehrsplanung

Die Linienverkehrsplanung ist der Schwerpunkt dieser Arbeit und wird in diesem Abschnitt den praktischen Vorgaben entsprechend besprochen. Im Kapitel 4 wird für die Linienverkehrsplanung eine Klassifikation und ein Modell dazu vorgestellt.

Aufgrund des Vorlaufs bilden sich an den Versanddepots Sammelladungen. Diese müssen im Hauptlauf vom Versand- zum Empfangsdepot transportiert werden. Die aufkommende Transportmenge je Relation ist im Vergleich zu den Einzelsendungen im Nahverkehr gut prognostizierbar (Wlček, 1998, S. 39). Deshalb ist es in der Regel sinnvoll, die Transportmengen im Hauptlauf als Linienfahrplan durchzuführen. Durch die Linienverkehrsplanung können in der Zeit zwischen zwei Fahrten Sendungen gesammelt und daher Transporte konsolidiert werden. Dadurch ergeben sich Kostenvorteile (z.B. bei den Transportkosten), die an die Kunden weitergegeben werden können (Arnold, 2004, S. C3-5).

Für KEP-Dienstleister sind der kostenbewusste Einsatz von Fahrern und Fahrzeugen und ein hoher Servicegrad die vorrangigen Ziele der Planung. Dabei soll unter Vorgabe von Servicezeiten für die einzelnen Relationen (z.B. innerhalb von 24 oder 48 Stunden) bei Maximierung des Servicegrades die Anzahl zu spät ankommender Transportmengen an den Empfangsdepots minimiert werden. Weiterhin sollten die Zeitpläne so konzipiert sein, dass in den bestehenden Umschlagpunkten durch ein annähernd ausgeglichenes Mengenaufkommen die Auslastung hoch und die Personalkosten niedrig gehalten werden können.

Das tägliche Mengenaufkommen, welches sich aus den einzelnen Sendungsdaten und den Einzugsgebieten der Depots ergibt, wird für jede Relation vorgegeben. Da die täglichen Transportmengen als weitestgehend konstant angenommen werden, kann der Linienverkehrsplan für mehrere Monate gültig sein. Dazu werden z.B. durch Entfernen von Ausreißern standardisierte Daten bestimmt, welche das normalerweise auftretende Mengenaufkommen repräsentieren. Analog verhält es sich mit der Einrollverteilung an den Versanddepots. Die *Einrollverteilung* eines Versanddepots soll dabei die Informationen liefern, wie groß zu einem bestimmten Zeitpunkt der prozentuale Anteil der bereits einge-

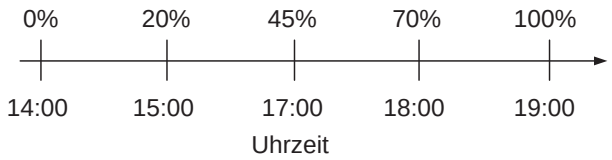

Abbildung 2.15.: Beispiel für die Einrollverteilung an einem Versanddepot

troffenen Transportmenge zur gesamten vom Versanddepot abgehenden Menge an einem Tag ist. Ein Beispiel zur Einrollverteilung zeigt Abbildung 2.15, wo um 14:00 Uhr 0%, um 15:00 Uhr 20% und schließlich um 19:00 Uhr 100% der einrollenden Mengen für den Abtransport im Versanddepot zur Verfügung stehen.

Für die im Hauptlauf zu transportierenden Mengen werden Gewicht und Volumen angegeben. Da es sich hier im Speziellen um eine KEP-Problemstellung handelt, können zur genaueren Planung weitere Kenngrößen angegeben werden. Die Anzahl an Paketen, Paletten und Dokumenten sind in der Praxis gängige Kenngrößen. Mit der Bezeichnung Palette sind standardisierte Europapaletten mit den Maßen 1200 x 800 x 144 mm (Länge x Breite x Höhe) gemeint.

Bei den im Hauptlauf eingesetzten Transportfahrzeugen handelt es sich in der Regel um *Wechselbrückenfahrzeuge* (Gliederzüge). Diese können generell zwei normierte *Ladegefäße* (Wechselaufbauten) aufnehmen. Diese sind autonome Fahrzeugaufbauten und können ohne Fahrzeug auf den Grund aufgeständert werden. Beim Umschlag werden sie vom LKW unterfahren und von ihm aufgeladen. Dazu wird kein Kran oder anderes Hilfsmittel benötigt. Da während des Belade- und Entladevorgangs kein ganzes Fahrzeug mit Fahrer benötigt wird, sondern nur ein Wechselaufbau gebunden ist, können Kosten gespart werden (Bretzke, 2008, S. 222). Da ihre Abmessungen genormt sind, ist der Übergang zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern und Fahrzeugen problemlos. Jedoch ist ihr Einsatz auf Europa begrenzt (Buchholz et al., 1998, S. 107).

Um die Auslastung der Ladegefäße berechnen zu können, müssen für sie in Bezug auf die Kenngrößen Kapazitäten vorgegeben werden. Für eine realitätsnahe Planung werden auch Informationen über die vorgesehenen Arten der Ladegefäße und deren Anzahl auf den einzelnen Hauptläufen und die Andockzeit eines bestimmten Ladegefäßes an den Toren der Standorte benötigt. Da bei KEP-Diensten die Transportmengen einer Relation ein Ladegefäß kaum ausreichend auslastet, kommt meistens eine Konsolidierung zur Anwendung. Hierbei findet ein gemeinsamer Transport von Mengen unterschiedlicher Relationen in einem Ladegefäß bis zu einem nächsten Standort auf dem Transportweg statt. Dort werden die Mengen entladen und gegebenenfalls für den nächsten Standort erneut konsolidiert. Durch solche zusätzlichen Umschläge in Hubs kann eine ausreichende Auslastung der Transportmittel erreicht werden. Der durch Einsatz von zusätzlichen zentralen Hubs erzielten wesentlich stärkeren Konsolidierung der Mengenströme innerhalb der Hauptläufe stehen jedoch Zusatzkosten und Zeitverzögerungen bei der Transportausführung gegenüber (Wlček, 1998, S. 40).

Im Zusammenhang mit der Konsolidierung von Mengen sind die genauen Transportwege der jeweiligen Relationen zu bestimmen. Dabei werden die strategisch festgelegten Netzstrukturen berücksichtigt. Die Bestimmung des Transportweges einer Relation umfasst die Angabe der Hubs, an denen umgeschlagen wird. Der Hauptlauf jeder Relation kann somit in mehrere *Transportverbindungen* zerlegt werden. Ist die Transportmenge einer Relation ausreichend groß, werden die Mengen ohne Konsolidierung direkt vom Versand- zum Empfangsdepot transportiert. Bei den KEP-Diensten handelt es sich in Bezug auf die einzelnen Relationen jedoch meistens um Mengenaufkommen, die kein ganzes Ladegefäß füllen. Des Weiteren werden die Mengen der einzelnen Relationen aufgrund der Einrollverteilung in der Regel mehrmals geteilt. So enthalten die Ladegefäße grundsätzlich Mengen aus mehreren Relationen.

Wegen der Aufsplittung einer Relation in mehrere Transportverbindungen werden die Transportmengen zwischen dem Versand- und dem Empfangsdepot vorwiegend auf verschiedenen Fahrzeugen transportiert, was eine zeitliche Abstimmung erforderlich macht. Diese zeitlichen Vorgaben ergeben sich aus der Ermittlung von frühesten und spätesten Abfahrtszeiten auf den einzelnen Transportverbindungen der Relationen. Diese sollen garantieren, dass der Transport der Mengen auf den betreffenden Transportverbindungen in den vorgegebenen Zeitfenstern erfolgt. Somit kann bewertet werden, wie viel Mengen der jeweiligen Relationen rechtzeitig am Empfangsdepot ankommen.

Aus der Festlegung der genauen Transportwege der jeweiligen Relationen und den zeitlichen Vorgaben können Fahrpläne der Linienverkehre bestimmt werden, welche den Ausgangspunkt für die konkrete Festlegung der Fahrzeugtouren bilden. Hierbei ist eine kostenminimale Realisierung der Transporte anzustreben. Dies beinhaltet etwa die Minimierung der Anzahl benötigter Fahrzeuge. Zusätzlich zu den zu beachtenden Zeitfenstern der ermittelten Mengenströme sind auch die vom Gesetzgeber vorgegebenen Lenk- und Ruhezeiten der Fahrer zu berücksichtigen. Weiterhin ist es sinnvoll, die einzelnen Touren der Fahrzeuge weitestgehend als Tagesrundläufe zu gestalten, bei denen die Fahrer und Fahrzeuge nach dem Einsatz wieder an ihren Startpunkt zurückkehren. Dies ermöglicht die Vermeidung von zusätzlichen Kosten, die z.B. beim auswärtigen Übernachten anfallen, begünstigt die Motivation der eingesetzten Fahrer und ermöglicht auch eine wirtschaftlichere Nutzung der Fahrzeuge, die häufig bestimmten Standorten zugewiesen sind und somit für weitere Transporte wieder bereitgestellt werden können. Ist es jedoch für lange Fahrten nicht möglich, in der zur Verfügung stehenden Zeit am selben Tag wieder an den Ausgangsort zurückzukommen, dann werden meistens sogenannte *Begegnungsverkehre* eingerichtet. Dabei transportieren zwei Fahrzeuge des gleichen Hauptlaufs ihre Ladungen in entgegengesetzter Richtung und tauschen die Ladegefäße ungefähr in der Mitte des Weges aus, um im Anschluss zu ihrem Startpunkt zurückzufahren. Zu den *geschlossenen Umläufen*, bei denen die benutzten Fahrzeuge innerhalb eines Tages wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren, können alternativ die Fahrzeugtransporte als *offene One-Way-Fahrten* oder *Mehrtagesumläufe* geplant werden. Während bei den One-Way-Fahrten für die Rückfahrt vom weit entfernten Zielort kein Mengentransport des Linienverkehrs vorliegt und somit noch eine geeignete Anschlussladung zu finden

ist, kehren bei Mehrtagesumläufen die Fahrzeuge nach Kombination unterschiedlicher Tagesfahrten zum Startpunkt zurück (Wlček, 1998, S. 42ff).

Nach Wlček (1998, S. 45) und unter Berücksichtigung der praktischen Vorgaben für diese Arbeit sind bei der Linienverkehrsplanung folgende Entscheidungen aufeinander aufbauend zu treffen (vergleiche auch Abschnitt 3.4.5):

- Bestimmung der Transportwege je Relation,
- Bündelung der Mengen zu Ladegefäßladungen,
- Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen und
- Bestimmung der genauen Touren der Fahrzeuge mit Identifizierung von geschlossenen Umläufen, Begegnungsverkehren, One-Way-Fahrten und Mehrtagesumläufen.

Zur Lösung dieser komplexen Problemstellungen sind unter anderem sogenannte Service-Netz-Design-Modelle geeignet. Im Kapitel 3 wird dazu u.a. das allgemeine Modell entsprechender Problemstellungen beschrieben und für unterschiedliche Praxisbeispiele verschiedene Lösungsansätze aufgezeigt.

2.3.5. Operative Planung

In der operativen Planung sollen in der Regel für alle innerhalb eines Tages zu transportierenden Sendungen die Transporte in einem genauen durchführbaren zulässigen Plan vor der Transportausführung festgelegt werden. Die Ergebnisse aus der strategischen und taktischen Planung bilden dafür die Grundlage. Daraus resultieren unterschiedliche voneinander unabhängige Entscheidungsprobleme für die Disposition der Flächenverkehre im Nahverkehr und die Fernverkehre.

Disposition der Flächenverkehre

Während der kurzfristigen Nahverkehrsplanung sind für die Sendungen die täglich zu realisierenden Flächenverkehre im Vor- und Nachlauf zu planen. Dazu stehen für die einzelnen Depots meistens nur die Daten über die ankommenden Sendungen zur Verfügung, die als Sammelladungen schon auf ihrem Hauptlauf transportiert werden. Hierbei werden die Sendungen, die ihren Nachlauf von dem gewählten Depot aus beginnen, dem Tourgebiet zugewiesen, in dem der entsprechende Zielort liegt. Durch einen Ausgleich zwischen den einzelnen Tourgebieten oder durch die Zurverfügungstellung weiterer Fahrzeuge können bezüglich der Kapazität überlastete Gebiete vermieden werden. Im Gegensatz dazu gestaltet sich die operative Planung für den Vorlauf deutlich schwieriger, da die Vorhersage des Sendungsaufkommens nicht gut prognostizierbar ist. Entweder sind Information über abzuholende Sendungen bereits am Morgen vorhanden oder stehen im Tagesverlauf zur Verfügung. Teilweise sind exakte Daten über die zu transportierenden Sendungen erst bei der Abholung verfügbar. Somit können einige damit verbundene Entscheidungen

nicht vor, sondern erst während der Transportausführung geplant werden. Aufgrund der nicht gesicherten Informationen können z.B. Änderungen der in der taktischen Planung festgelegten Tourgebiete so gut wie nicht vermieden werden. Sind im Rahmen der operativen Planung Informationen über abzuholende Sendungen verfügbar, ist für sie der Weitertransport im Transportnetz bestimmbar. Hierin besteht nun die Schnittstelle zur Fernverkehrsplanung. Für zusätzliche Informationen zur Disposition der Flächenverkehre siehe Wlček (1998, S. 46f) oder Bock (2004, S. 59).

Fernverkehrsplanung

Im operativen Bereich müssen bezüglich des Fernverkehrs für den aktuellen Tag die exakten Transportwege der einzelnen schon bekannten Sendungen bestimmt werden. Im Vergleich dazu wurde in der taktischen Planung festgelegt, wie im Standardfall die konsolidierten Sendungen (Mengen) für jede Relation zu befördern sind. Hierbei ist dem Disponenten bekannt, wie viel Ladegefäße und Fahrzeuge für jeden Hauptlauf zur Verfügung stehen. Hinsichtlich der operativen Planung lassen sich für die Fernverkehrsplanung folgende Teilprobleme ausmachen (Stumpf, 1998, S. 67):

- Bestimmung des Transportverlaufs der einzelnen Sendung,
- Festlegung der genauen Tourverläufe und Zeitpläne,
- Bereitstellung der einzusetzenden Fahrzeuge und
- Personaleinsatzplanung.

Da die im KEP-Markt zu transportierenden relationsbezogenen Sendungen meist ein Fernverkehrsfahrzeug einzeln nicht ausreichend auslasten, werden diese indirekt über einen Umschlag im Versand- und Empfangsdepot und weiteren möglichen Umschlag in Hubs vom Versender zum Empfänger transportiert (siehe Abschnitt 2.3.2). Hierfür bildet das in der taktischen Planung festgelegte Gerüst von vorhandenen Linienverkehren die Grundlage. Um flexibel mit diesen Linientransporten umzugehen, muss in jeder Planung überprüft werden, ob die Ausführung der einzelnen empfohlenen Linien zweckmäßig ist und ob die einzelnen betrachteten Sendungen auf dem gewählten Transportweg komplett oder teilweise zu befördern sind. Die dadurch erzielten Ergebnisse können für eine immer währende Anpassung der vorgeschlagenen Linienverkehre und für die bezüglich des Transportaufkommens basierende Annahmen verwendet werden. Sind die genauen Tourverläufe festgelegt, können schließlich passende Ladegefäße und Fahrzeuge bereitgestellt werden. Hierbei muss vor allem die benötigte Kapazität auf den Hauptläufen Beachtung finden.

Für die Nah- und Fernverkehrsplanung auf der operativen Ebene befinden sich in der Literatur eine Vielzahl von verschiedenen Modellformulierungen. Hierbei sind es zur Nahverkehrsplanung meist Ansätze aus der Tourenplanung und für die Fernverkehrsplanung kommen häufig spezielle Pickup and Delivery Modelle zum Einsatz (Parragh et al. (2008a), Parragh et al. (2008b)). Für weiterführende Literatur wird auf Stumpf (1998,

S. 66ff) und Bock (2004, S. 85ff) verwiesen.

2.4. Internationale Logistik

Bei einer umfassenden Betrachtung der internationalen Logistik entfaltet sich die Komplexität logistischer Vorgänge, die sich über Ländergrenzen hinaus erstrecken. Im Folgenden werden für diese Arbeit relevante Aspekte der internationalen Logistik besprochen.

2.4.1. Merkmale der internationalen Logistik

Bei genauerer Betrachtung existieren klare Unterschiede zwischen nationaler und internationaler Logistik (Pfohl, 2004b, S. 369). Zur Untersuchung der Auswirkungen der Internationalisierung auf international tätige KEP-Dienstleister kommen die für diese Arbeit relevanten Funktionen auf der Ausführungsebene in Betracht. Diese wurden im Abschnitt 2.1 als TUIL-Prozesse bezeichnet. Um die Sendungen in der richtigen Gestalt und Menge zeitlich/räumlich korrekt transportieren zu können, muss das Logistikunternehmen zunächst aus administrativer Sicht die Sendungen identifizieren und unterscheiden können. Da durch den technischen Fortschritt und durch die Globalisierung der Wirtschaft die Produkte komplexer und vielfältiger geworden sind, wird die Internationalisierung die Bedeutung von produktabhängigen, ausbaufähigen Identifikationsschemata vergrößern (Schieck, 2008, S. 79). Hinsichtlich der KEP-Dienste hat dies beispielsweise Einfluss auf die Entscheidung, in welcher Einheit - z.B. Anzahl, Gewicht, Volumen - die Sendungen logistisch geführt werden, und auf die eindeutige Kennzeichnung und Katalogisierung dieser Sendungen. Neben den administrativen Aufgaben müssen die Sendungen auf ihrem Weg durch das Unternehmen (z.B. KEP-Dienstleister) auch physisch immer neuen Vorgängen bezüglich der Ordnung unterworfen werden. Diese Ordnungsprozesse können in den Bereichen der Verpackung, der Verladung, des Transportierens, des Lagerns und der Kommissionierung auftreten. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse jedes einzelnen physischen Ordnungsprozesses durch Transportdokumente und Markierung der Sendungen festzuhalten sind (Gudehus (2005), S. 59, Ullmer-Schulz & Böttger (1997), S. 65). Aus Sicht der Internationalisierung sind diese Ordnungsprozesse durch die schon erwähnten komplexeren und vielfältigeren Sendungen wichtiger und schwieriger. Verstärkt wird dies durch die meist intermodalen[16] Transportprozesse, die durch wiederholte Konsolidierungs- und Dekonsolidierungsschritte zu ständigen Neuordnungen der Sendungen führen (vergleiche dazu Abschnitt 2.3.2). Hierbei ist es für KEP-Dienstleister wichtig, die Unversehrtheit der Sendungen bei ihrem Transport durch die mehrgliedrige Transportkette zu erhalten. Dies benötigt erhöhten Aufwand bei der Auftragsabwicklung.

[16]Kombination unterschiedlicher Verkehrsträger

Die bei internationalen gegenüber nationalen logistischen Aktivitäten bezüglich der Beförderung auftretenden Unterschiede sind vor allem größere Reichweiten, längere Durchlaufzeiten und komplexere Transportketten. Weiterhin beteiligen sich mehr Akteure an deren Abwicklung und verursachen höhere Kosten. Die mit der Internationalisierung steigende Komplexität der Transportkette (mehrgliedrig) hat direkten Einfluss auf die Häufigkeit und Bedeutung der Umschlagaktivitäten. Hierbei müssen Fahrpläne und Umschlagkapazitäten innerhalb einer Transportkette aufeinander abgestimmt werden.

Bezüglich der Lagerung und des Verpackens der Sendungen kann die Internationalisierung für KEP-Dienstleister ebenfalls Auswirkungen haben. Besonders in den Umschlagpunkten der Transportketten muss die Verpackung die Sendungen bei Umschlag und Zwischenlagerung vor Beschädigung und Diebstahl schützen. Weiterhin kommt hinzu, dass die Packmittel im internationalen Bereich nicht immer frei wählbar sind. Beispielsweise verbieten Länder zum Schutz ihres Ökosystems den Import unbehandelter organischer Packmittel (Schieck, 2008, S. 89). Mögliche Auswirkungen der Internationalisierung auf weitere Funktionen wie z.B. die der Führungsebene (Management) werden hier nicht weiter besprochen.

2.4.2. Grenzüberschreitender Güterverkehr

In der hier vorliegenden Arbeit wird aufgrund von praktischen Vorgaben und den bezüglich Europa vorliegenden Vorteilen des Verkehrsträgers Straße von der Durchführung der Transportleistung auf diesem Verkehrsträger ausgegangen.

Über lange Zeit war der Transport auf der Straße ein nahezu nationaler Verkehr. Das Wachstum der Verkehrsleistung erfolgte über lange Zeit weitestgehend innerhalb der staatlichen Grenzen. Mittlerweile sind für viele Transportunternehmen grenzüberschreitende Güterkraftverkehre innerhalb der EU, in den nahen und mittleren Osten und nach Nordafrika normal. Beispielsweise betrug hinsichtlich des grenzüberschreitenden Güterverkehrs die Anzahl der Ein- und Durchfahrten von LKWs in Deutschland 1990 rund 10,28 Millionen und 2004 ca. 21,601 Millionen (o.V., 2007b, S. 178). Ähnliche Entwicklungen sind auch in der Nordamerikanischen Freihandelszone (NAFTA) zwischen Kanada, Mexiko und den USA zu beobachten (Wood et al., 2002, S. 216).

Weltweit betrachtet hat der grenzüberschreitende Straßengüterverkehr gegenüber den anderen Verkehrsträgern einen geringen Anteil. In Westeuropa ist er dabei noch wesentlich größer als in Osteuropa, Asien oder in Südamerika. Dafür können geographische Gegebenheiten, politisch-administrative Grundlagen oder Ausbau und Zustand der Straßennetze als Gründe vorgebracht werden. Unbestreitbar ist aber, dass der Anteil des Straßengüterverkehrs in den Vor- und Nachläufen grenzüberschreitender Transporte sehr bedeutend ist. Die erbrachten Transportleistungen der Seegüter- und Luftfrachtverkehre wären ohne die Vor- und Nachläufe der Straßenverkehre nicht denk-

bar.

Hinsichtlich des europäischen Transportnetzes wurde in den 1950er Jahren von 18 europäischen Ländern ein Netz von zwischen- und überstaatlichen Durchgangsstraßen mit einer Länge von etwa 50.000 km geplant. Zum größten Teil ist dies heute fertiggestellt (Woitschützke, 2006, S. 160). Die wichtigsten deutschen Autobahnen sind ein Bestandteil dieses Straßennetzes. Deren Anteil am europäischen Netz beträgt etwa 22% (Cardeneo, 2004, S. C3-9). Beispielsweise verläuft die Europastraße E 40 von Calais quer durch Deutschland über die Autobahnen A 4 und A 5 bis nahe zur Grenze zu China in Kasachstan.

Die seit 1996 betriebene Planung Transeuropäischer Netze (TEN) verfolgt den Aus- und Neubau des europäischen Straßennetzes. Das Grundgerüst dazu bilden die großen West-Ost- und Nord-Süd-Achsen. Realisiert werden die Achsen meist durch den Bau von mehrspurigen und kreuzungsfreien Straßen. Zwecks der Vermeidung von Umwegen und der Verbesserung der Verkehrsflüsse wird das europäische Straßennetz durch Sonderbauten gestützt. Beispiele dazu sind die Öresundquerung zwischen Dänemark und Schweden oder der Eurotunnel zwischen England und Frankreich, durch den LKWs in leistungsfähigen Pendelverkehren auf der Schiene huckepack befördert werden. Hinzu kommen die als Straßen- und Eisenbahntunnel umgesetzten Verkehrskorridore, die den Transit über die Alpen für die Nord-Süd-Verkehrsströme Europas garantieren sollen (Woitschützke, 2006, S. 170).

Im Gegensatz zur Containerschifffahrt mit Konzentration auf Megaports (Größenkonzentration) oder zum Luftfrachtverkehr, wo etwa 20 Flughäfen den Löwenanteil der weltweit geflogenen Luftfracht abfertigen, ist der Straßengüterverkehr durch eine Fülle kleiner, über die kontinentalen Flächen verstreute Umschlagpunkte charakterisiert. Daraus lässt sich auch die Stärke des Verkehrsträgers Straße ableiten: die Bildung feinmaschiger Netze. Neben den kleinen Umschlagpunkten gibt es auch Knoten mit hoher Intensität, die besonders für internationale Transporte von Bedeutung sind. In ihnen werden oft zusätzliche logistische Aufgaben wie Lagerung oder Verpackung wahrgenommen. Dort befinden sich häufig auch für die Logistikbranche wichtige Dienstleister wie Zollbehörden, Banken oder Versicherungen.

Knoten mit hoher Intensität in der nationalen und internationalen Logistik sind einerseits Häfen und Terminals der anderen Verkehrsträger, sofern diese Kraftfahrzeuge für die Organisation ihrer Vor- und Nachläufe benötigen. Andererseits unterhalten große Logistikdienstleister wie z.B. große Speditionen oder KEP-Dienste für ihre Stückgutverkehre große Netze, in deren Hubs Transport- und Umschlagaktivitäten in großer Intensität durchgeführt werden (Fleischmann, 2004b, S. A1-16). Sehr wichtige Knoten für den Straßengüterverkehr sind die seit Anfang der 1980er Jahre in Europa entstandenen Güterverkehrszentren (GVZ). In ihnen befinden sich mindestens zwei Verkehrsträger, die sich mit Anlagen ergänzen und die dabei Platz für die Durchführung wichtiger transformationeller und transaktioneller Dienstleistung bieten (Fleischmann, 2004b, S. A1-18).

Als Transportmittel im nationalen und internationalen Straßengüterfernverkehr werden heute vor allem Glieder- und Sattelzüge eingesetzt. Dominiert wird der europaweite Straßengüterverkehr durch den Sattelzug, da er ein geringeren Investitions- und Betriebsaufwand sowie einen Zeitvorteil beim Umschlag hat. Für den Gliederzug sprechen größere Flexibilität, Vorteile im innerstädtischen Verkehr und größere Ladekapazitäten. Diese Transportmittel transportieren die Stückgüter vor allem auf Paletten und in Behältern wie Wechselaufbauten, ISO-Container oder Binnencontainer. Bei den KEP-Diensten kommen häufig Wechselaufbauten zur Anwendung (siehe Abschnitt 2.3.4).

Beeinflusst wird der internationale Straßengüterverkehr durch vielfältige Gesetze, die meist durch nationale Vorgaben festgelegt sind. So sind z.B. die Entwicklung, Herstellung und Instandhaltung der Infrastruktur des Straßengüterverkehrs in vielen Ländern durch Gesetze geregelt, wie z.B. Standards für Straßenquerschnitte und zulässige Kurvenradien oder die erlaubten Maße, Lasten und Gewichte sowie Vorschriften für zulässige Emissionen der Straßenfahrzeuge. Aus betrieblicher Sicht gibt es nationale Unterschiede wie z.B. in der Ausbildungsanforderung an die Fahrzeugführer, ihre Lenk- und Ruhezeiten, bei den Fahrverboten an Sonn- und Feiertagen oder in den Verkehrsregeln.

Aus verkehrspolitischer Sicht war für lange Zeit in Deutschland der Marktzugang im Straßengüterverkehr umfassend geregelt. Dadurch sollte der Schienengüterverkehr gestärkt werden. Ähnlich entwickelten sich die Märkte in anderen Industriestaaten. Jedoch begann man, diese Regulierungsmaßnahmen bald wieder abzuschaffen. Innerhalb der Europäischen Union vollzog sich dies ab Mitte der 1980er Jahre. Durch Deregulierungen wurden Marktzugangsbeschränkungen und Tarifbindungen aufgehoben. Heute stellt sich der Straßengüterfernverkehr innerhalb der EU als dereguliert dar. Jedoch gibt es immer noch unterschiedliche Steuersätze, Markt- und Wettbewerbsstörungen (Ihde, 2001, S. 178).

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für den internationalen Straßengüterverkehr sind die Kosten der einzelnen Standorte (Depots, Hubs) der Unternehmung. Sie hängen vom allgemeinen Lohnniveau, von den Kosten für Sozial- und Arbeitsschutzvorschriften, von der Höhe der Steuern und Abgaben, von Treibstoffkosten usw. ab. Die Standortfrage ist auch innerhalb der EU von großer Wichtigkeit, da die einzelnen Kostenbestandteile zwischen den Staaten nicht angepasst sind. Die Straßengüterverkehrsanbieter in den Hochlohnländern müssen die Kosten- und Preisdifferenzen durch eine höhere Produktivität oder durch zusätzliche Leistungsangebote ausgleichen (Schieck, 2008, S. 275).

2.4.3. Internationale Netze

Bei der Gestaltung von paneuropäischen Netzen müssen vorhandene nationale Netze verkettet werden. Hierbei sind vor allem die in Westeuropa realisierten Hub-Systeme hilfreich. Denn aufgrund des geringeren Sendungsaufkommen auf den einzelnen europaweiten Relationen sind die Konsolidierungswirkungen von großer Bedeutung. Es ist unrealistisch, ein engmaschiges europäisches Netz auf Grundlage hochfrequenter (direkter) Linienverkehre wie auf nationaler Ebene zu errichten.

Aus praktischer Sicht ist die Gestaltung paneuropäischer Netze etwas komplexer als die einfache Verkettung nationaler Netze. So existieren in den national gewachsenen Strukturen zwischen Logistikdienstleistern bilaterale Beziehungen, die zunächst mit viel Geld aufgebrochen werden müssen (Beispiel: „Die Post gibt sich UPS und Fedex geschlagen“ (o.V., 2008a)). Weiterhin müssen Partner aus unterschiedlichen Ländern die Bereitschaft zeigen, untereinander besonders eng zusammenzuarbeiten. Sonst kann ein offenes Netz entstehen, das keine geschlossene Einheit bildet. Sendungen von Leipzig nach London können dort z.B. auf einen anderen Partner treffen als Sendungen aus Barcelona. Die Vielfalt der möglichen Netzverkettungen oder fehlende Kapitalkraft von Kooperationsunternehmen[17] sind weitere Anzeichen für die Schwierigkeit, flächendeckende europäische Netze aufzubauen (Bretzke, 2008, S. 235f).

Bei Betrachtung bezüglich der Aufgabenstellung dieser Arbeit relevante Einflussfaktoren sind die Geographie und Struktur der Transportketten, der Typ der einzusetzenden Verkehrsträger und Größe und Frequenz der auf den Kanten des Netzes zu transportierenden Sendungen in den Mittelpunkt zu stellen. Daraus lässt sich ein Merkmalskatalog für Transportnetze ableiten, der für nationale, kontinentale und interkontinentale Netze unterschiedliche Ausprägung hat. In Tabelle 2.1 werden dabei nur Merkmale für nationale und internationale Netze bezüglich Europa berücksichtigt und es wird die vollständige Transportkette vom Versender zum Empfänger für KEP-Dienste betrachtet.

Beim Vergleich der Netze bestehen die meisten Gemeinsamkeiten zwischen nationalen und kontinentalen Transportnetzen. Die bei kontinentalen und interkontinentalen Netzen verwendeten internationalen Hubs dienen als Eintritts- und Austrittspunkt zum nationalen Netz. Zu diesem internationalen Hub werden die Sendungen vom Versanddepot aus direkt oder über ein Hub transportiert und nach ihrem Empfängerland sortiert. Der Transport zum Empfangsdepot erfolgt wiederum direkt oder über ein Hub. Der Luftverkehr wird häufig von KEP-Diensten in Kombination mit dem Straßenverkehr eingesetzt (Höppner, 2000, S. 137). Wegen langer Transportzeiten im Schienenverkehr kommt die Bahn für den kombinierten Verkehr in der KEP-Branche kaum in Frage. Bei kontinentalen und interkontinentalen Netzen stehen die Transportkosten im Mittelpunkt der Optimierung von Netzen, da der Verkehrsträger Luftverkehr und die großen

[17] Unter dem Begriff Kooperationsunternehmen (englisch: Joint Venture) ist eine gemeinsame Tochtergesellschaft von mindestens zwei rechtlich und wirtschaftlich getrennten Unternehmen zu verstehen.

Ausprägung	national (Europa)	kontinental (Europa)	interkontinental
Netzstruktur	gemischtes Transportnetz	gemischtes Transportnetz Verkehre über internationale Hubs	gemischtes Transportnetz Verkehre über internationale Hubs
Anzahl Hubumschläge	meistens 1	häufig > 1	> 1
Direktverkehre Hubverkehre	häufig häufig	selten häufig	- immer
Verkehrsträger Flächenverkehr Fernverkehr	 Straßenverkehr Straßenverkehr	 Straßenverkehr Straßenverkehr Luftverkehr kombinierter Verkehr	 Straßenverkehr Straßenverkehr Luftverkehr kombinierter Verkehr
Servicezeit	24 Stunden	24 - 96 Stunden	$\geq$ 48 Stunden
Häufigkeit der Verkehre	täglich	selten täglich	selten täglich
Optimierung	Transportzeit Transportkosten	Transportkosten	Transportkosten

Tabelle 2.1.: Hauptmerkmale für nationale, kontinentale und interkontinentale Transportnetze der KEP-Branche

Entfernungen relativ hohe Kosten verursachen.

Die sich durch die Unterschiede zwischen nationalen und internationalen Netzen ergebenden Auswirkungen auf die Optimierung der europaweiten Linienverkehrsplanung sind vielfältiger Natur:

- Mehr Hubverkehre müssen eingeplant werden.
- Aus mehr Hubverkehren folgt eine häufigere Konsolidierung von Mengen.
- Standorteigenschaften wie Umschlagkapazität und Anzahl Eingangstore bekommen durch mehr Hubverkehre in der Optimierung ein größeres Gewicht.
- Netzeigenschaften wie z.B. Transportgeschwindigkeit oder Öffnungszeiten an den Standorten können von Land zu Land unterschiedlich sein.
- Durch die längere Transportkette und damit verbundene höhere Anzahl von Hubumschlägen und längere Servicezeiten für eine Relation können unterschiedliche Relationen mit dem gleichen Fahrzeug transportiert werden, die an zueinander

passenden Tageszeiten aber an unterschiedlichen Tagen zum Abtransport zur Verfügung stehen.

- Bei der Durchführung der Verkehre müssen Hauptläufe nicht jeden Tag bedient werden (Frequenzen der Verkehre).
- Durch den kombinierten Verkehr ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsträger in der Planung erforderlich.
- Beim Ausgleich zwischen den konkurrierenden Optimierungszielen „Maximierung des Servicegrades“ und „Minimierung der Transportkosten“ bekommt das letztere Ziel ein höheres Gewicht.

Welche Auswirkungen nun konkret in der hier zu behandelten Problemstellung berücksichtigt werden, zeigt Kapitel 4.

3. Verwandte Probleme in der Literatur

Die taktische Planung im Allgemeinen betrachtet eine Vielzahl von in Wechselbeziehung stehenden Entscheidungen zur Sicherung der optimalen Bereitstellung und Auslastung von Ressourcen (z.B. Fahrzeuge oder Ladegefäße), um die ökonomischen Ziele zu erreichen. Diese Planungsebene ist im Besonderen für Unternehmen relevant, die durch den Transport von Sendungen durch das Netz Dienstleistungen erbringen und hierbei intensiven Gebrauch von Konsolidierungsmaßnahmen machen. Die Problemstellung der Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste ist ein klassisches Beispiel für diese Planungsebene. Problemstellungen der Linienverkehrsplanung werden häufig als *Service Netz Design Probleme* (SND-Problem) modelliert. Die Einführung von SND-Problemen im Abschnitt 3.2 baut auf die zuvor im Abschnitt 3.1 eingeführten Mehrgüter-Netz-Flussprobleme auf. Eine Form der Netzdarstellung sind sogenannte Zeit-Raum-Netze, die Inhalt des Abschnitts 3.3 sind. Anschließend werden im Abschnitt 3.4 zu den SND-Problemen fünf unterschiedliche Anwendungsbeispiele behandelt.

3.1. Mehrgüter-Netz-Flussprobleme

Mit Mehrgüter-Netz-Flussproblemen (englisch: multi-commodity network flow, MCNF) können sogenannte Umlade- oder Netzflussprobleme dargestellt werden. Hierbei sind kostenoptimal durch ein logistisches Netz unter Berücksichtigung kapazitätsbeschränkter Transportwege unterschiedliche Güter zu befördern. Eine formale Darstellung für das MCNF-Problem kann durch einen Digraphen $G = (N, A)$ mit N als der Menge aller Standorte (Knoten) wie Depots und Hubs und A als der Menge aller Pfeile zwischen den Standorten, durch die Kapazitäten $u_{i,j}$ auf den Pfeilen $(i, j) \in A$ sowie durch eine Menge K von Gütern dargestellt werden. Dabei wird für jedes Gut $k \in K$ ein Versanddepot $o(k) \in N$ und Empfangsdepot $d(k) \in N$, die zu transportierende Menge b_k und die variablen Kosten $c^k_{i,j}$ für den Transport einer Einheit des Gutes k über den Pfeil $(i, j) \in A$ definiert. In der Literatur werden für das MCNF-Problem unterschiedliche Modelle behandelt, wie z.B. Pfad-, Baum- oder Bogen-Formulierungen (Irnich, 2002, S. 26). Im Folgenden soll die Pfad-Formulierung näher vorgestellt werden.

Die Pfad-Formulierung in einem MCNF-Problem zeichnet sich dadurch aus, dass für jedes Gut $k \in K$ durch P^k die Menge aller Pfade vom Versanddepot $o(k) \in N$ zum

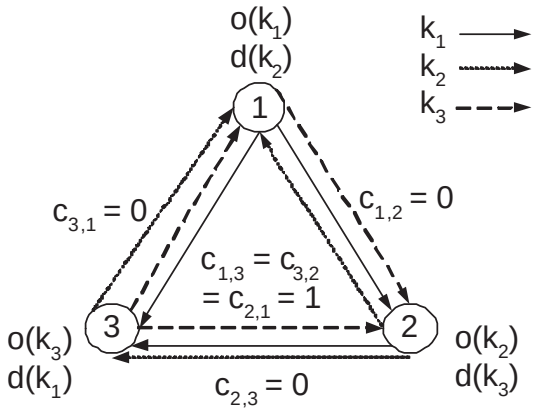

Abbildung 3.1.: Beispiel für eine nicht ganzzahlige Lösung eines MCNF-Problems (in Anlehnung an Irnich (2002, S. 30))

Empfangsdepot $d(k) \in N$ gegeben ist, wobei jeder Knoten maximal einmal in einem Pfad enthalten ist. Die Variable x_{p^k} repräsentiert bezogen auf b_k den Anteil des Flusses von Gut k auf dem Pfad p^k. Weiterhin werden noch die Werte $\delta_{i,j}^{p^k} \in \{0,1\}$ definiert, welche angeben, ob ein Pfeil $(i,j) \in A$ zum Pfad p^k gehört oder nicht. Mit $c_{p^k} = \sum_{(i,j)\in A} \delta_{i,j}^{p^k} c_{i,j}^k$ sind die Kosten des Pfads p^k gegeben. Daraus ergibt sich folgendes Modell:

$$\min \sum_{k\in K} \sum_{p^k \in P^k} c_{p^k} x_{p^k} \tag{3.1}$$

$$\sum_{k\in K} b_k \sum_{p^k \in P^k} \delta_{i,j}^{p^k} x_{p^k} \leq u_{i,j}, \qquad \forall (i,j) \in A \tag{3.2}$$

$$\sum_{p^k \in P^k} x_{p^k} = 1, \qquad \forall k \in K \tag{3.3}$$

$$x_p^k \geq 0, \qquad \forall k \in K, p^k \in P^k \tag{3.4}$$

Die Minimierung der Kosten aller gewählten Pfade erfolgt durch die Zielfunktion (3.1). Die Restriktion (3.2) stellt die Einhaltung der Kapazität $u_{i,j}$ auf dem gewählten Pfeil (i,j) sicher. Mit der Restriktion (3.3) werden alle Bedarfe b_k durch das Netz geleitet. Dass alle gewählten Anteile von Flüssen auf den Pfaden größer gleich 0 sind, legt Restriktion (3.4) fest. Das Modell als Pfad-Formulierung hat $|K| + |A|$ Restriktionen. Die Zahl der Pfade $\sum_{k\in K} \left|P^k\right|$ wächst in einem allgemeinen Digraphen mit der Anzahl $|A|$ exponentiell. Mit vergleichbaren Modellen befassen sich z.B. Ahuja et al. (1993, S. 649ff), Farvolden et al. (1993) oder Kim et al. (1999).

Wenn das MCNF-Problem mehr als zwei Güter besitzt, dann muss die optimale Lösung keine ganzzahligen Flüsse besitzen (Irnich, 2002, S. 29). Dies gilt auch dann, wenn die Kapazitäten $u_{i,j}$ und Bedarfe b_k ganzzahlig sind. Abbildung 3.1 zeigt dazu ein Beispiel. Dabei sind mit $N = \{1,2,3\}$ und $A = \{(1,2),(2,3),(3,1),(1,3),(3,2),(2,1)\}$ ein Netz

$G = (N, A)$ und drei Güter $K = \{k_1, k_2, k_3\}$ dargestellt. Die Kosten bzw. Kapazitäten auf den Pfeilen sind unabhängig von k mit $c_{1,2} = c_{2,3} = c_{3,2} = 0$ und $c_{3,2} = c_{2,1} = c_{1,3} = 1$ bzw. $u_{i,j} = 1$ für alle Pfeile gegeben. Weiterhin muss das Gut k_i für $i = 1, 2, 3$ vom Versanddepot $o(k_i) = i$ zum Empfangsdepot $d(k_i) = 1 + ((i + 1)$ modulo $3)$ befördert werden. Mit den Flüssen $x^1_{1,2} = x^1_{2,3} = x^1_{1,3} = 1/2$, $x^2_{2,3} = x^2_{3,1} = x^2_{2,1} = 1/2$ und $x^3_{3,1} = x^3_{1,2} = x^3_{3,2} = 1/2$ erhalten wir die optimale Lösung. Das ganzzahlige MCNF-Problem lässt sich auf das Rucksack-Problem reduzieren, welches z.B. nach Garey & Johnson (1979) NP-schwer ist.

3.2. Service Netz Design Probleme

Service Netz Design Probleme (SND-Probleme) können als eine Weiterentwicklung von MCNF-Problemen betrachtet werden: Transporte z.B. durch Fahrzeuge entlang von Pfeilen sind durch die Einrichtung von *Services* möglich. Das Einrichten von Services entlang von Pfeilen kann einerseits Kosten verursachen und andererseits Transportkapazitäten auf Pfeilen bereitstellen. Hierbei wird die Abfolge verschiedener Services durch ein bestimmtes Transportmittel wie z.B. Fahrzeug als eine *Route* oder *Tour* bezeichnet: Ein Fahrzeug fährt von seinem Startpunkt aus verschiedene Standorte an und beendet seine Route wieder am Startpunkt. In Abhängigkeit des Planungshorizonts können SND-Probleme nach Crainic (2000) entweder mehr strategisch/taktische oder mehr taktisch/operative Fragestellungen behandeln. Bei der strategisch/taktischen Betrachtung (frequenz-orientiertes SND-Problem) werden z.B. die Typen von Routen der Transportmittel wie beispielsweise Hub-Routen (Umschlagen von Gütern), Pickup-Routen (Einladung von Gütern) oder Delivery-Routen (Ausladung von Gütern) oder die Häufigkeit der durchzuführenden Routen festgelegt. Taktisch/operative SND-Problemstellungen (dynamisches SND-Problem) konzentrieren sich mehr auf die Bestimmung von Fahrplänen. Die von Crainic (2000) empfohlene Klassifikation ist in Abbildung 3.2 in ihren relevanten Merkmalen zusammengefasst.

Bezüglich der Praxis können unterschiedliche SND-Probleme verschiedene Merkmale besitzen. Hierbei müssen in jedem dieser Probleme Entscheidungen getroffen werden, die z.B. nach Abschnitt 2.3.4 der Linienverkehrsplanung zuzuordnen sind. Eine Pfad-Formulierung als Erweiterung des Modells aus Abschnitt 3.1 wird im Folgenden als allgemeines SND-Problem beschrieben (Irnich, 2002, S. 31ff): Bei der Formulierung des SND-Problems ist das physische Netz in einem Digraphen $G = (N, A)$ dargestellt mit N als die Menge aller Standorte (Knoten), wie Depots und Hubs, und A als Menge aller Pfeile zwischen den Standorten. Weiterhin wird die Menge der Güter (Versandmengen) durch K beschrieben. Zur Menge der Standorte N gehören die Teilmengen O und D, welche alle Versanddepots bzw. alle Empfangsdepots darstellen. Ein Pfeil $(i, j) \in A$ stellt dabei einen möglichen Transport zwischen zwei Standorten dar. Ein Gut $k \in K$ ist durch ein Versanddepot $o(k) \in O$ und Empfangsdepot $d(k) \in D$ gegeben. Der Bedarf b^k muss innerhalb eines vorgegebenen Kundenservice-Typs (z.B. Zeitvorgaben) vom Versanddepot zum Empfangsdepot transportiert werden. Hierbei fallen variable Kosten $c^k_{i,j}$ für den

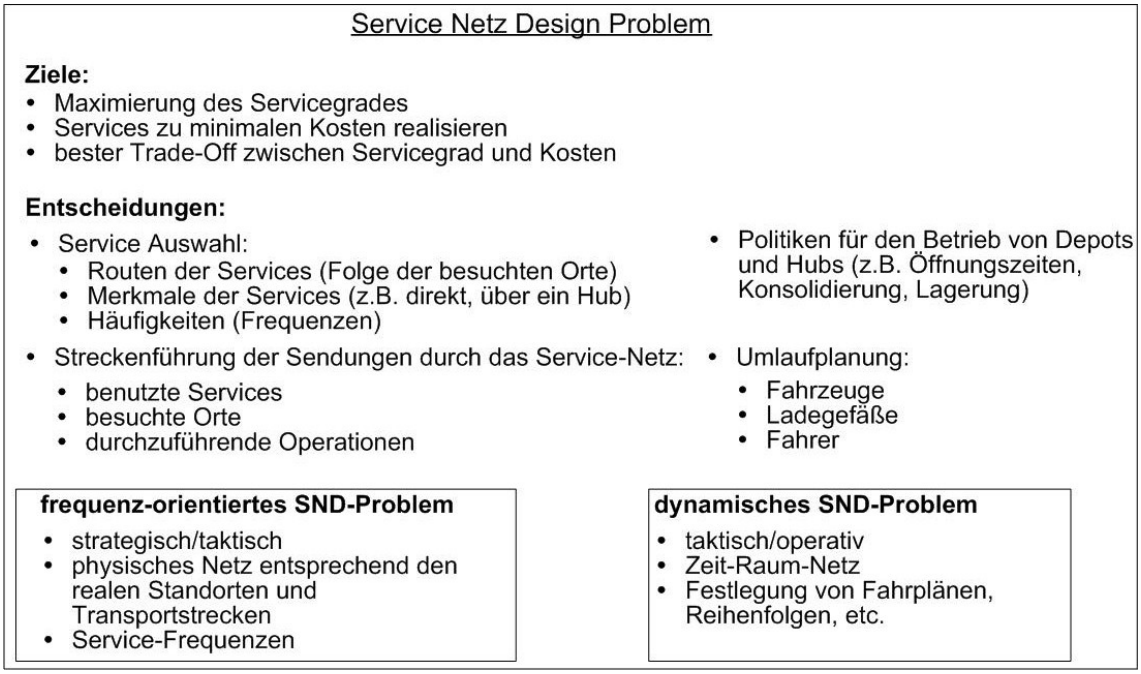

Abbildung 3.2.: Zusammenfassung der von Crainic (2000) vorgeschlagenen Klassifikation von SND-Problemen

Transport einer Einheit des Gutes k über den Pfeil $(i, j) \in A$ an.

Um die Transporte im Netz durchführen zu können, stehen bestimmte Fahrzeugtypen $f \in F$ mit genau vorgegebenen Kapazitäten u^f zur Verfügung. Dabei wird nur ein Kapazitätsmaß (z.B. Gewicht) angenommen. Die Kosten $h^f_{i,j}$ kommen durch die einmalige Ausführung des Transportes (Service) über den Pfeil $(i, j) \in A$ mit Fahrzeug f zustande. Die Menge P gibt alle im Netz möglichen Pfade von einem Versand- zu einem Empfangsdepot an. Wie oben schon definiert, ist ein Pfad $p \in P$ ein Weg von einem Versanddepot $o \in O$ zu einem Empfangsdepot $d \in D$. In einem Pfad kommt jeder Standort maximal einmal vor. Abbildung 3.3 stellt einen solchen Pfad dar. Diese Pfade können charakterisiert sein durch Merkmale wie Verkehrsträger, Geschwindigkeit, Fahrzeugtyp, Priorität der Lieferung oder die vorhandenen Kapazitäten. $P^k \in P$ bezeichnet alle möglichen Pfade zur Beförderung des Gutes k. Die Menge der Routen der Fahrzeuge $f \in F$ ist definiert durch R. R^f ist die Teilmenge der Routen R, welche mit dem Fahrzeug f durchgeführt werden.

Als Entscheidungsvariablen werden y^f_r und x^k_p bestimmt. Die ganzzahlige Variable y^f_r modelliert die Entscheidung, wie viel Fahrzeuge von Typ $f \in F$ verwendet werden, um die Route $r \in R$ zu bedienen. Die zweite Entscheidungsvariable x^k_p repräsentiert die Transportmenge des Gutes $k \in K$, die über den Pfad $p \in P$ transportiert wird. Zusätzlich werden noch drei Koeffizienten $\alpha^r_{i,j}$, β^r_i und $\delta^p_{i,j}$ benötigt. $\alpha^r_{i,j}$ zeigt an, ob der Pfeil (i, j) zur Route r gehört $(= 1)$ oder nicht $(= 0)$. β^r_i hat den Wert 1, wenn die Route r vom Knoten i aus startet und -1, wenn Route r im Knoten i endet. $\delta^p_{i,j}$ ist 1,

Abbildung 3.3.: Pfad in einem SND-Problem

wenn der Pfeil (i, j) in Pfad p vorkommt und sonst 0. Die Fixkosten für das Bedienen einer Route r mit Fahrzeug f ergeben sich aus $h_r^f = \sum_{(i,j)\in A} \alpha_{i,j}^r h_{i,j}^f$. Variable Kosten für den Güterfluss einer Einheit des Gutes k entlang des Pfades p sind $c_p^k = \sum_{(i,j)\in A} \delta_{i,j}^p c_{i,j}^k$.

Hieraus ergibt sich folgende Pfad-Formulierung:

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{r \in R^f} h_r^f y_r^f + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} c_p^k x_p^k \tag{3.5}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} \delta_{i,j}^p x_p^k \leq \sum_{f \in F} \sum_{r \in R^f} u^f y_r^f \alpha_{i,j}^r, \qquad \forall (i,j) \in A \tag{3.6}$$

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = d^k, \qquad \forall k \in K \tag{3.7}$$

$$\sum_{r \in R^f} \beta_i^r y_r^f = 0, \qquad \forall i \in N, f \in F \tag{3.8}$$

$$x_p^k \geq 0, \qquad \forall k \in K, p \in P^k \tag{3.9}$$

$$y_r^f \geq 0 \text{ und ganzzahlig}, \qquad \forall r \in R^f, f \in F \tag{3.10}$$

Die Zielfunktion (3.5) des SND-Problems minimiert die Summe der Fixkosten für die Benutzung einer Route und Abwicklungskosten pro Einheit eines Gutes. Die Restriktion (3.6) stellt sicher, dass die Kapazitäten der Fahrzeuge eingehalten werden. Mit Nebenbedingung (3.7) werden alle Bedarfe von Sendungen eines Gutes gedeckt. Dass Touren gebildet werden, gewährleistet Restriktion (3.8). Hierbei muss die Anzahl der Routen, die am Standort i starten und enden, gleich sein. Die Restriktionen (3.9) und (3.10) garantieren, dass die Entscheidungsvariablen nicht negativ und die y-Variablen ganzzahlig sind. Das Modell als Pfad-Formulierung hat $|K|+|A|+|N|*|F|$ Restriktionen. Die Zahl der Pfade $|P|$ wächst in einem allgemeinen Digraphen mit der Anzahl der Knoten $|A|$ exponentiell.

Dieses Modell ist erweiterbar, indem Bedingungen wie z.B. Servicezeiten, Zeitfenster, Standorteigenschaften oder unterschiedliche Kenngrößen berücksichtigt werden. Die Zielfunktion muss nicht nur die Minimierung von Kosten, sondern kann bspw. auch die Maximierung des Servicegrades beinhalten (siehe dazu Kapitel 4).

Zu den unterschiedlichen SND-Problemen existieren auch verschiedene Modellierungs- und Lösungsansätze. Barnhart & Kim (1999) liefern einen allgemeinen Überblick zu Modellformulierungen von SND-Problemen und ein allgemeines Lösungsverfahren. Unterschiedliche verallgemeinerte Problemstellungen einschließlich Modellformulierungen beinhalten die Arbeiten von Crainic (2000, 2003) und Jarrah et al. (2009) für den Stückguttransport im Fernverkehr, Christiansen et al. (2004) und Christiansen et al. (2007) für den Seetransport, Cordeau et al. (1998) und Ceselli et al. (2008) für den Schienentransport und Crainic & Kim (2007) für den intermodalen Verkehr. Pedersen et al. (2009) berücksichtigen für beliebige verallgemeinerte Problemstellungen Restriktionen, die ein Gleichgewicht zwischen den eingehenden und ausgehenden Ressourcen (z.B. Fahrzeuge) an einem Depot/Hub bewirken. Als allgemeine Übersichten sind die Arbeiten von Magnanti & Wong (1984) oder Wieberneit (2008b) zu erwähnen.

Die verwendeten Formulierungen in der im vorhergehenden Absatz genannten Literatur

sind nach unserem besten Wissen alle deterministisch. In diesem Fall setzen sie das komplette Wissen über wichtige Parameter für den gesamten Planungshorizont voraus, z.B. für eine zukünftige Periode, für die die Planung jetzt durchgeführt wird. Die Werte der Parameter sind nicht veränderbar und ergeben sich entweder aus Prognoseverfahren (z.B. für die Nachfrage am Empfangsdepot) oder basieren auf historische Daten (z.B. Warte- und Umschlagzeit in Hubs, Fahrzeit oder abgehende Sendungen vom Versanddepot). Im Gegensatz zur deterministischen Formulierung untersuchen Lium et al. (2009) die durch Berücksichtigung von stochastischen Elementen verursachten Auswirkungen auf die Planung von SND-Problemen. Hierbei wird die Nachfrage von Gütern im Empfangsdepot stochastisch ermittelt, d.h., die Nachfrage unterliegt einer Unsicherheit und wird somit durch Zufallsvariablen mit bekannter Zufallsverteilung ermittelt.

Im Abschnitt 3.4 werden spezielle Anwendungen einschließlich Lösungsmethoden für SND-Probleme betrachtet.

3.3. Zeit-Raum-Netze

Ein wesentliches Merkmal des in dieser Arbeit zu bearbeitenden SND-Problems ist die Einbeziehung von Zeitkomponenten wie Servicezeiten für die zu transportierenden Sendungen oder Öffnungszeiten der Standorte. Dazu werden sogenannte Zeit-Raum-Netze verwendet, in denen der zeitliche Planungshorizont diskretisiert und das Netz mit seinen Standorten für jede Periode dupliziert wird. Daher stellen die Knoten in solchen Netzen einen Zustand in Raum und Zeit dar, d.h., ein Knoten l_i im Zeit-Raum-Netz entspricht dem Standort l in der Periode i. Die in einem solchen Netz befindlichen Pfeile stehen entweder durch Änderung von Raum und Zeit für eine räumliche und zeitliche Bewegung von einem Standort zu einem anderen oder es findet nur die Änderung der Zeit an einem Standort statt.

Nach Barnhart & Kim (1999) können Zeit-Raum-Netze durch das *Time-Line-Netz* und das *Time-Connection-Netz* dargestellt werden. Unterschieden werden beide Netzabbildungen durch die Pfeil-Typen. In beiden Netzen steht ein Knoten $i \in N$ für einen Standort l_i und eine Zeit t_i. Außerdem ist in beiden Netzen ein Pfeil vom Standort l_i zum Standort l_j vorhanden, wenn unter der Voraussetzung von $t_j - t_i \geq$ Transportzeit ein Transport (Service) zwischen beiden Standorten möglich ist. Unterschieden werden beide Netze durch sogenannte *Time-Line-Pfeile* im Time-Line-Netz und *Time-Connection-Pfeile* im Time-Connection-Netz. Ein Time-Line-Pfeil stellt die Veränderung der Zeit an einem Standort dar, indem zwischen zwei zeitlich „nebeneinander“ befindlichen Knoten eines Standortes dieser Pfeil eingefügt wird. Dahingegen kann der Time-Connection-Pfeil eine Verbindung zwischen jedem Knoten eines Standortes und nicht nur zwischen zwei nebeneinander befindlichen Knoten darstellen (siehe Abbildung 3.4).

In einem Time-Connection-Netz können kompliziertere Restriktionen als in einem Time-

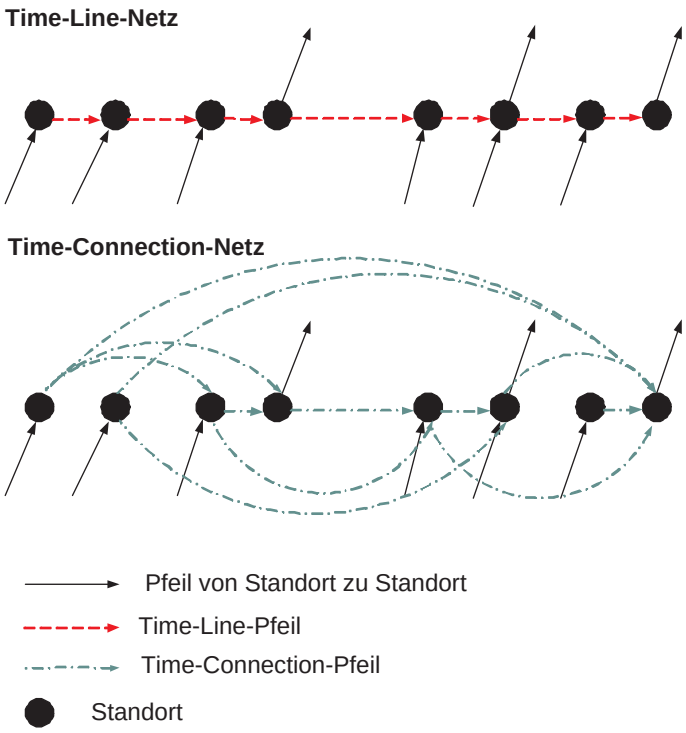

Abbildung 3.4.: Beispiele für Time-Line-Netz und Time-Connection-Netz (in Anlehnung an Barnhart & Kim (1999))

Line-Netz dargestellt werden, allerdings sind dazu mehr Pfeile erforderlich. Die Wahl der Netzdarstellung für die Modellierung von SND-Problemen hängt von der jeweiligen Problemstellung ab (Barnhart & Kim, 1999).

Die Diskretisierung des zeitlichen Horizonts kann bei geeigneter Wahl der Perioden zu einem sehr großen Netz führen. Daher werden Anstrengungen unternommen, solche reinen Zeit-Raum-Netze in ihrer Größe zu reduzieren. Eine Reduzierungstechnik ist die Bündelung von Knoten in einem Netz. Dazu werden zunächst alle Knoten eines Standortes nach aufsteigender Zeit geordnet. Anschließend kann durch eine geeignete Bündelung von Knoten und somit der Bildung von sogenannten Super-Knoten das Netz reduziert werden (siehe Abbildung 3.5). Beispiele dazu sind z.B. in Barnhart et al. (2002) oder Kim et al. (1999) aufgeführt.

Eine weitere Reduzierung eines Zeit-Raum-Netzes ist durch die Bündelung unterschiedlicher paralleler Pfeile möglich, die z.B. aufgrund von mehreren Fahrzeugtypen auf einer Verbindung vorliegen. Die einzelnen parallelen Pfeile stehen für einen möglichen Transport mit jeweils einem anderen Fahrzeugtyp zwischen zwei Standorten. Die Bündelung der Pfeile ist jedoch nur dann möglich, wenn entscheidende Merkmale der Fahrzeugtypen, wie z.B. Kapazitäten oder Geschwindigkeit, zueinander passen (Wieberneit, 2008a, S. 45). Weitere Anstrengungen zur Reduzierung eines Zeit-Raum-Netzes sind durch die Ausnutzung spezifischer Eigenschaften einer Problemstellung möglich (siehe dazu Ab-

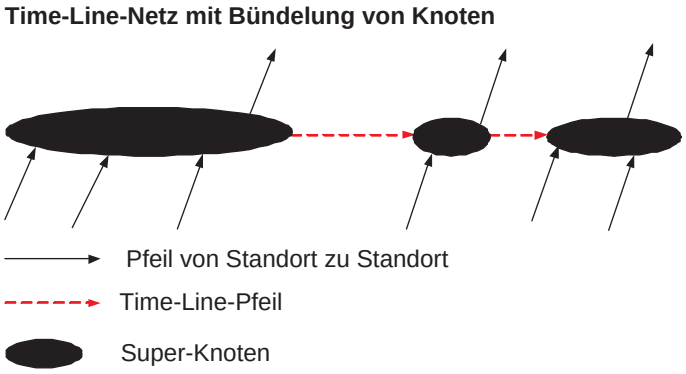

Abbildung 3.5.: Beispiel für die Bündelung von Knoten in einem Time-Line-Netz (in Anlehnung an Barnhart & Kim (1999))

schnitt 3.4).

3.4. Beispiele für SND Probleme

Im Folgenden werden fünf taktische Planungsprobleme aus der Literatur genauer betrachtet, welche typischerweise in der Praxis anzutreffen sind:

- Expressdienst-Problem in einem Flugnetz,
- Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen,
- Direkt- und Hubflugproblem für Briefsendungen,
- Planung von Stückgut-Transporten in Nordamerika und
- Güterverkehrsnetzplanung in Deutschland.

Dabei liegt das Interesse im Auffinden von interessanten Modellierungs- und Lösungsstrategien, die zweckmäßig für die Lösung der in dieser Arbeit zu behandelnden Linienverkehrsplanung unter Berücksichtigung der praktischen Vorgaben und Anforderungen sind.

3.4.1. Expressdienst Problem in einem Flugnetz

Zur Unterstützung der Übernacht-Zulieferung per Flugzeug wurde durch ein Team von UPS und dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) ein Planungssystem entwickelt und implementiert. Dieses wird zur Optimierung der Geschäftsprozesse innerhalb des KEP-Dienstleisters UPS eingesetzt. Zu diesem Projekt existieren schon eine Reihe von Veröffentlichungen wie z.B. Barnhart & Schneur (1996), Barnhart & Kim (1999),

Armacost et al. (2004) oder Barnhart & Shen (2005). Im Folgenden wird zunächst das Problem und anschließend der Lösungsvorschlag aus der Arbeit Barnhart et al. (2002) genauer beschrieben.

Problembeschreibung

Bei Expresslieferungen als KEP-Dienstleistung werden meist Päckchen oder Pakete von einem Versand- zum Empfangsdepot transportiert (siehe Abschnitt 2.2). Zwischen den Depots erfolgt der Transport entweder per Luftfracht oder auf der Straße. Da auf nationaler Ebene (USA) eine Servicezeit von 24 h gelten soll, erfolgt der Transport der Sendungen, die nicht pünktlich mit dem LKW transportiert werden können, über einen Flughafen. Es müssen Güter zwischen Flugzeug und LKWs auf-, abgeladen und transportiert werden. An jedem Flughafen existieren Zeitfenster für die Abholung und Zulieferung der Sendungen. Auf diese Weise soll der versprochene 24-Stunden-Service gewährleistet werden. Alle Sendungen sollen genau über einen Hub konsolidiert werden, damit die Flugzeuge ausreichend ausgelastet sind.

Um die Komplexität des Problems zu reduzieren, wurde es in zwei Teilprobleme zerlegt: in das Flugnetz- und das Straßennetzproblem. Diese werden getrennt geplant. Da die operativen Kosten für das Flugnetzproblem im Vergleich zu den Kosten des Straßennetzproblems deutlich höher sind, hat die Optimierung der Vorgänge im Flugnetz Priorität. Weiterhin wird das Problem auf die Übernacht-Zulieferung per Flugzeug („Next Day Air Network“, innerhalb von 24 Stunden) eingeschränkt. Somit bilden die Flughäfen die Versand- und Empfangsdepots, weil die Transporte zwischen den eigentlichen Depots und Flughäfen vernachlässigt werden. Weiterhin sind im Netz nur Hubverkehre zugelassen. Daher kann jede Route in eine Abhol- und Zulieferroute aufgeteilt werden. Die auf einer Flugroute höchstens zugelassene Anzahl von Stopps beträgt zwei. Ein einfaches Beispiel zeigt Abbildung 3.6. Am Flughafen 1 werden Sendungen in ein Flugzeug geladen. Das Flugzeug kann direkt oder über einen anderen Flughafen (z.B. Flughafen 2) zum Hub fliegen. Das Flugzeug muss am Hub zur Konsolidierung vor Ende der Arbeitszeiten ankommen. Nach Beendigung der Konsolidierung liefert das Flugzeug die Sendungen zu den Zielflughäfen.

Als Erweiterung zum SND-Problem im Abschnitt 3.2 finden hier weitere Restriktionen Berücksichtigung. Die anzufliegenden Hubs haben beschränkte Sortier- und Landekapazitäten (z.B. Slots). Weiterhin besteht im Flugnetz für jeden Flughafen zu seinem Hub mindestens eine Fluglinie und umgekehrt. Schließlich liegt eine Beschränkung der Anzahl Flugzeuge je Flugzeugtyp in der heterogenen Flugzeugflotte vor.

Analog zu Abschnitt 3.2 sollen hier der Verlauf der Sendungen und die Flugzeugrouten bestimmt werden. Das Ziel ist die Minimierung der Kosten für das Unterhalten der Abhol- und Zulieferrouten. Da die Fixkosten der Flugzeugrouten dominant sind, werden direkte Kosten für den Transport der Sendungen (z.B. Umschlagkosten) nicht berück-

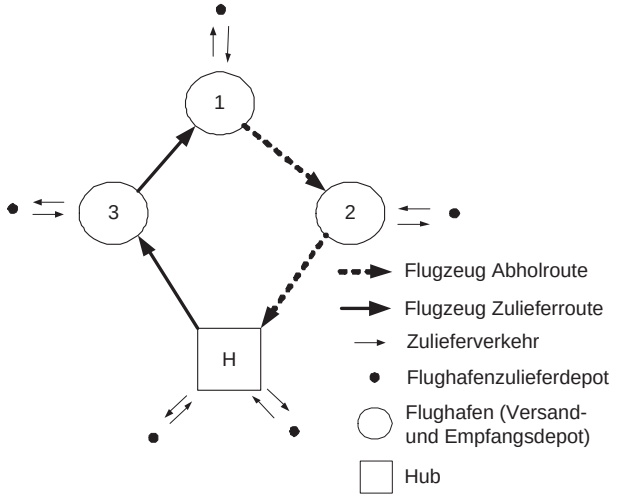

Abbildung 3.6.: Beispiel für Express-Paketdienst Operationen

sichtigt.

Lösung

Das von Barnhart et al. (2002) konstruierte Verfahren reduziert als iteratives Verfahren in jeder Iteration die Größe des Problems. Für die am Schluss übrig gebliebene Problemstellung wird ein exakt lösender Algorithmus verwendet, der in Barnhart & Kim (1999) beschrieben ist. Barnhart et al. (2002) spalten das Problem in zwei Teilprobleme auf: die Auswahl der Routen und der Transport der Sendungen. Dabei wird eine Iteration so durchgeführt, dass eine Entscheidung in dem einen Teilproblem Einfluss auf das andere haben kann. Zur Berechnung der Routen wird das *Route Generation Modell* (für mehr Informationen siehe Kim et al. (1999)) verwendet. Ein MCNF-Problem - das *Location Elimination Modell (LEM)* - dient zur Ermittlung des Transportverlaufs der Sendungen. Abbildung 3.7 zeigt einen Überblick zum iterativen Lösungsverfahren für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz.

Das verwendete Netz ist als deterministisches Zeit-Raum-Netzmodell modelliert. Solche Netze sind entweder wegen ihrer Größe schwer lösbar oder die Abstände zwischen den einzelnen Zeitpunkten können zu groß für eine ausreichend gute Planung sein (vergleiche dazu Abschnitt 3.3). Deshalb werden Anstrengungen unternommen, solche Netze zu reduzieren. Bei der Dekomposition des Netzes können die Routen in Abhol- und Zulieferrouten aufgeteilt werden (ausführliche Beschreibung in Kim et al. (1999)). Dabei gilt für die Abholrouten, dass jeder Startflughafen (Versanddepot) einen Knoten für den frühesten Abflugzeitpunkt hat. Für jeden nachfolgenden Flughafen gibt es zwei Knoten: zum einen für die früheste Ankunftszeit vom vorhergehenden Flughafen und zum anderen für die späteste Abflugszeit zum Hub. Analog gilt dies auch für die Zulieferrouten. Pfeile, die zeitliche Bewegungen darstellen, sind zwischen den nachfolgenden Knoten eines Flugha-

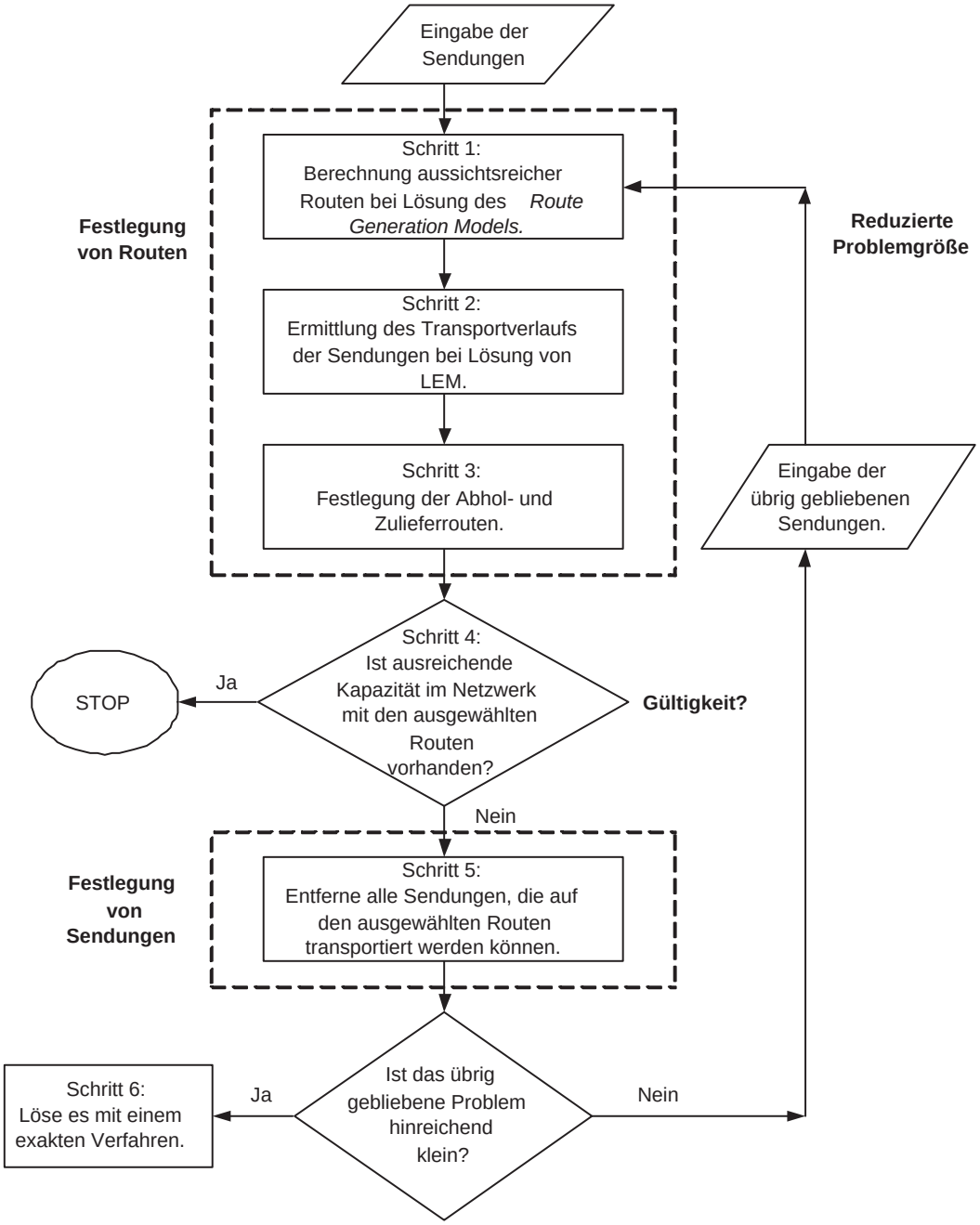

Abbildung 3.7.: Iteratives Lösungsverfahren für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz (Barnhart et al. (2002, S. 245))

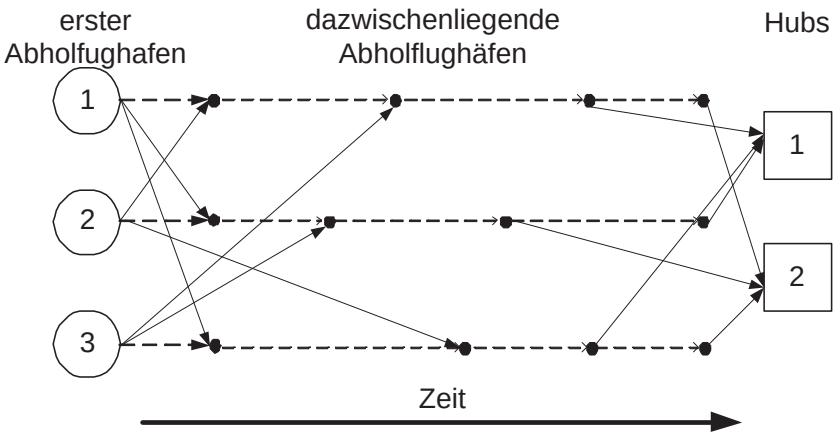

Abbildung 3.8.: Abgeleitetes Abholnetz für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz (Kim et al. (1999, S. 395))

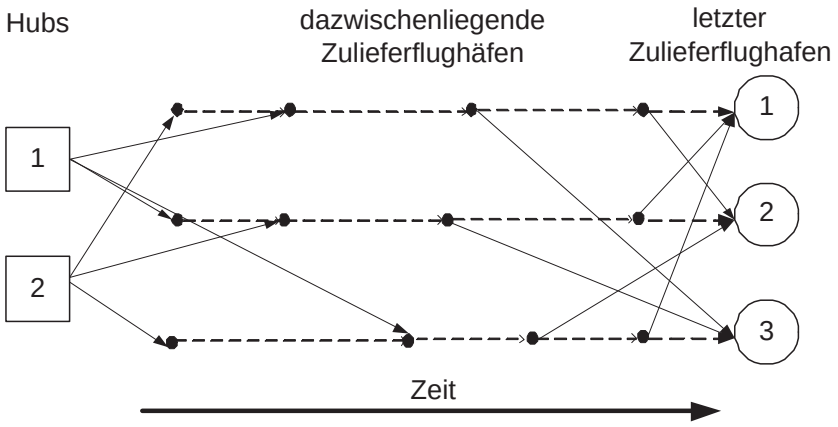

Abbildung 3.9.: Abgeleitetes Zuliefernetz für das Problem Expressdienst in einem Flugnetz (Kim et al. (1999, S. 395))

fens platziert. Außerdem gibt es die Transporte repräsentierenden Pfeile zwischen den Flughäfen oder Flughäfen und Hubs, wenn die Zeitfenster eingehalten werden können. Alle gültigen Abhol- und Zulieferrouten in diesem Netz haben eine große Anzahl realisierbarer Flugpläne. Deshalb wurde es durch Bündelung von Knoten und Pfeilen (siehe Abschnitt 3.3) nochmals reduziert. In den Abbildungen 3.8 bzw. 3.9 sind Beispiele für mögliche Abhol- bzw. Zulieferrouten dargestellt.

Im Lösungsverfahren werden zunächst mit Hilfe des Route Generation Models die Abhol- und Zulieferrouten berechnet. Als Basis wird das allgemeine SND-Problem aus Abschnitt 3.2 zuzüglich aller Restriktionen und der Zielfunktion genommen. Gelöst wird das Modell mit Hilfe eines Branch-and-Price-and-Cut-Algorithmus. Das Ergebnis, von dem die Abhol- und Zuliefernetze abgeleitet werden können, sind die Eingabedaten für das LEM, welches eine bestimmte Variante des MCNF-Problems (siehe Abschnitt 3.1) ist. Im LEM

kann der Transportverlauf der Sendungen festgelegt werden. Das Ziel des Modells ist die Maximierung der Anzahl von Abhol- bzw. Zulieferflughäfen, deren Bedarf vollständig gedeckt werden kann. Die Routen der Flugzeuge, die diese Transporte abwickeln, werden im Anschluss fixiert und die dazugehörigen Sendungen werden im Modell nicht weiter betrachtet. Für die Modellierung der Zielfunktion werden zwei Mengen binärer Variablen eingeführt. Diese sind gleich 1, wenn alle Transporte von einem Abholflughafen (bzw. zu einem Zielflughafen) über Pfade des abgeleiteten *Schedule*-Netzes führen. Um das Modell zu lösen, implementierten Barnhart et al. (2002) eine Variante der Branch-and-Price-Methode. Dazu vereinfachten sie zunächst das ganzzahlige Optimierungsproblem, welches anschließend in ein lineares Problem zerlegt wird. Nachdem der Transportverlauf der Sendungen mit LEM festgelegt wurde, sind die Abhol- und Zulieferrouten, über die die zu transportierenden Sendungen befördert werden müssen, als gewählte Routen fest vorgegeben. Es werden die Sendungen nicht weiter betrachtet, die über das Netz, welches sich aus den gewählten Routen ergibt, schon transportiert wurden. Daraus abgeleitet können die zu transportierenden Sendungen und die damit verbundenen Standorte entfernt werden. Folglich reduziert sich die Problemgröße. Alle Sendungen, welche nicht über die gewählten Routen transportiert wurden, gelten als Inputmenge für den ersten Schritt und das Verfahren beginnt von vorne. Als Ergebnis haben entweder die festgelegten Routen für die zu transportierenden Sendungen genügend Kapazitäten oder die Problemgröße wurde so stark reduziert, dass es mit einem exakten Verfahren von Barnhart & Kim (1999) gelöst werden kann.

Wieberneit (2008b, S. 88) weist darauf hin, dass für die hier beschriebene Formulierung des SND-Problems die LP-Relaxation schwache untere Schranken erzeugt, da es dazu neigt, keine ganzzahlige Routen zu bestimmen. Um dieses Problem zu umgehen, wird in Armacost et al. (2002, 2004) das sogenannte *Composite Variables* Konzept vorgestellt. Die Entscheidungsvariablen bei der herkömmlichen Modellformulierung sind die Anzahl der Flugzeuge, welche von einem bestimmten Flughafen zu einem bestimmten Hub und umgekehrt fliegen und das Volumen der geladenen Sendungen jedes Flugzeuges. Die Idee ist nun, beide Entscheidungsvariablen zu einer zu verbinden. Die neu entstandene Variable stellt eine Verknüpfung von unterschiedlichen Routen mit ausreichender Kapazität für einen realisierbaren Sendungsverlauf dar. Die genaue Beschreibung der Bildung dieser Variablen kann in Armacost et al. (2002, 2004) nachgelesen werden. Mit Hilfe dieser Variablen kann die Problemstellung als ein *Set-Covering-Modell* formuliert werden. In diesem Modell existieren Abhol- und Zulieferbedarfe, die durch sogenannte *Covering*-Bedingungen gedeckt sind. Weitere Restriktionen wie ganzzahlige Selektion von Flugzeugen, Einhaltung der Kapazitäten der Hubs oder die beschränkte Anzahl von Flugzeugen je Typ werden auch berücksichtigt. Gelöst wird das Set-Covering-Modell durch einen Branch-and-Bound-Algorithmus. Die Testergebnisse der Vorgehensweise von Armacost et al. (2002, 2004) zeigen, dass bei Ermittlung der optimalen ganzzahligen Lösung die herkömmliche Modellformulierung von Barnhart et al. (2002) deutlich mehr Aufwand in Anspruch nimmt als die Composite Variable Formulierung. Für dieses Beispiel liegt der Grund in der für die herkömmliche Formulierung ermittelten schlechten unteren Schranke, wohingegen die Composite Variable Formulie-

rung schon am Ursprungsknoten des Branch-and-Bound Baumes gute untere Schranken erzeugt (Wieberneit, 2008b).

3.4.2. Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen

In der Arbeit von Wieberneit (2008a) wird ein Planungsverfahren zur Linienverkehrsplanung für Sammelgutspeditionen in einem nationalen Straßentransportnetz in Europa entwickelt. Dazu wurde ein Modell zur Bestimmung der Routen für die Fahrzeuge und ein Modell zur Bestimmung der Routen für die *Commodities*[1] entwickelt. Die Lösung beider Teilprobleme und die Verbindung beider Teillösungen zu einer Gesamtlösung wird nach Beschreibung der Problemstellung vorgestellt.

Problembeschreibung

Die in der Arbeit von Wieberneit (2008a) entwickelte Linienverkehrsplanung beschränkt sich auf Sammelgutspeditionen, die sich von KEP-Dienstleistern vor allem durch das undifferenzierte (inhomogene) Sammelgut unterscheiden (vergleiche dazu Abschnitt 2.1.2). Im Mittelpunkt der Planung steht ein in Europa befindliches nationales Netz (z.B. Deutschland) mit einer Servicezeit von 24 Stunden. Die dabei vorgegebene Netzstruktur ist ein gemischtes Transportnetz (siehe Abschnitt 2.3.2), in dem sich sowohl regionale als auch zentrale Hubs befinden. Im Gegensatz zu den zentralen Hubs dienen die regionalen Hubs auch als Depots und fungieren als Hub für Commodities mit Versand- und/oder Empfangsdepot in der selben Region. Ein zentrales Hub kann auch für die Abwicklung von europaweiten Commodities eingesetzt werden. Jedoch ist im Hauptlauf als Konsolidierungsmaßnahme maximal ein Hubumschlag vorgesehen. Auf den Transporten vom und zum Hub und bei den Direktverkehren zwischen den Versand- und Empfangsdepots sind Ladegefäßkonsolidierungen und/oder Beiladungen möglich. Abbildung 3.10 stellt zusammenfassend das Grundproblem dar.

Um die Qualitätsstandards gegenüber den Kunden einhalten zu können, existieren an den Depots sogenannte früheste Abhol- und späteste Zulieferzeiten. Zum frühesten Abholzeitpunkt stehen die Commodities zur Abholung bereit. Zum spätesten Zulieferzeitpunkt müssen die Commodities spätestens am Depot eingetroffen sein. An den Hubs befinden sich mit Anfangs- und Endsortierzeit ebenfalls Zeitfenster. Außerdem ist die Anzahl der Rampen für die Fahrzeuge (nicht Ladegefäße) an den Hubs begrenzt.

Für den Transport der Commodities stehen Wechselbrückenfahrzeuge zur Verfügung,

[1]Eine Commodity setzt sich aus mehreren Sendungen zusammen, die das gleiche Versand- und Empfangsdepot und den gleichen Kunden-Servicetyp (z.B. Servicezeit von 24 Stunden) haben. Dieser Begriff ist nicht zu verwechseln mit der in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnung Relation, die zusätzlich durch Angabe des Transportverlaufs im Netz aus unterschiedlichen Transportabschnitten besteht.

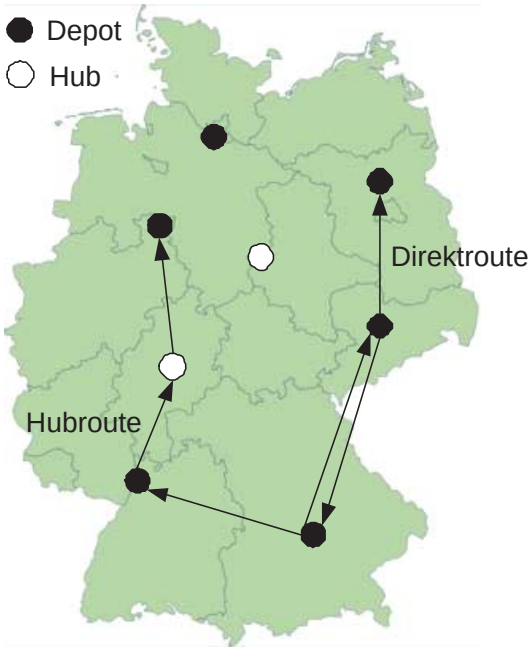

Abbildung 3.10.: Darstellung des Grundproblems für die Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen (in Anlehnung an Wieberneit (2008b, S. 98))

die jeweils zwei Ladegefäße transportieren können. Weiterhin handelt es sich bezüglich der Geschwindigkeit und Kapazität um einen homogenen Fuhrpark, der in seiner Größe unbegrenzt ist. Beim Transport der Commodities wird nur eine Produktgruppe betrachtet und es wird von homogenen Sendungen ausgegangen. Schließlich kommt nur ein Ladegefäß-Typ vor. Eine Planung der Transporte auf Basis von Ladegefäßen wird nicht durchgeführt. Somit findet eine Zuordnung von Commodities zu Ladegefäßen nicht statt. Deshalb erfolgt lediglich eine Zuordnung von Fahrzeugen zu Rampen an den Hubs, obwohl an den Rampen eigentlich Ladegefäße entladen werden. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge an jedem Standort ist unbeschränkt. Jedoch sollen die Fahrzeuge nach spätestens zwei Tagen wieder an ihren Ausgangspunkt zurückkehren. Somit sind nur die Routen für die Fahrzeuge und Commodities zu bestimmen, die dann zu Touren kombiniert werden.

Lösung

Bei dem von Wieberneit (2008a) entwickelten heuristischen Lösungsverfahren handelt es sich um eine Dekomposition nach den zwei Entscheidungsvariablen Bestimmung der Routen für die Commodities und Bewegung der Fahrzeuge. Dabei wird eine Iteration so durchgeführt, dass eine Entscheidung in dem einen Teilproblem Einfluss auf das andere haben kann. Weiterhin wird durch dieses iterative Vorgehen die Problemgröße Schritt für Schritt reduziert. Eine Zusammenfassung über die Vorgehensweise im Lösungsverfahren

zeigt Abbildung 3.11.

Die Grundlage für das mathematische Modell ist das von Kim et al. (1999) vorgestellte Zeit-Raum-Netz als Service-Netz (siehe Abschnitt 3.3), das alle möglichen Fahrzeugrouten abbildet. Über dieses Netz werden die Commodities geleitet (siehe dazu Wieberneit (2008a, S. 101ff)). Darauf aufbauend wurde das SND-Grundproblem modelliert, in dem die Routen der Fahrzeuge sowie die Auftragsrouten kostenminimal durchgeführt werden. Hierbei ist das Ziel, bei Minimierung der Fixkosten für die Fahrzeuge und der variablen operativen Kosten die von LKWs durchzuführenden Routen zu finden. Weiterhin soll durch Festlegung der Routen für die Commodities ohne Verletzung von Kundenservice-Anforderungen und Kapazitätsrestriktionen auf den einzelnen Fahrzeugrouten der Bedarf der Kunden gedeckt werden. Dieses Grundmodell wird anschließend in zwei Teilprobleme zerlegt: in das Modell, in dem zunächst die Fahrzeugrouten bestimmt werden (1. Schritt im Lösungsverfahren), und das Modell, in dem aufbauend auf das generierte Service-Netz die Commodities kostenminimal vom Versanddepot zum Empfangsdepot transportiert werden (2. Schritt im Lösungsverfahren). Bei Fixierung der Fahrzeugrouten (3. Schritt) gilt folgende Regel: Werden für ein Versanddepot (bzw. Empfangsdepot) alle Bedarfe von Commodities mit diesem Versanddepot (bzw. Empfangsdepot) durch Commodity-Routen transportiert, dann werden die für den Transport erforderlichen Fahrzeugrouten fixiert (Wieberneit, 2008a, S. 116). Diese Fahrzeugrouten und die darüber laufenden Commodity-Routen werden zur Menge der fixierten Fahrzeug- bzw. Commodity-Routen inklusive der zugehörigen Commodities hinzugefügt. Anschließend wird im Schritt 4 überprüft, ob das im Schritt 1 erzeugte Service-Netz für alle zu verplanenden Commodities über ausreichend Kapazität verfügt. Bei einem „Nein“ wird Schritt 5 durchgeführt, ansonsten endet hier das Verfahren. Im Schritt 5 werden alle zu den neu fixierten Commodity-Routen gehörigen Commodities aus den zu verplanenden Commodities gelöscht.

Bei Anwendung dieses Verfahrens kann es vorkommen, dass in einer Iteration keine Fahrzeugrouten fixiert werden können, da durch das im Schritt 1 erzeugte Service-Netz nicht ausreichend Kapazitäten zur Verfügung steht. Gelöst wird dieses Problem durch das Hinzufügen einer weiteren Fahrzeugroute zum zentralen Hub (Wieberneit, 2008a, S. 116), da die Routen über das Hub die Engpässe im Netz bilden.

Ein Branch-and-Bound-Verfahren bildet die Grundlage für die Lösung des Teilproblems Bestimmung der Fahrzeugrouten. In Anlehnung an Barnhart & Schneur (1996) wurde dabei zunächst eine Column-Generation-Methode implementiert, die bei der LP-Relaxation im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes angewendet wird. Die dadurch erzeugten Spalten in der LP-Relaxation stehen anschließend dem Branch-and-Bound-Baum zur Verfügung. Die LP-Relaxation wird mit einem Cut-Generation-Verfahren gelöst (Wieberneit, 2008a, S. 116).

Mit den festgelegten Fahrzeugrouten aus Schritt 1 des Gesamtalgorithmus und dem dadurch gebildeten Service-Netz sollen die Commodities kostenminimal von ihrem Versanddepot zum Empfangsdepot transportiert werden. Für die Lösung des als ein MCNF-

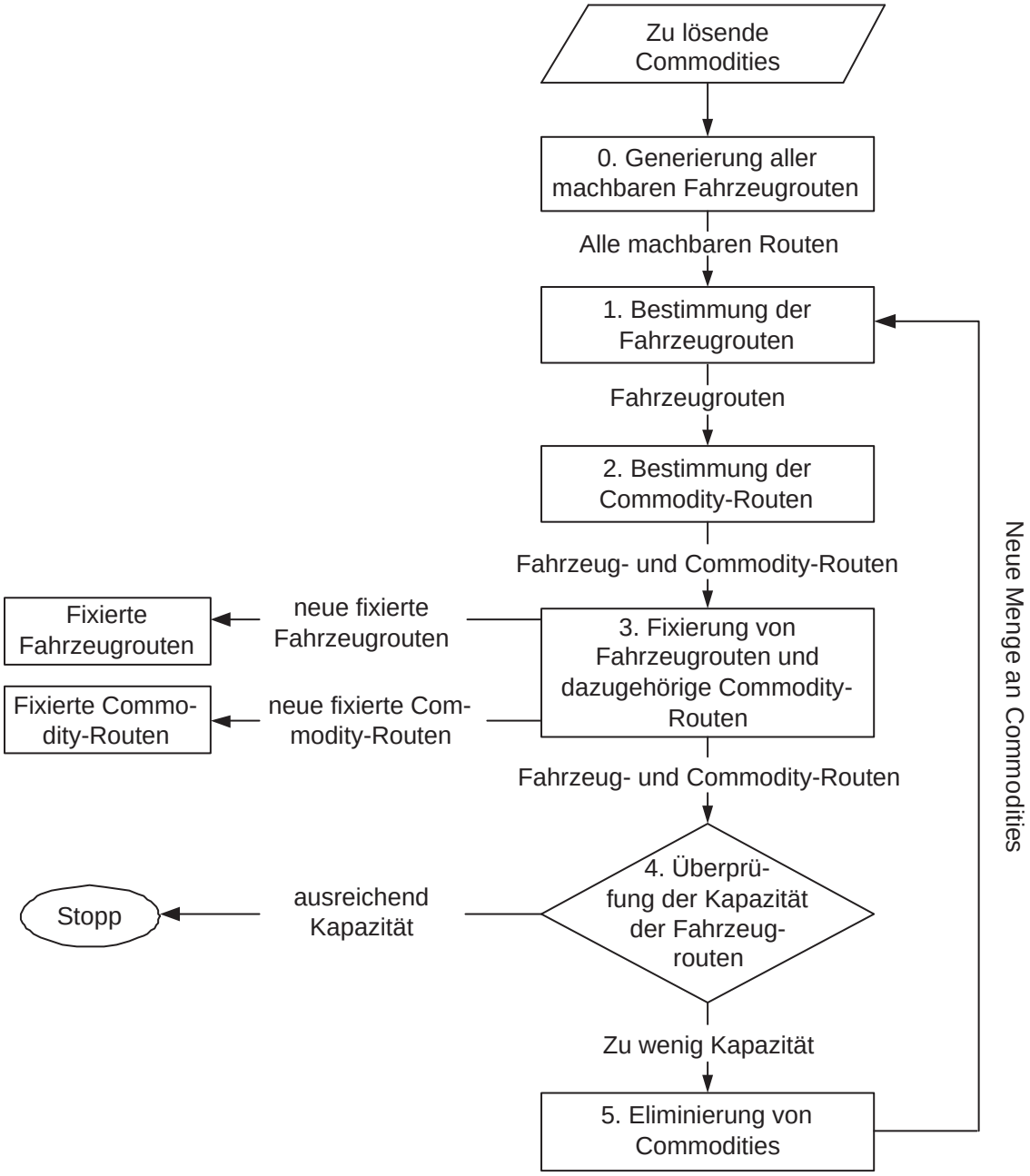

Abbildung 3.11.: Zusammenfassung des Lösungsverfahrens für die Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen (in Anlehnung an Wieberneit (2008b, S. 115))

Problem formulierten Teilproblems (basierend auf Barnhart et al. (2002)) wird ein heuristisches Branch-and-Price-Verfahren verwendet. Hierbei wird zunächst für die LP-Relaxation des Wurzelknotens ein implizites Column-Generation-Verfahren verwendet. Anschließend wird für das Modell zur Generierung der Routen für die Commodities eine MIP-Lösung (Mixed Integer Problem) gesucht (Wieberneit, 2008a, S. 122f).

Die Teilprobleme werden mit exakten Verfahren gelöst, wobei heuristische Komponenten zum Einsatz kommen. Deshalb wird das Gesamtverfahren als eine Heuristik klassifiziert (Wieberneit, 2008a, S. 126). Die formulierten MIP-Probleme wurden mit ILOG CPLEX gelöst. Die benötigten Rechenzeiten für Probleminstanzen mit ca. 50 Depots, 5 Hubs und etwa 2.300 Commodities (dies waren die größten getesteten Instanzen) betrugen zwischen 10 und 15 Stunden (Wieberneit, 2008a, S. 177). Aus Praxiserfahrungen sind diese Rechenzeiten für vergleichbare Testinstanzen alleine für die Linienverkehrsplanung deutlich zu lang, vor allem wenn mit einem Planungstool für eine Standortplanung inklusive Linienverkehrsplanung unterschiedliche Szenarien untersucht werden, In dieser Arbeit werden Probleminstanzen für KEP-Dienste mit ca. 100 Depots, 30 Hubs und etwa 20.000 Commodities betrachtet (vergleiche dazu Abschnitt 5.2).

3.4.3. Direkt- und Hubflugproblem für Briefsendungen

In der Literatur sind zum Flugnetzproblem für Briefsendungen vereinzelte Lösungsansätze beschrieben. Büdenbender et al. (2000) schlägt zur Lösung des Problems ein „Hybrid Tabu Search/Branch-and-Bound“ Algorithmus vor. In diesem wird die LP-Relaxation als ein *single sourcing warehouse-location* Problem formuliert. Dabei stellen die Routen im Netz die Lagerstandorte dar und die Zuordnung von Sendungen zu den Routen bildet die Lieferung von den Lagern zu den Kunden ab. Im Gegensatz dazu schlägt Irnich (2002) einen *Dantzig-Wolfe Decomposition*-Ansatz vor, welcher nach der Problembeschreibung näher erläutert wird.

Problembeschreibung

Die von den Kunden direkt oder über Briefkästen eingesammelten Briefe werden zum regionalen Briefzentrum (BZ) transportiert. Im BZ angekommen, erfolgt die Sortierung der Briefe nach ihren Zieldepots (auch BZ). Der Dienstleister muss die Briefe vom Start-BZ zum Ziel-BZ innerhalb einer Nacht befördern. Briefe mit demselben Start-BZ und Ziel-BZ werden zu einem Auftrag (oder einer Menge) gebündelt. Deswegen werden die Briefe in einem Auftrag über die gleiche Route transportiert. Um die zeitliche Zusage an den Kunden zu erfüllen, sind für alle BZ Zeitfenster für die Abholung und Zustellung gegeben. Aufgrund der kurzen Zustellzeiten wird für einige Relationen der Transport über die Straße ausgeschlossen. Demzufolge transportieren die Flugzeuge die relevanten

Briefe und nur diese werden für das Problem auch betrachtet. Da sich die BZ überwiegend nicht in der Nähe des Flughafens befinden, müssen für die Briefe Transporte vom BZ zum Flughafen und umgekehrt mit einem LKW erfolgen. Um eine höhere Auslastung der Flugzeuge zu erreichen, können die Briefsendungen an einem Hub-Flughafen konsolidiert werden. Die Flüge können entweder direkt oder über ein Hub (Frankfurt/Main) stattfinden. Der Hub in Frankfurt/Main dient für Briefsendungen auch als ein Start- und Ziel-BZ. In dieser Problemstellung sollen die Flüge zwischen Flughäfen, die Zuliefertransporte zu und von den Flughäfen sowie die Routen der Briefsendungen zwischen den BZ geplant werden.

Wegen der Komplexität der Problemstellung wird das Optimierungsproblem in Bezug auf das Netz in ein inneres Netz- (Flugnetz) und äußeres Netzproblem (Straßentransportnetz) aufgespalten. Diese Aufspaltung kann dadurch gerechtfertigt werden, dass die Kosten für das Flugnetz deutlich höher sind als für das Straßentransportnetz. Ein Ziel der Problemstellung ist die Gestaltung eines gemischten Direkt- und Hub-Flugnetzes. Somit werden hinsichtlich des Flugnetzes nur Entscheidungen getroffen, die das Netz selbst betreffen. Die Planungsentscheidungen bezüglich der Transporte zum und vom Flughafen sind kein Bestandteil der Planung. Daher sind in der Planung die Flughäfen und nicht die BZ die Versand- und Empfangsdepots.

Das Besondere an dem betrachteten Problem ist, dass der Schwerpunkt der Planung nicht nur in der Gestaltung des Netzes zwischen den Flughäfen, sondern auch in der Zuordnung der Start- und Ziel-BZ der Aufträge zu den Flughäfen liegt. Dies wird mit einer Entscheidungsvariable, die die Route eines Auftrages abbildet, realisiert. Diese Variable ist zugleich im Flugnetz-Netz integriert, so dass zu dieser Entscheidungsvariable auch die Festlegung des Streckenverlaufs eines Auftrags im Flug-Netz gehört. Ein Auftrag kann mit unterschiedlichen Flugzeugen auf verschiedenen Routen transportiert werden, z.B. kann es sich beim Flug vom Start- zum Zielflughafen um einen Direktflug oder um einen Flug über ein Hub handeln. Die Transporte zum und vom Flughafen müssen bezüglich der benötigten Zeitdauer durchführbar sein. Daher hängt die Entscheidung, ob ein Auftrag einer Route zugeordnet werden kann oder nicht, von der Abflugzeit des Flugzeugs ab, das diese Route bedient. Jedoch kann ein Flugzeug unterschiedliche Abflugzeiten besitzen und verschiedene Aufträge transportieren. Die mit dem einen Flugzeug zu transportierenden Aufträge müssen bezüglich des Zeitfensters zueinander passen. Daher müssen alle Aufträge von und zu den Flughäfen unter Beachtung der Zeitfenster an den BZ befördert werden. Somit hängt die Abflugzeit eines Flugzeuges indirekt von den geladenen Aufträgen ab. Die frühestmögliche Abflugzeit eines Flugzeuges ergibt sich aus dem Zeitpunkt, zu dem alle zu transportierenden Aufträge angekommen sind und in das Flugzeug aufgeladen wurden. Die spätestmögliche Abflugzeit kann aus der Zeit, zu der der erste Auftrag den Zielflughafen verlassen muss, abzüglich die Flug- und Entladezeit, berechnet werden. Daraus ergibt sich die Definition einer Route mit folgenden Eigenschaften: Start- und Zielflughafen, Flugzeugtyp und die Abflugzeit des Flugzeugs.

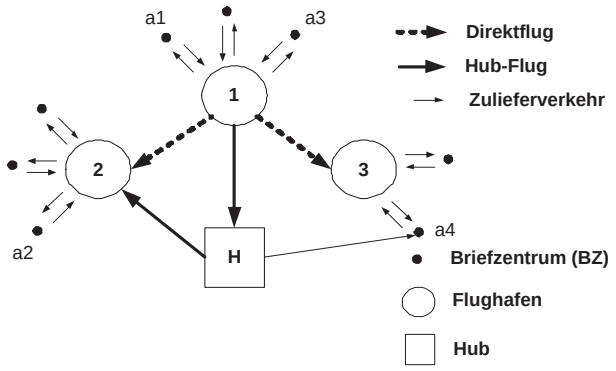

Abbildung 3.12.: Beispiel für das Direkt- und Hubflugproblem für Briefsendungen

Als Beispiel betrachten wir Abbildung 3.12. Gegeben sind zwei Aufträge: Einer muss von a1 zu a2 und der andere von a3 zu a4 transportiert werden. Der Transportauftrag (a1,a2) ist im Direktflug vom Startflughafen 1 zum Zielflughafen 2 durchführbar. Für den Auftrag (a3,a4) sind zwei Streckenverläufe vorgesehen: Entweder der Direktverkehr vom Startflughafen 1 zum Zielflughafen 3 oder der Hubverkehr vom Startflughafen 1 zum Hub als Zielflughafen. Bei der Gestaltung des Netzes gibt es auch die Möglichkeit, für den Transportauftrag (a1,a2) einen Hubverkehr einzurichten. In diesem Fall könnten die Aufträge (a1,a2) und (a3,a4) konsolidiert und gemeinsam zum Hub transportiert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Bildung des Flugnetzes ist die Balance zwischen den Starts und Landungen von Flugzeugen an den Flughäfen. Damit an jedem Flughafen gleich viele Flugzeuge eines Typs starten und landen werden neben echten Flügen auch sogenannte *Ferry-Flüge* eingesetzt. Diese haben keine Aufträge geladen, sorgen jedoch für eine Balance. Modelliert werden solche Flüge mit zusätzlichen Strafkosten.

Aus der Problembeschreibung heraus ergeben sich für das Planungsmodell folgende drei zu treffende Entscheidungen:

1. Wie soll das innere Flugnetz (Service-Netz) gestaltet sein?
2. Welche Aufträge sollen welchen Flugzeugrouten zugeordnet werden?
3. Sollen Ferry-Flüge durchgeführt werden?

Das für das Direkt- und Hubflugproblem erstellte Modell enthält deutlich mehr Restriktionen als das allgemein gehaltene SND-Problem im Abschnitt 3.2. Als Erweiterungen sind die Beschränkungen der Anzahl Flugzeuge und der Anzahl Starts und Landungen an einem Flughafen (auch Hub) oder die Zuordnung eines Auftrages nur zu einer Route eines Flugzeuges (*Single-Sourcing-Problem*) zu nennen. Das Ziel des Modells ist es, eine Kombination aus den Routen der Flugzeuge und den Ferry-Flügen zu finden, die die Kosten der Routen, der Ferry-Flüge und der Zuliefertransporte minimiert. Die im SND-Problem

verwendeten Umschlagkosten werden hier nicht berücksichtigt.

Lösung

Zur Lösung des geschilderten Problems verwendet Irnich (2002) die Dantzig-Wolfe-Dekomposition (Dantzig & Wolfe, 1960), die zur Bildung eines ganzzahligen Master-Problems und eines ganzzahligen Pricing-Problems führen. Dazu wird ein Modell in Form eines ganzzahligen linearen Programms entwickelt. Die verwendeten Entscheidungsvariablen legen fest, ob jeder potentielle Flug auch durchgeführt wird (binäre Variable), welchem potentiellen Flug ein Auftrag zugeordnet wird (binäre Variable) und wie oft ein bestimmter Ferry-Flug durchzuführen ist (ganzzahlig und nicht-negativ). Die harten Restriktionen sind, dass jeder Auftrag nur durch ein Flugzeug transportiert werden kann, dass die Anzahl der Starts, der Landungen und der Flugzeugtypen beschränkt sind und dass gleich viele Flugzeuge eines Flugzeugtyps an einem Flughafen starten und landen. Vervollständigt wird das Modell durch Restriktionen, die die Routen betreffen: die Kapazität der potentiellen Flüge und die Zuordnung von kompatiblen Aufträgen zu demselben potentiellen Flug. Anschließend kann das Modell in ein Master-Problem (aus den harten Restriktionen) und Pricing-Problem (aus den restlichen Restriktionen) zerlegt werden. Diese lassen sich einerseits als ein verallgemeinertes Set-Partitioning-Problem und andererseits als ein Cliquen-Rucksack-Problem (clique knapsack problem) beschreiben. Daraus folgt, dass die Zuordnung von Aufträgen zu einem potentiellen Flug unter Berücksichtigung der Kapazitäts- und Kompatibilitätsrestriktionen als ein Pricing-Problem gelten kann (ausführliche Beschreibung in Irnich (2002, S. 113ff)).

Eine besondere Eigenschaft des entworfenen Modells ist der Verzicht auf kontinuierliche Variablen zur Repräsentation der Zeiten, bspw. für die Startzeitpunkte der Flüge. Der Grund hierfür liegt in der Festlegung des Startzeitpunktes eines benutzten potentiellen Fluges, welche implizit durch die kompatiblen zugewiesenen Aufträge erfolgt.

Bei dem als Cliquen-Rucksack-Problem eingeordneten Pricing Problem können die Kapazitätsrestriktionen als der Rucksack und die Zuordnungen von Aufträgen zu Flügen unter Berücksichtigung der Kompatibilitätsrestriktionen als die Cliquen interpretiert werden. Hierbei müssen die Cliquen in den Rucksack eingepackt werden. Irnich (2002, S. 121ff) beweist, dass die unterliegenden Graphen der vielen Pricing-Probleme die Struktur von Intervall-Graphen besitzen. Daher zerfällt das Pricing-Problem in die Lösung vieler unabhängiger Rucksack-Probleme und bleibt damit auch für große Instanzen des Problems mit annehmbarem Aufwand lösbar. Das Lösungsverfahren für die Cliquen-Rucksack-Probleme kann folgendermaßen beschrieben werden: Zuerst bestimme alle maximalen Cliquen des Intervall-Graphen. Anschließend löse für Clique bei Verwendung z.B. eines Branch-and-Bound-Verfahrens das Rucksack-Problem. Schließlich ergibt sich die Lösung des Cliquen-Rucksack-Problems durch die Wahl der besten Lösung für den Zielfunktionswert aus der Menge der besten Lösungen der Rucksack-Probleme.

Zur ganzzahligen Lösung der Problemstellung wurde ein Branch-and-Price-Verfahren entwickelt. Hierbei bildet die Aufspaltung der Problemstellung in ein ganzzahliges Master-Problem und ganzzahliges Pricing-Problem die Basis. Die Lösung des Master-Problems erfolgt unter Anwendung eines Branch-and-Bound-Verfahrens, das die LP-Relaxation zur Ermittlung unterer Schranken verwendet. Das auf diese Weise erhaltene reduzierte Master-Problem und die Pricing-Probleme bilden die Grundlage für ein Column-Generation-Verfahren. Dabei enthält das reduzierte Master-Problem eine kleine Teilmenge von Spalten des Ursprungsproblems. Dieses kleinere Problem wird mit dem Simplex-Algorithmus gelöst. Durch das Lösen eines ganzzahligen Pricing-Problems für jeden potentiellen Flug werden nun Variablen bestimmt, deren Aufnahme in das reduzierte Master-Problem vorteilhaft erscheinen. Diese Spaltenerzeugung entspricht exakt der Aufnahme einer Nicht-Basisvariable in die Basis beim Simplex-Algorithmus. Die Menge der potentiellen Flüge werden in einem vorher durchzuführenden Schritt ermittelt. Dabei darf die Menge der potentiellen Flüge „nur einige Hundert bis Tausend Elemente umfassen“ (Irnich, 2002, S. 53), da sonst zu viele Pricing-Probleme gelöst werden müssen.

Bei der praktischen Realisierung eines Optimierungsalgorithmus für ein „großes“ Transportsystem müssen Techniken zur Beschleunigung des Lösungsprozesses angewendet werden. Dazu analysiert Irnich (2002, S. 174ff) unterschiedliche Strategien, wie heuristische (bspw. Clusterung der Transportaufträge) und exakte Verfahren (bspw. Branch-and-Price-and-Cut).

Irnich schließt aus den Rechenergebnissen, dass Direktflugprobleme mit bis zu 400 Aufträgen gut mit der entwickelten Lösungsmethodik ganzzahlig gelöst werden. Beim gemischten Direkt- und Hubflugproblem sind nur Instanzen mit bis zu ca. 200 Aufträgen ganzzahlig lösbar. Die Lösung noch größerer gemischter Direkt- und Hubflugprobleme scheitert an den schnell wachsenden Rechenzeiten zur LP-Reoptimierung des Master-Problems. Selbst mit heuristischen Methoden lässt die LP-Reoptimierung das Finden ganzzahliger Lösungen „aussichtslos langsam erscheinen“ (Irnich, 2002, S. 265).

3.4.4. Planung von Stückgut-Transporten in Nordamerika

Zu der Planung von Stückgut-Transporten in Nordamerika gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen. Begonnen hat es mit der Arbeit von Powell & Sheffi (1983), in dem lokale Suchheuristiken zum Aufbau eines Netzes vorgestellt werden. Darin wird ein *Decision Support System* für die Planung von Stückgut-Transporten beschrieben. Zur Ermittlung eines *Load Planning Network* für ein Hub-and-Spoke-Netz wird ein MCNF-Problem formuliert. Ausgehend von einer Dekomposition der Problemstellung werden lokale Verbesserungsheuristiken entwickelt, bei dem ein Planer interaktiv einbezogen wird. Wesentlicher Bestandteil der Planung ist die Frage des Routings von Aufträgen (direkt oder über ein oder mehrere Hubs). Cheung & Muralidharan (2000) entwickeln

ein Verfahren, das stochastische und dynamische Eigenschaften der Problemstellung auswertet. Zusätzlich werden im Modell Echtzeit-Informationen verwertet. Daher handelt es sich vielmehr um eine operative Problemstellung. Ein weiteres Lösungsverfahren ist die Subgradienten-Lösungsmethode (Farvolden & Powell, 1994). Dieses Verfahren verwendet einen Primal-Partitioning-Algorithmus und Dekompositionsmethoden aus Farvolden et al. (1993).

Problembeschreibung

Die von den LKWs zu transportierenden homogenen Stückgüter unterscheiden sich in Volumen und Gewicht. Das Gewicht der Güter kann zwischen 45 kg und 4,5 t liegen. Die Transporte erfolgen zwischen Depots und Hubs, wobei die Depots den Start- und Endpunkt eines Transportes darstellen und am Hub die Konsolidierung erfolgt. Ein Standort kann sowohl die Aufgaben eines Depots als auch eines Hubs wahrnehmen. Die Fernverkehre werden üblicherweise in der Nacht durchgeführt, so dass die Verkehre morgens an den Depots bzw. Hubs ankommen.

Da die Transportgeschwindigkeit beim LKW im Vergleich zum Flugzeug geringer ist und die Entfernungen zwischen den Standorten in Nordamerika groß sind, können die Transportgüter nicht innerhalb eines Tages vom Start- zum Zieldepot befördert werden. Deshalb kann der Planungshorizont mehrere Tage betragen und im Modell müssen unterschiedliche Zeitperioden, z.B. Tage, berücksichtigt werden. Die Transporte von Gütern mit geringem Gewicht und Volumen müssen auf dem Weg zum Zieldepot über ein Hub laufen. Weiterhin finden mindestens einmal am Tag Transporte zwischen den Depots und deren am nächsten gelegenen Hubs statt. Diese werden unabhängig vom Auslastungsgrad der Transporte durchgeführt. Die anderen Transporte werden nur dann angeboten, wenn ausreichende Transportmengen zur Verfügung stehen. Das Planungsproblem besteht einerseits aus der Festlegung der benötigten Transporte zwischen den Depots und Hubs und andererseits aus der Bestimmung des Transportverlaufs der Güter im Netz.

Alle Güter mit dem gleichen Start- und Zieldepot und dem gleichen Liefertag werden zu einem Auftrag gebündelt. Deswegen hat jeder Auftrag einen eigenen Liefertag. Kommt ein Auftrag verspätet am Zieldepot an, fallen Strafkosten an. Im Netz finden nur Konsolidierungsverkehre über einen Hub Berücksichtigung, da Direktverkehre im betrachteten geographisch großen Netz selten vorkommen. Auch Transporte zwischen den Hubs sind erlaubt. Da es in einem so großen Netz eine Vielzahl von Depots und Hubs gibt, sind die möglichen Routen, die im Netz bedient werden, anzahlmäßig groß. In der Problemstellung soll es nicht darum gehen, Touren für die Fahrzeuge zu bilden. Daher wird ein Ungleichgewicht von leeren Fahrzeugen akzeptiert.

Das Ziel des Modells ist die Ermittlung der Menge zu bedienender Routen aus der Menge aller möglichen Routen und die Festlegung des Transportweges der Güter im Netz. Mi-

nimiert werden sollen die Kosten eines Ladeplans, die sich aus den Kosten für die Bedienung bestimmter Routen und Verspätungskosten zusammensetzen.

Lösung

Zur Lösung des Problems wird eine Subgradienten-Lösungsmethode angewendet. Die Dualvariablen im Modell sollen die Auswirkungen abschätzen, die durch die Änderung der Menge von möglichen Routen verursacht werden. Dazu wird eine Dekomposition verwendet, die zwischen zwei Typen von Entscheidungsvariablen wechselt. Wurde die Variable für die Gestaltung des Netzes (Designvariable) bestimmt, muss anschließend zur Lösung des Problems der Verlauf der Ladungen festgelegt werden. Das erhaltene Problem wird als ein MCNF-Modell formuliert. Dieses Modell beruht auf einer Netzformulierung mit zwei Nebenbedingungen: Kapazitätsrestriktion für jede Route und die Flusserhaltung zwischen den Knoten. Die erhaltenen Dualvariablen der optimalen Lösung des MCNF-Problems können zur Identifikation einer verbesserten Gesamtlösung (Minimierung der Kosten eines Ladeplans) herangezogen werden. Das Ergebnis ist eine neue Menge aller zu fahrenden Routen (ausführliche Beschreibung in Farvolden & Powell (1994, S. 258ff)).

Ein Zeit-Raum-Netz modelliert die Eigenschaften der Zeitplanung. Es gibt zwei Mengen von Knoten und drei Mengen von Pfeile im Netz. Die Knoten der ersten Menge stellen die Standorte der Depots und Hubs dar. Sie entstehen durch Duplizieren der physischen Orte gemäß den Zeitperioden der Diskretisierung, so dass ein Knoten im Zeit-Raum-Netz einem Ort innerhalb eines Zeitintervalls entspricht. Die Knoten der zweiten Menge, als Superknoten bezeichnet, werden für die Darstellung der Anforderungen der Kunden bzgl. Lieferzeitpunkt verwendet. Zu jedem Standort gehört ein Superknoten. Jeder Superknoten ist zu seinem zugehörigen Knoten in jeder Zeitperiode mit einem sogenannten Superpfeil verbunden. Die Kosten auf diesen Pfeilen bilden Strafkosten für unpünktliche Zustellungen ab. Die zweite Menge von Pfeilen sind die sogenannten *Inventory-Pfeile*, die zwischen einem Knoten der einen Region und einem Knoten der selben Region, aber in der nächsten Zeitperiode gezogen werden. Diese Pfeile geben Informationen über das Warten oder Bearbeiten wie z.B. Sortierung oder Kommissionierung der zu transportierenden Güter an. Schließlich verbinden die Servicepfeile zwei Knoten von zwei unterschiedlichen Standorten. Mit diesen Pfeilen werden die Kapazitätsrestriktionen abgebildet. Die Kapazitäten auf einem Servicepfeil ergeben sich aus der Anzahl der Fahrzeuge, die zwischen zwei Standorten zu bestimmten Zeitpunkten verkehren. Eine verwendete Testinstanz aus Farvolden & Powell (1994) mit 15 Standorten und 18 Zeitperioden enthält 285 Knoten und 1065 Pfeile. Diese Anzahl von Knoten und Pfeilen des Zeit-Raum-Netzes ergibt sich aus der zeitlichen Diskretisierung.

Das Lösungsverfahren startet mit einer fest vorgegebenen Menge von Routen, aus denen das Service-Netz erstellt wird, in dem die Güter transportiert werden. Die dadurch erhaltene MCNF- Formulierung zur Festlegung des Verlaufs der Güter im Netz wird mit

einem Primal-Partitioning-Algorithmus aus Farvolden et al. (1993) gelöst, welcher auf dem revidierten Simplex-Algorithmus basiert. Die Besonderheit des Algorithmus liegt in der Berücksichtigung von Eigenschaften der Güterdistribution. Zum einen wird jeder Transportauftrag der Route mit den geringsten Kosten zugeordnet. Im Fall, dass eine Route schon voll ausgelastet ist, wird hinsichtlich der minimalen Kosten die nächst mögliche Route gewählt. Zum anderen wird infolge eines Netzes mit hinreichender Kapazität nur ein kleiner prozentualer Anteil der Transportaufträge auf unterschiedliche Routen aufgeteilt.

Nach Einfügen von Schlupfvariablen (für weitere Informationen siehe Farvolden & Powell (1994, S. 261f)) kann eine Basis in Form einer Matrix für die LP-Lösung des MCNF-Problems gewonnen werden. Sie setzt sich aus den Variablen der nichtgeteilten Transportaufträge (erste Spalte), aus den Variablen der geteilten Transportaufträge (zweite Spalte) und den Schlupfvariablen (dritte Spalte) zusammen. Die Zeilen der Matrix sind so angeordnet, dass die Nebenbedingungen in zwei Gruppen aufgeteilt werden können: Flusserhaltung für ungeteilte und geteilte Transportaufträge und Kapazitätsrestriktionen für alle ausgelasteten und nicht ausgelasteten Pfeile.

Als Ergebnis der Aufspaltung wird die sogenannte Arbeitsbasis P als reduzierte Matrix herausgetrennt, auf die ein angepasster Simplexalgorithmus angewendet werden kann. Die Spalten von P sind die geteilten Transportaufträge und die Zeilen werden aus Restriktionen zur Flusserhaltung der geteilten Transportaufträge und aus Kapazitätsrestriktionen für ausgelastete Pfeile gebildet.

Die Aufspaltung der Matrix ermöglicht eine einfachere Berechnung der Dualvariablen, da dafür nicht die ganze Matrix, sondern lediglich P berücksichtigt werden muss. Die ermittelten Dualvariablen werden zur Verbesserung der Lösung verwendet. Die Lösung kann einerseits durch das Hinzufügen einer neuen Route und andererseits durch das Entfernen einer existierenden Route verbessert werden (siehe Abbildung 3.13). Für das Hinzufügen und Entfernen von Routen erfolgt als erstes die Ermittlung der Nichtbasisvariablen. Anschließend muss bei Hinzufügen einer Route ein Kürzeste-Weg-Problem gelöst werden und beim Entfernen werden Schnittungleichungen eingefügt, um die getrennten Routen wieder miteinander zu verbinden. Mit Hilfe der Dualvariablen findet die Bestimmung der reduzierten Transportkosten für die Nichtbasisvariablen statt. Bei der Messung der Veränderung des Zielfunktionswertes finden die Kosten für die neuen Routen und die Fixkosten Berücksichtigung. Die ersparten Kosten werden in einem Subgradient ausgedrückt. Beim Hinzufügen einer neuen Route ergibt sich der Subgradient aus der Differenz zwischen den fixen Kosten der neuen Route und den reduzierten Transportkosten über alle Routen im Netz. Für das Entfernen einer Route resultiert der Subgradient aus den dadurch ergebenden Ersparnissen und den zusätzlichen Kosten für die neu entstandenen Routen. Weiterhin unterscheidet Farvolden & Powell (1994) bei Berechnung der reduzierten Kosten zwischen den Fällen, ob geteilte oder nicht geteilte Transportaufträge und ob ausgelastete oder nicht ausgelastete Kapazitätsrestriktionen verwendet werden. Die Nichtbasisvariable mit den geringsten reduzierten Kosten gibt die Veränderung des

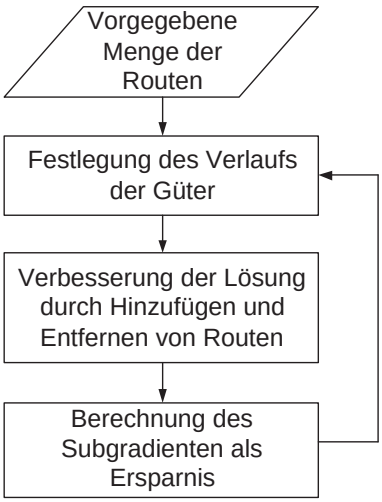

Abbildung 3.13.: Verbesserung einer Lösung für die Planung von Stückgut-Transporten in Nordamerika

Zielfunktionswertes an und wird in die Basis aufgenommen.

Durch das Hinzufügen bzw. Entfernen von Routen kommt als Ergebnis eine neue Menge von Routen heraus, die bedient werden sollen. Anschließend kann eine neue Iteration beginnen.

3.4.5. Güterverkehrsnetzplanung in Deutschland

Zur Lösung der Gestaltung eines Güterverkehrsnetzes von Sammelgutspeditionen in Deutschland entwickelt Wlček (1998) ein sukzessiv arbeitendes Dekompositionsverfahren. Nach Beschreibung der Problemstellung wird dieses Verfahren genauer erklärt.

Problembeschreibung

In der Problemstellung von Wlček (1998) werden auf der Straße durchzuführende Fernverkehre betrachtet. Die Servicezeit für den Transport vom Start- zum Zieldepot beträgt 24 Stunden. Alle verwendeten LKWs sind gleich (homogener Fuhrpark) und jeder LKW kann zwei Ladegefäße transportieren. Die zu ladenden Transportaufträge werden in der Kenngröße Transporteinheiten angegeben. An Hubs und Depots werden die Ladegefäße be- und entladen. Früheste Abfahrts- und späteste Ankunftszeiten für jedes Depot sind vorgegeben.

Die zu transportierenden Aufträge haben in Bezug zu den Transporteinheiten unterschiedliche Größen. Manche lasten ein Ladegefäß vollständig aus und andere beanspruchen nur einen Teil der vorhandenen Kapazitäten. Deshalb ist es nicht immer vernünftig,

die Transportaufträge im Direktverkehr zum Zieldepot zu transportieren. Daher werden zwei Konsolidierungsarten betrachtet: Restmengenkonsolidierung (Beiladung oder Konsolidierung über ein Hub) und Ladegefäßkonsolidierung. Falls ein Auftrag ein Ladegefäß voll auslastet, dann erscheint eine Ladegefäßkonsolidierung sinnvoll. Dazu erfolgt der Transport des Ladegefäßes nicht direkt zum Zieldepot, sondern über ein zusätzliches Depot. Am zusätzlichen Depot kann das Ladegefäß umgeladen werden. Mit Beiladung ist gemeint, dass ein nicht voll ausgelastetes Ladegefäß zum nächsten Depot transportiert wird, wo es weitere Transporteinheiten aufnehmen kann. Bei der Konsolidierung über den Hub werden Regional- und Zentralhubs betrachtet.

Eine weitere durchzuführende Planung ist die Umlaufbildung. Diese Planung verknüpft die bei der Konsolidierung geplanten Fahrzeuge zu Fahrten. Dabei werden die Fahrten soweit möglich als Rundläufe geplant oder zu Begegnungsverkehren und Umläufen kombiniert. Zusätzlich wird der Zeitplan des Fahrzeugeinsatzes ermittelt. Zwei Verkehrstypen finden im Modell Berücksichtigung: Direktverkehre und Verkehre über ein Hub mit einer maximalen Anzahl von vier Transportverbindungen. Vor allem wegen der Mehrstufigkeit der Transportwege vom Start- zum Zieldepot werden die Zeitfenster und Fahrzeiten in die Routen integriert.

Der Zweck der Umlaufplanung ist die Ausbalancierung der Fahrzeuge im Modell. Dabei erfolgt die Betrachtung unterschiedlicher Transportmodis: Planung der Fahrten als 2-Tages-Rundläufe mit oder ohne Leerfahrten oder als Kombination zwischen Begegnungsverkehren und Umläufen. Eine Umlaufplanung für die Ladegefäße wird nicht durchgeführt. Das Ziel der Planung ist die Aufstellung eines kostenminimalen Ablaufplanes für die Abwicklung der Transportvorgänge. Als Kosten sind die Transport- und Umschlagprozesse entscheidend.

Lösung

Bei dem entwickelten Algorithmus handelt es sich um ein sequentielles Dekompositionsverfahren (siehe Abbildung 3.14). Hierbei wird das Problem in drei Bestandteile aufgespalten:

- Restmengenkonsolidierung,
- Ladegefäßkonsolidierung und
- Umlaufbildung.

Bei der Restmengenkonsolidierung wird festgelegt, auf welche Art die Mengen konsolidiert und wie die Transporteinheiten bei den Konsolidierungsmaßnahmen in Ladegefäßen zusammengefasst werden. Bei der Fixierung der Konsolidierungsmaßnahmen kann es sich um drei Entscheidungen handeln: ob eine Beiladung oder ein Hubumschlag durchgeführt wird oder ob eine Konsolidierung nicht möglich ist. Dabei werden nur Transporteinhei-

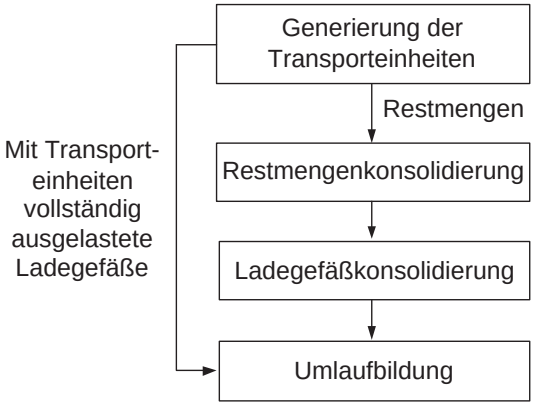

Abbildung 3.14.: Lösungsverfahren für die Güterverkehrsnetzplanung in Deutschland

ten betrachtet, die ein Ladegefäß nicht vollständig auslasten. Weiterhin werden nur die Start- und Zielpunkte der zum Transport eingesetzten Ladegefäße und nicht die kompletten Transportwege der Transporteinheiten bestimmt. Anschließend können die frühesten und spätesten Abfahrtszeiten der Ladegefäße ermittelt werden. Sie ergeben sich aus den Zeitfenstern der geladenen Transporteinheiten und den bereits festgelegten Teilen ihres Transportweges.

Im Verfahrensteil der Ladegefäßkonsolidierung wird über den Transportweg der Ladegefäße entschieden. Außerdem werden aus den Ladegefäßen mit dem gleichen Transportabschnitt Fahrzeugladungen erzeugt. Hierbei müssen die zeitlichen Transportverläufe berücksichtigt werden. Die frühesten und spätesten Abfahrtszeiten der einzelnen Fahrzeugladungen ergeben sich aus den zugehörigen Ladegefäßen. Die in den Ladegefäßen enthaltenen Ladungen können sich zum einen aus Transporteinheiten, die ein komplettes Ladegefäß ausfüllen und zum anderen aus den Restmengen der vorherigen Restmengenkonsolidierung zusammensetzen.

Das Ziel der Umlaufplanung ist die Bildung von Fahrten aus den Fahrzeugladungen, die sich aus der Ladegefäßkonsolidierung ergaben. Hier können auch verbindende Leerfahrten eingeplant werden. Die resultierenden Fahrten können Rundläufe oder Kombinationen aus Begegnungsverkehren und Rundläufen sein. Zusätzlich wird der Zeitplan des Fahrzeugeinsatzes festgelegt.

Bei dieser Vorgehensweise wird der verfügbare Zeitrahmen in jedem Teilproblem immer kleiner und das Optimierungspotential verringert sich. Daher muss beim Lösungsalgorithmus ein angemessenes Verhältnis zwischen den Ersparnissen bei der Konsolidierung und der Reduzierung des Zeitrahmens gefunden werden (Wieberneit, 2008b, S. 102).

Die implementierte Heuristik für das erste Teilproblem besteht aus zwei Abschnitten: Im ersten Abschnitt wird eine Startlösung erzeugt (Initialisierung). Im zweiten Abschnitt wird mit Hilfe eines Local-Search-Verfahrens die Startlösung verbessert.

In der Initialisierungsphase werden zunächst die Transportwege der Transporteinheiten festgelegt. Einheiten, die ein Ladegefäß mindestens zu einem vorgegebenen Anteil auslasten, werden direkt transportiert. Die übrigen Transporteinheiten werden über ein Regionalhub oder Zentralhub befördert. Anschließend muss für jede Transporteinheit eine Folge von Ladegefäßen gefunden werden, mit der der Transport erfolgen kann. Formuliert wird dies als ein Kürzeste-Wege-Problem. Durch Anwendung einer *Label-Setting-Strategie* (Markierungsalgorithmus), die auch beim Dijkstra-Verfahren Anwendung findet, wird das Problem gelöst. Anschließend sind die frühesten und spätesten Abfahrtszeiten des Ladegefäßes anzupassen. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Änderung der Zeiten auch auf die Abfahrtszeiten von anderen Ladegefäßen auswirken können. Dies gilt dann, wenn Transporteinheiten des Ladegefäßes in mehreren Stufen transportiert werden. Berechnet werden die neuen Zeitfenster aus den geladenen Transporteinheiten und den zu aktualisierenden Zeitfenstern des Ladegefäßes. Mit Hilfe eines iterativen Local-Search-Verfahrens wird versucht, die Startlösung zu verbessern. Als Kriterium einer verbesserten Lösung gilt die Einsparung eines Ladegefäßes. Erreicht werden kann dies entweder durch das Verschieben von Transporteinheiten des einen Ladegefäßes in ein anderes Ladegefäß des gleichen Transportabschnittes oder die Transportwege der Einheiten des betrachteten Ladegefäßes werden geändert.

Im zweiten Teilproblem, der Ladegefäßkonsolidierung, werden die Transporteinheiten, die Ladegefäße voll auslasten und die sich aus Restmengenkonsolidierung ergebenden Ladegefäße betrachtet. Für diese werden ihre Transportwege sowie ihre Zusammenstellung zu Fahrzeugladungen bestimmt. Das dazu implementierte Verfahren vollzieht sich nahezu analog zu dem der Restmengenkonsolidierung. Der einzige Unterschied liegt in der Initialisierung der Transportwege. Diese werden als Direkttransporte festgelegt.

Im letzten Teilproblem der Linienverkehrsplanung, der Umlaufplanung, müssen die Fahrzeugladungen in Fahrten eingeplant und fahrplanmäßig organisiert werden. Ziel der Planung ist es, einen kostenminimalen Fahrplan für die Abfertigung aller Fahrzeugladungen aufzustellen. Als Entscheidungsgrundlage werden die im Fahrplan enthaltenen Fahrten genommen. Diese Fahrten repräsentieren den Fahrzeugeinsatz. Gelöst wird die Umlaufbildung als ein ganzzahliges Set-Partitioning-Problem. Die dazu verwendete Matrix enthält bei diesem Problem für jede zu verplanende Fahrzeugladung eine Zeile. Die Kombinationen von Fahrzeugladungen, die gemeinsam in einer Fahrt abgewickelt werden können, stellen die Spalten der Matrix dar. Im ersten Schritt werden die möglichen Kombinationen von Fahrzeugladungen zu Fahrten gebildet. Dazu wird ein Column-Generation-Verfahren verwendet. Mit Hilfe eines genetischen Algorithmus erfolgt im zweiten Schritt die Fahrtauswahl. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Zeitfenster der Ladegefäße der Fahrplan bestimmt.

Durchgeführte Tests mit realen Daten lieferten Ergebnisse, die „nicht voll in die Praxis umsetzbar sind“ (Wlček (1998), S. 192). Im Vergleich zu den erzielten Ergebnissen wird in der Praxis vor allem ein deutlich höherer Anteil an Rundläufen und Begegnungsverkehren

eingeplant.

3.5. Zusammenfassung und Ableitungen

Die in den vorangegangenen Abschnitten besprochenen Arbeiten unterscheiden sich in ihren Problemmerkmalen (siehe dazu Tabelle 3.1). Aufgelistet sind die wesentlichen Problemmerkmale, die Einfluss auf die Linienverkehrsplanung haben können. Bei den Transportmitteln wurden für Barnhart et al. (2002), Irnich (2002) und Wlček (1998) zwei Transportmöglichkeiten angegeben, da die zu transportierenden Güter mit den LKWs zu den Flughäfen bzw. die Ladegefäße durch die LKWs befördert werden. Mit unterschiedlichen Transportmitteltypen ist die Unterscheidung zwischen Typen eines Transportmittels gemeint. Die Zulieferkosten sind die Transportkosten zu den Flughäfen. Bei den Standorteigenschaften wird zwischen der Anzahl Eingangstore und den Umschlagkapazitäten unterschieden, da mit der Anzahl Eingangstore der Verfügbarkeitszeitpunkt und mit der Umschlagkapazität die Belegungsdauer des zugewiesenen Eingangstores berechnet werden kann. Die Öffnungszeiten der einzelnen Stufen eines Standortes ermöglichen bei Ankunft eines Transportmittels die Unterscheidung zwischen den Stufen, die für die Verfügbarkeitszeitpunkte der geladenen Güter eines Transportmittels von Bedeutung sind. Denn ein Transportmittel kann Güter sowohl für ein Depot (Empfangsdepot) als auch für ein Hub geladen haben. Da in der Kostenfunktion von Irnich (2002) Verspätungskosten vorhanden sind, ist als Optimierungsziel auch die Maximierung des Servicegrades angegeben. Bei den zusätzlichen Restriktionen ist mit Andockzeit von Ladegefäßen die Zeit für das Umbrücken/Rangieren des Ladegefäßes an einem Eingangstor gemeint. Die bei der Problemgröße angegebene Anzahl von Mengen bzw. Commodities stehen für gebündelte Sendungen mit gleichem Empfangs- und Versanddepot.

Hauptmerkmale	**[1]**	**[2]**	**[3]**	**[4]**	**[5]**
geographisches Gebiet					
national	X	X	X	X	X
international,interkontinental					
Transportmittel					
Flugzeug	X		X		
Zug					
LKW		X		X	X
Ladegefäße					X
Güter					
homogen	X	X	X	X	X
heterogen					
mehrere Kenngrößen					
Servicezeiten					

Weiter auf der nächsten Seite

Hauptmerkmale	**[1]**	**[2]**	**[3]**	**[4]**	**[5]**
24 h	X	X	X		X
48 h oder mehr				X	
Zeitfenster für Relationen	X		X		X
Transport der Güter					
Einzeltransport		X	X		
Konsolidierung der Güter	X	X		X	X
Kosten					
Transportkosten	X	X	X	X	X
Leerfahrtkosten			X		
Umschlagkosten					X
Verspätungskosten			X		
Zulieferkosten			X		
Netz					
Direktverkehrsnetz					
Hub-and-Spoke-Netz					
Mehrhubnetz	X			X	
gemischtes Transportnetz		X	X		X
Stufigkeit der Standorte					
einstufig (nur Depot oder Hub)				X	X
mehrstufig (Depot und Hub)	X	X	X		
Typen von Hubs					
regionale		X		X	X
zentrale	X	X	X	X	X
Verkehre					
Direktverkehre	X	X	X	X	X
Verkehre über ein Hub		X	X		X
Maximale Anzahl von Hub-Umschlägen	1	1	1	beliebig	3
Standorteigenschaften					
Anzahl, Lage der Depots und Hubs	X	X	X	X	X
Anzahl Eingangstore am Hub	X	X			
Anzahl Eingangstore am Depot					
Umschlagkapazitäten an den Eingangstoren	X				
Be- und Entladedauer	X		X	X	X
Einrollverteilung (Versanddepot, Hub)					
Öffnungszeiten (Depot/Hub)	X	X			
Ziele der Optimierung					
kostenminimaler Ablaufplan für die Transportvorgänge	X	X	X	X	X
Maximierung des Servicegrades			X		

Weiter auf der nächsten Seite

Hauptmerkmale	**[1]**	**[2]**	**[3]**	**[4]**	**[5]**
zusätzliche Restriktionen					
Fahrzeit		X			X
Anzahl Transportmittel	X	X	X		X
Transportmitteltypen	X		X		
Andockzeit von Ladegefäßen					X
Zuordnung von Mengen zu einzelnen Ladegefäßen					X
maximale getestete Problemgröße					
Transportmitteltypen	7	1	4	1	1
Hubs	7	7	1	15	2
Depots	84	49	18		32
Mengen/Commodities	6606	2234	5014	2448	929

Tabelle 3.1.: Hauptmerkmale der betrachteten Arbeiten [1] Barnhart et al. (2002), [2] Wieberneit (2008a), [3] Irnich (2002), [4] Farvolden & Powell (1994), [5] Wlček (1998) (in Anlehnung an Wieberneit (2008b, S. 104f))

Aus dem Merkmalskatalog lässt sich eine größere Komplexität der betrachteten Probleme gegenüber dem allgemeinen SND-Problem ableiten. Alle diskutierten Probleme werden durch Lösung von Teilproblemen (Dekomposition der Problemstellung) gelöst. Hierbei werden unterschiedliche Netzformulierungen und Lösungsalgorithmen angewendet (siehe dazu Tabelle 3.2).

Eigenschaften	**[1]**	**[2]**	**[3]**	**[4]**	**[5]**
Dekompositionsverfahren					
nach Transportmitteln	X		X		
nach Entscheidungsvariablen	X	X		X	X
Iterativ	X	X	X	X	
Sequentiell					X
Dantzig-Wolfe-Dekomposition			X		
Netzformulierungen					
Zeit-Raum-Netzmodell	X	X		X	
Route Generation Modell	X				
Mehrgüter-Netz-Flussproblem	X	X		X	
Set-Partitioning-Problem			X		X
Cliquen-Rucksack-Problem			X		
Kürzeste-Wege-Problem	X	X		X	
Lösungsalgorithmen					
Lokale Suchheuristiken					X
genetische Algorithmen					X
Branch-and-Price-Verfahren	X	X	X		
Branch-and-Price-and-Cut-Verfahren	X		X		
Column-Generation-Verfahren	X	X	X		X
Subgradient-Verfahren				X	

Tabelle 3.2.: Eigenschaften der Lösungsmethoden von [1] Barnhart et al. (2002), [2] Wieberneit (2008a), [3] Irnich (2002), [4] Farvolden & Powell (1994), [5] Wlček (1998) (in Anlehnung an Wieberneit (2008b, S. 106f))

Die Dekomposition hängt von den betrachteten Problemstellungen ab. Außer dem Verfahren von Wlček (1998) berücksichtigen alle Verfahren Abhängigkeiten zwischen den Teilproblemen und sind iterativ. Unterschiedliche Transportmittel (LKW, Flugzeug) dienen zur Aufspaltung der Problemstellung (Barnhart et al., 2002; Irnich, 2002). Eine weitere Dekomposition wird auf Basis der Entscheidungsvariablen durchgeführt (Barnhart et al., 2002; Wieberneit, 2008a; Farvolden & Powell, 1994): Unter der Annahme, dass die Entscheidungsvariable für die Festlegung der Routen festgelegt ist, reduziert sich das Problem auf die Bestimmung der Güterflussvariable (Transportverlauf der Güter). Dazu wird das MCNF-Problem gelöst. Irnich (2002) wendet für die Bildung der Routen die Dantzig-Wolfe-Dekomposition an. Zwecks der erforderlichen Blockstruktur wird dazu ein Set-Partitioning-Problem formuliert. Wlček (1998) wählt eine sequentielle Herangehensweise: Bestimmung der Transportwege je Transporteinheit (1. Schritt), Konsolidierung der Transporteinheit zu Ladegefäßen (2. Schritt), Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen (3. Schritt) und Durchführung der Umlaufplanung für die Fahrzeuge (4. Schritt). Alle analysierten Arbeiten zeigen, dass ohne Dekomposition der Problemstellung eine Lösung schwierig ist.

Wesentliches methodisches Mittel zur Modellierung der betrachteten Problemstellungen sind die Zeit-Raum-Netze (Barnhart et al., 2002; Wieberneit, 2008a; Farvolden & Powell, 1994). Dabei wird der Planungszeitraum in eine geeignete Anzahl von Perioden zerlegt (Diskretisierung) und das Netz mit seinen Standorten für jede Periode dupliziert. Dies kann bei geeigneter Wahl der Perioden zu einem sehr großen Netz führen oder die Zeitabstände zwischen den gewählten Zeitpunkten sind zu groß. Daher werden Anstrengungen unternommen, solche reinen Zeit-Raum-Netze in ihrer Größe zu reduzieren. Um dies zu erreichen, nimmt z.B. Barnhart et al. (2002) die Routen, die in Abhol- und Zulieferrouten aufgeteilt werden, als Basis für sein Zeit-Raum-Netz, auf denen der Güterfluss geplant wird. Da bei Irnich (2002) die Transportaufträge (enge) Zeitfenster besitzen, wird im Modell auch die Kompatibilität von Transportaufträgen hinsichtlich des gemeinsamen Transports in einem Transportmittel berücksichtigt. Dadurch wird ein Zeit-Raum-Netz gänzlich vermieden. Bei Wlček (1998) wird der Fahrplan erst nach Zuordnung der Aufträge zu den Routen unter Berücksichtigung der Auftragszeitfenster ermittelt. Weitere Schritte zur Reduzierung der Größe eines Netzes werden durch aus der Praxis vorgegebene Einschränkungen wie z.B. bei der Mehrstufigkeit des Transportes einer Relation, Servicezeit, Standorteigenschaften (Öffnungszeiten) oder dem geographischen Gebiet (Fahrzeiten zwischen den Standorten) erzielt.

Bei den verwendeten Lösungsverfahren für die betrachteten Problemstellungen lassen sich keine allgemeingültigen Vorteile eines Verfahrens gegenüber den anderen ableiten. Barnhart et al. (2002), Wieberneit (2008a) und Irnich (2002) konnten mit den implementierten Branch-and-Price- und Branch-and-Price-and-Cut-Verfahren realistische Instanzen lösen. Dazu wurden geeignete Techniken wie die Composite Variable Formulierung (Kombination der Entscheidungsvariable für die Festlegung der Routen) oder Zerlegung des Problems in ein Master- und Pricing-Problem verwendet. Farvolden & Powell (1994) gelingt es, unter Berücksichtigung von Eigenschaften der Güterdistribution (operative Merkmale) ein auf den revidierten Simplex basierendes schnelles Verfahren zu entwickeln. Schließlich implementierte Wlček (1998) lokale Suchheuristiken bzw. genetische Algorithmen. Mit denen werden die Zuordnungen der Aufträge zu Ladegefäßen und Ladegefäße zu Fahrzeugrouten verbessert.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Techniken entwickelt, die auf den in diesem Abschnitt gemachten Schlussfolgerungen basieren und den für diese Arbeit geltenden praktischen Vorgaben entsprechen. Dies betrifft vor allem die Dekomposition der Problemstellung und die Formulierung des Problems mit einem nicht allzu großen Netz. Hinsichtlich des Verfahrens werden lokale Suchheuristiken entwickelt, die in Bezug auf die Praxis leicht modifizierbar sind, eine schnelle Anpassung der Planung an veränderte Anforderungen ermöglichen und nicht allzu große Rechenzeiten verursachen.

4. Modell zur Linienverkehrsplanung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung und Analyse von Instrumenten, mit denen auf Basis von praktischen Vorgaben die Linienverkehre von KEP-Dienstleistern geplant werden können. Hierfür wird im Folgenden ein Modell entwickelt, das die Aufgabenstellung definiert. Dazu wird im Abschnitt 4.1 zunächst die Problemstellung abgegrenzt und anschließend das Modell vorgestellt. Um die Beschreibung des umfangreichen Modells möglichst anschaulich zu gestalten, werden die einzelnen Parameter, Variablen, die Zielfunktion und die einzuhaltenden Nebenbedingungen der Problemstellung getrennt nacheinander festgelegt.

4.1. Abgrenzung der Problemstellung

Bezüglich der im Abschnitt 2.3.4 abgegrenzten Linienverkehrsplanung werden in dieser Arbeit die Konsolidierung von zu transportierenden Mengen zu Ladegefäßen und die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen in Verbindung mit der Festlegung von Abfahrtszeiten betrachtet. Aufgrund praktischer Vorgaben sind die Transportwege je Relation vorgegeben (aus einem vorgelagerten Planungsschritt). Als zukünftige Aufgabe verbleibt die Bestimmung der genauen Touren der Fahrzeuge und Ladegefäße mit Identifizierung von geschlossenen Umläufen, Begegnungsverkehren und One-Way-Fahrten.

Ein Beispiel für die Konsolidierung von zu transportierenden Mengen zu Ladegefäßen und die dabei zu bildenden Abfahrtszeiten für die Ladegefäße zeigt Abbildung 4.1. Zu sehen sind vier Relationen mit den zugehörigen Transportverläufen im Netz und den (Abfahrts-)Zeitfenstern für die einzelnen Transportverbindungen. Für den Transport von München nach Würzburg definieren die Relationen R1 und R2 Transportanforderungen. Die Transportmengen beider Relationen werden um 17:15 Uhr mit einem Ladegefäß abtransportiert. Die Abfahrtszeit ergibt sich aus dem engeren Zeitfenster der Relation R2. Nach der Konsolidierung im Hub in Würzburg wird die Transportmenge von R1 alleine weiter nach Düsseldorf und die Transportmenge von R2 gemeinsam mit der Menge von R4, deren Menge gemeinsam mit der Menge von R3 aus Düsseldorf kommt, nach Berlin befördert. Die Abfahrtszeiten am Hub ergeben sich aus den Ankunftszeiten der Transportmengen der Relationen am Hub und den Zeitfenstern der zu konsolidierenden Mengen der jeweiligen Relationen. Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesem stark vereinfachten Beispiel Merkmale der zu bearbeitenden Problemstel-

Abbildung 4.1.: Vereinfachtes Beispiel für die Konsolidierung von zu transportierenden Mengen zu Ladegefäßen

lung wie Einrollverteilungen, Umschlagzeiten, Kapazitäten an den Standorten und bei den Ladegefäßen und vieles mehr (vergleiche dazu Tabelle 4.2) nicht berücksichtigt werden.

Bei dem Beispiel für die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen (siehe Tabelle 4.1) ergeben sich die angegebenen Zeitfenster aus dem Abfahrtszeitpunkt des Ladegefäßes (frühester Zeitpunkt) und dem Beginn der Entladung am Zulieferort abzüglich der Fahrzeit zwischen dem Abholort und Zulieferort und der Andockzeit für das Ladegefäß (spätester Zeitpunkt) (siehe Abschnitt 4.2.5). Unter der Bedingung, dass sich eine Fahrzeugladung maximal aus zwei Ladegefäßen zusammensetzen kann, sieht eine mög-

Ladegefäße	**Zeitfenster**	**Fahrzeugladungen**
LG1	[17:15 - 17:28]	LG1 und LG2 um 17:25 Uhr
LG2	[17:25 - 17:32]	LG3 um 17:30 Uhr
LG3	[17:30 - 17:45]	

Tabelle 4.1.: Beispiel für die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen

liche Lösung für die drei angegebenen Ladegefäße wie folgt aus: Die Ladegefäße LG1 und LG2 mit der Abfahrtszeit 17:25 Uhr und das Ladegefäß LG3 mit der Abfahrtszeit 17:30 bilden jeweils eine Fahrzeugladung. Im Modell müssen im Hauptlauf Ladegefäße zu Fahrzeugladungen kombiniert werden.

In der Tabelle 4.2 werden die wichtigsten Merkmale der hier zu behandelnden Problemstellung aufgeführt. Sie wurde in Anlehnung an den Merkmalskatalog in Tabelle 3.1 erstellt und durch spezifische Eigenschaften der hier betrachteten Problemstellung ergänzt.

Problemmerkmale	**KEP-Dienst**
geographisches Gebiet	national, international (Europa)
Transportmittel	Fahrzeug, Ladegefäße
Güter	homogen, mehrere Kenngrößen (Paletten, Pakete, Dokumente, Volumen, Gewicht)
Servicezeit	24 h, 48 h oder mehr Zeitfenster für Relationen
Verkehre	Direktverkehre, Verkehre über ein Hub, unbegrenzte Anzahl von Hub-Umschlägen
Transport der Mengen	Einzeltransport oder Konsolidierung der Mengen
Kosten	Transportkosten, Strafkosten für Verspätung, Umschlagkosten
Transportnetz	gemischtes Transportnetz
Typen von Hubs	zentrale, regionale Hubs
Stufigkeit der Standorte	einstufig (nur Depot oder Hub), mehrstufig (Depot und Hub)
Standorteigenschaften	Anzahl und Lage der Depots und Hubs, Umschlagkapazitäten, Be- und Entladedauer, Anzahl Eingangstore, Öffnungszeiten, Einrollverteilung am Versanddepot und Hub
Ziele der Optimierung	Maximierung des Servicegrades, Minimierung der Anzahl Fahrzeugtransporte
zusätzliche Restriktionen	Fahrzeit, Typen und Anzahl von Ladegefäßen, Andockzeit von Ladegefäßen, Zuordnung von Mengen zu einzelnen Ladegefäßen

Tabelle 4.2.: Hauptmerkmale des betrachteten KEP-Dienstes

Gemäß den Hauptmerkmalen des Problems ist die hier betrachtete Problemstellung

aus praktischer Sicht auf KEP-Dienstleister in Europa (geographisches Gebiet) zugeschnitten. Da KEP-Dienstleister aufgrund der Europäisierung des Wirtschaftsraumes ihre Netze zunehmend grenzüberschreitend gestalten, werden hier nicht nur Eigenschaften eines nationalen sondern auch die eines internationalen Netzes berücksichtigt (vergleiche dazu Abschnitt 2.4). In diesem Netz können Mengen innerhalb von 24, 48 oder mehr Stunden vom Versanddepot zum Empfangsdepot transportiert werden (Servicezeit). Das verwendete gemischte Transportnetz enthält zwei Typen von Hubs: zentrale und regionale Hubs. Die Hubs dienen nicht nur als Umschlageinrichtungen für Relationen, sondern können auch die Funktionen eines Depots haben (Mehrstufigkeit eines Standortes).

Infolge der unterschiedlichen möglichen Servicezeiten sind die Konsolidierungsmaßnahmen für einzelne Relationen ungleich. Sie können im Direktverkehr (einstufige Relation) oder über ein oder mehrere Hubs (mehrstufige Relation) durch das Netz geleitet werden. Der Transport der Mengen einer Relation erfolgt entweder im Einzeltransport oder Mengen verschiedener Relationen werden zu einer Ladegefäßladung konsolidiert. Dies hängt vom Verlauf der Relationen und dem Umfang der zugehörigen Menge ab. Ist z.B. die Auslastung eines Ladegefäßes durch die Mengen einer Relation ausreichend groß, so werden sie als Direktverkehr eingeplant und müssen deshalb nicht mit Mengen anderer Relationen konsolidiert werden. Bei der Anzahl der Transportverbindungen der jeweiligen Relationen gibt es keine Einschränkungen.

Als Transportmittel zur Durchführung der Transportprozesse im Netz werden LKWs eingesetzt. Die Fahrzeuge sind Bestandteil eines homogenen Fuhrparks. Die Homogenität bezieht sich auf die Anzahl transportierbarer Ladegefäße, die maximal zwei beträgt. Die Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge wird für diese Planung als ausreichend angenommen, da hier nur das Ziel besteht, die Anzahl der Fahrzeugtransporte zu minimieren. Sind die Fahrzeugtransporte bekannt, können die genauen Touren der Fahrzeuge bestimmt werden. Da hier keine Umlaufplanung der Fahrzeuge durchgeführt wird, brauchen auch die Lenk- und Ruhezeitbestimmungen der EU für die Fahrer nicht berücksichtigt werden. Jedoch werden zur Ermittlung der Ankunftszeiten am Zielstandort die Fahrzeiten vom Start- zum Zielpunkt vorgegeben. Die Anzahl der eingesetzten Ladegefäße auf den einzelnen Hauptläufen (Transportabschnitten) ist fest vorgegeben. Sie ergibt sich aus der zu transportierenden Gesamtmenge auf den jeweiligen Hauptläufen. Im Netz können in Bezug auf die Ladegefäßkapazität und Andockzeit unterschiedliche Typen von Ladegefäßen eingesetzt werden. Jedoch ist der verwendete Typ eines Ladegefäßes auf einem bestimmten Hauptlauf immer gleich.

Bei den von KEP-Dienstleistern zu transportierenden Sendungen handelt es sich um homogene Güter. Daher existieren keine Einschränkungen bei der Zusammenlegung von Sendungen zu Mengen, von Mengen zu Ladegefäßen und von Ladegefäßen zu Fahrzeugen. Klassifiziert werden die Produkte durch die Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente. Aufgrund ihrer ungleichen Größe und Handhabung werden sie zusätzlich durch Gewicht und Volumen bewertet. Diese Differenzierung zwischen den einzelnen Kenngrößen

hat Einfluss auf die Ermittlung der Auslastung eines Ladegefäßes, der Umschlagdauer an einem Standort und des Servicegrades. Dabei werden für ein Ladegefäß drei verschiedene Auslastungsparameter, für die Entladung eines Ladegefäßes drei verschiedene Umschlagdauern und für den Servicegrad drei verschiedene Servicegrade berechnet. Diese Werte lassen sich aus den drei folgenden Dimensionen ermitteln:

1. Paletten, Pakete und Dokumente,
2. Volumen und
3. Gewicht.

Bei der Beladung eines Ladegefäßes mit Mengen eines Hauptlaufes wird darauf geachtet, welche Mengen von welchen Relationen welchen Ladegefäßen zugeordnet werden, da sich aus der Zuordnung von Mengen zu Ladegefäßen frühest- und spätestmögliche Abfahrtszeitpunkte der Ladegefäße ergeben. Bei einer mehrstufigen Relation haben diese Zeiten zusätzlich Einfluss auf den Zeitpunkt des Weitertransportes. Um aus den geladenen Relationen die Abfahrtszeiten der Ladegefäße zu ermitteln, werden früheste und späteste Abfahrtszeitpunkte für die Transportverbindungen der Relationen in Abhängigkeit des Transportverlaufes einer Relation, der Öffnungszeiten der Standorte und der Fahrzeiten zwischen den Standorten vor Beginn der Planung abgeleitet. Alle Zeitfenster (frühest- und spätestmögliche Abfahrtszeitpunkte) der Transportverbindungen liegen in den Öffnungszeiten der Standorte. Weiterhin handelt es sich bei diesen Zeitfenstern um fest vorgegebene Schranken, die durch die Verfügbarkeitszeitpunkte zum Abtransport der Mengen nicht verletzt werden dürfen. Beim Überschreiten des spätesten Abfahrtszeitpunktes einer Transportverbindung gelten die betroffenen Mengen für den restlichen Transportverlauf an das Empfangsdepot als verspätet. Die Ankunftszeit am Empfangsdepot spielt für die Entscheidung, ob Mengen als verspätet oder nicht verspätet gelten, keine Rolle.

Aus praktischer Sicht soll das betrachtete Problem die taktischen Planungsaufgaben in speditionellen Netzen umfassender als die bisher in der Literatur vorgestellten Arbeiten abbilden. Dazu werden beim Optimierungsverfahren neben der Anzahl und Lage weitere Eigenschaften der Depots und Hubs berücksichtigt:

- Früheste Abhol- und späteste Anlieferzeiten als Öffnungszeiten beschreiben zum einen den Zeitpunkt, ab dem die Mengen zur Abholung für den Hauptlauf am Depot bereitstehen (Abholzeit), und zum anderen den Zeitpunkt, an dem die Mengen spätestens am Depot angekommen sein müssen (Anlieferzeit).
- Analog zu den Depots werden auch an den Hubs Öffnungszeiten berücksichtigt. Diese geben die Anfangs- und Endumschlagzeit vor. Ein Beispiel für die Öffnungszeiten ist in Abbildung 2.14 dargestellt.
- Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Eingangstore ist beschränkt. Dies hat darauf Einfluss, wie viel Ladegefäße gleichzeitig entladen werden können, was wie-

derum Auswirkungen auf den Verfügbarkeitszeitpunkt der geladenen Mengen hat. Die Anzahl der Eingangstore werden an Hubs und an Empfangsdepots berücksichtigt.

- Die Anzahl der Ausgangstore wird als gleich der maximalen Anzahl ausgehender Relationen an einem Standort angenommenen und daher besteht für die Ausgangstore kein Optimierungsbedarf. Diese Vorgehensweise begründet sich mit der Schwierigkeit, für ein Ladegefäß die Belegungszeit am Ausgangstor zu berechnen, da die abzutransportierenden Mengen im Verlauf eines ganzen Tages eintreffen können. Daraus würden sich keine realistischen Belegungszeiten ergeben. In der Praxis können natürlich mehrere Relationen – i.d.R. nacheinander – am selben Tor abgewickelt werden. Das hängt aber stark von der Organisation und dem verfügbaren Platz vor Ort ab.

- Die angegebene Umschlagkapazität an den Eingangstoren drückt aus, wie viel Mengen pro Zeiteinheiten einer bestimmten Kenngröße an einem Tor umgeschlagen werden können. Sie wird zur Berechnung der Umschlagdauer für die geladenen Mengen eines Ladegefäßes benötigt.

- Die berücksichtigte standortspezifische und standardisierte Einrollverteilung gibt an, wie viel Sendungen für den ersten Transportabschnitt einer Relation zu einem bestimmten Zeitpunkt am Versanddepot zur Verfügung stehen.

- Analog zum Versanddepot berücksichtigt die Einrollverteilung am Hub, dass nicht alle weiter zu transportierenden Mengen eines Ladegefäßes zum gleichen Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Diese Einrollverteilung ist vom Start des Umladevorgangs des Ladegefäßes und der Umschlagdauer abhängig und daher durch die Planung determiniert.

- Wie schon erwähnt, kann ein Standort sowohl als Versand- und Empfangsdepot als auch als Hub dienen. Im Modell werden die unterschiedlichen Funktionen als Stufen bezeichnet, die ein Standort zu verschiedenen Tageszeiten annehmen kann.

In Bezug auf die Stufen eines Standortes werden für das Modell folgende Annahmen getroffen:

- Ein Ladegefäß kann sowohl Mengen für einen Hub als auch für ein Empfangsdepot geladen haben. Da zu den einzelnen Stufen unterschiedliche Umschlagkapazitäten vorhanden sind, können die für verschiedene Stufen eines Standortes bestimmten Mengen auch nur zu den Öffnungszeiten der jeweiligen Stufen einbezogen werden. Hierbei bestehen keine Überschneidungen zwischen den Öffnungszeiten der einzelnen Stufen. Diese Annahme hat auf die Pünktlichkeit bzw. Verspätung der einzelnen Relationen keinen direkten Einfluss, da die Zeitfenster der zugehörigen Transportverbindungen in Abhängigkeit der zugehörigen Stufen ermittelt wurden.

- Zur Berechnung der Umschlagdauer werden alle geladenen Mengen eines Ladege-

fäßes berücksichtigt. Die Umschlagdauer plus Andockzeit gibt die Belegungszeit eines Eingangstores durch ein Ladegefäß an.

- Mengen, die nicht zu der Stufe gehören, die der Standort zum Zeitpunkt der Entladung des Ladegefäßes darstellt, stehen zu dem Zeitpunkt zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung, zu denen die zugehörige Stufe ihren Anfangszeitpunkt hat. Mengen mit der passenden zugehörigen Stufe zum Zeitpunkt der Entladung des Ladegefäßes stehen vollständig nach Ende der ermittelten Umschlagdauer zur Verfügung.
- Am Empfangsdepot schon vor Ende der Öffnungszeiten begonnene, aber noch nicht abgeschlossene Entladungen eines Ladegefäßes werden vollständig berücksichtigt und das Ende der Entladung ist der in Abhängigkeit der Umschlagdauer kalkulierte Endzeitpunkt.

4.2. Modellierung der Problemstellung

Im Folgenden wird für die im vorherigen Abschnitt abgegrenzte Problemstellung ein Modell vorgestellt. Dazu wird das Modell zunächst textlich und anschließend mathematisch beschrieben.

4.2.1. Beschreibung des Modells

Die sich aus der strategischen Planung ergebende Netzstruktur liefert die Anzahl und Lage der Standorte und deren Stufen (Versand-, Empfangsdepots und Hubs) sowie die Entfernungen zwischen den Standorten und die daraus resultierenden Fahrzeiten. Zwischen den Standorten müssen auf den Transportwegen vom Versand- zum Empfangsdepot unter Berücksichtigung der Kapazitäten die aus den Sendungen gebündelten Mengen befördert werden (vergleiche dazu das MCNF-Problem im Abschnitt 3.1). Dies geschieht mit Hilfe von mit Ladegefäßen und Fahrzeugen eingerichteten Services entlang der Transportwege. Daraus ergibt sich das Service-Netz (vergleiche dazu das SND-Problem im Abschnitt 3.2). Ergänzt werden die Services durch Standorteigenschaften wie Umschlagkapazität oder Anzahl Eingangstore. Da in dieser Arbeit zwar die Fahrzeuge und Ladegefäße für die einzelnen Transportwege zur Verfügung stehen, aber keine Bestimmung der genauen Touren der Fahrzeuge und Ladegefäße mit Identifizierung von geschlossenen Umläufen, Begegnungsverkehren und One-Way-Fahrten erfolgt, wird nur ein Teil der Eigenschaften von Services wie Abfahrtszeiten, in die Ladegefäße zu ladende Mengen oder Ladungen der Fahrzeugtransporte festgelegt.

In der hier zu behandelnden Problemstellung werden Zeitkomponenten wie Servicezeiten für die zu transportierenden Sendungen oder Öffnungszeiten der Standorte berücksichtigt. Zur Abbildung dieser Zeitkomponenten können die im Abschnitt 3.3 eingeführten Zeit-Raum-Netze verwendet werden, in denen der zeitliche Horizont diskretisiert und

das Netz mit seinen Standorten für jede Periode dupliziert wird. Da aus praktischen Vorgaben die Transportwege der Relationen im Netz schon festgelegt sind und die einzelnen Transportverbindungen der jeweiligen Relationen Zeitfenster besitzen, kann ein Zeit-Raum-Netz vermieden werden. Lediglich der zeitliche Planungshorizont wird diskretisiert (siehe dazu Abschnitt 4.2.2).

Aufbauend auf das vorliegende Netz wird für die im vorherigen Abschnitt abgegrenzte Problemstellung ein Modell entworfen, welches Daten, Lösungsvariablen, Zielfunktionen und Restriktionen umfasst. Ebenfalls werden für die einzelnen Stufen der Standorte die Öffnungszeiten, Anzahl Eingangstore, Umschlagkapazitäten an den Eingangstoren und die Einrollverteilung an den Versanddepots vorgegeben. Weiterhin sind die zu transportierenden Sendungen im Netz mit deren Versand- und Empfangsdepot als statische Größen festgelegt. Die sich daraus ergebenden Relationen mit den dazugehörigen Transportverbindungen, deren Zeitfenstern und den Mengen sind ebenfalls gegebene Daten einer Problemausprägung (siehe Abschnitt 2.3.4). Die vorgegebenen Mengen der einzelnen Relationen liegen nicht immer ganzzahlig vor (z.B. 2,4 Paletten oder 20,6 Pakete). Daher wird im Modell auf die Ganzzahligkeit der zu transportierenden Mengen verzichtet. Für die Ladegefäße sind die Anzahl der verschiedenen Arten, die Kapazitäten bezüglich der einzelnen Kenngrößen und die bei Umbrückvorgängen benötigte Zeit (Andockzeit) angegeben. Hinzu kommt die Anzahl Ladegefäße einer Art, die einem Hauptlauf zur Verfügung stehen.

Die im Modell wichtigsten zu treffenden Entscheidungen sind die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßen und die Bündelung der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen. Die zweite Entscheidung baut auf der ersten auf. Im Teilmodell für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßen wird zunächst festgelegt, welchen Ladegefäßen die Transportverbindungen der einzelnen Relationen zugeordnet werden. Anschließend können die sich daraus ergebenden Abfahrts- und Ankunftszeiten der Ladegefäße bestimmt werden. Als nächstes erfolgt die Ermittlung des Beginns der Entladung am Eingangstor und der Umschlagdauer für die zu entladenen Mengen eines Ladegefäßes. Daraus resultiert, wann welche Mengen zum Weitertransport zur Verfügung stehen.

In diesem Teilmodell soll der Servicegrad, der den Anteil der am Empfangsdepot rechtzeitig angekommenen Mengen der einzelnen Relationen angibt, maximiert werden. Kommen Einheiten am Empfangsdepot nicht pünktlich an, so gelten sie als verspätet. Der Servicegrad ergibt sich entsprechend der praktischen Anforderungen aus dem größten der drei folgenden Werte:

1. Servicegrad nach den an den Empfangsdepots rechtzeitig angekommenen Mengen der Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente geteilt durch die zu transportierenden Gesamtmengen der Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente,

2. Servicegrad nach den an den Empfangsdepots rechtzeitig angekommenen Volumeneinheiten geteilt durch die zu transportierenden Gesamtvolumeneinheiten und

3. Servicegrad nach den an den Empfangsdepots rechtzeitig angekommenen Gewichtseinheiten geteilt durch die zu transportierenden Gesamtgewichtseinheiten.

Die Öffnungszeiten am Empfangsdepot werden nicht berücksichtigt, da für den Abtransport der letzten Transportverbindung einer Relation das dazugehörige Zeitfenster für den Abfahrtszeitpunkt über die Pünktlichkeit bzw. Verspätung der Relation entscheidet. Daher haben die Öffnungszeiten und der Verfügbarkeitszeitpunkt eines Eingangstores am Empfangsdepot keine Bedeutung. Alle restlichen Merkmale des Modells werden durch harte Restriktionen (d.h. unverletzlich) dargestellt.

Die im ersten Teilmodell als verspätet gekennzeichnete und somit nicht auf die Ladegefäße geladenen Mengen werden außerhalb des eigentlichen Planungsverfahren des ersten Teilmodells in Abhängigkeit der verfügbaren Kapazitäten Ladegefäßen zugeordnet. Diese Mengen haben im Fall von Ladegefäßen mit pünktlich geladenen Relationen keinen Einfluss auf die dazugehörigen Abfahrtszeitpunkte bzw. im Fall von Ladegefäßen mit nur unpünktlich geladenen Relationen sind die dazugehörigen Abfahrtszeitpunkte beliebig. Da hier kein Optimierungsbedarf besteht, erfolgt darüber keine formelle Darstellung im Modell. Alle Ladegefäße stehen für das zweite Teilmodell zur Verfügung.

Aufbauend auf die Ergebnisse der Lösung des ersten Modells soll im zweiten Teilmodell die Anzahl der Fahrzeugtransporte minimiert werden. Dazu sind bei der Festlegung der Kombinierbarkeit von Ladegefäßen Informationen wie Abfahrtszeiten und der Beginn der Entladung eines Ladegefäßes sowie die Fahrzeit für die zurückzulegende Wegstrecke wichtig. Bedingungen wie Einhaltung der Zuglänge (ein Fahrzeug kann maximal zwei Ladegefäße transportieren), Zuordnung eines Ladegefäßes nur zu einem Fahrzeug oder zueinander passende Zeitfenster zwischen zwei miteinander kombinierten Ladegefäßen sind harte Restriktionen, die eingehalten werden müssen.

Da für KEP-Dienstleister die Kundenzufriedenheit als wichtig betrachtet wird, ist die Erreichung eines möglichst hohen Servicegrades als Hauptziel vorgegeben. Dementsprechend wird zunächst das erste Teilproblem gelöst (mit Servicegradzielsetzung), wodurch gegebenenfalls eine höhere Anzahl von Fahrzeugtransporten in Kauf genommen wird.

Da das zu entwickelnde formale Modell als Lösung einen täglich anwendbaren Fahrplan liefern soll und gleichzeitig eine Servicezeit von mehr als 24 Stunden zulässig ist, gestalten sich aus technischer Sicht die Restriktionen mit zeitlichen Komponenten etwas komplizierter als wenn nur eine Servicezeit von 24 Stunden vorliegt. Hierbei muss beachtet werden, dass Relationen auf das gleiche Ladegefäß geladen werden können, die an zueinander passenden Tageszeiten, aber an unterschiedlichen Tagen zum Abtransport zur Verfügung stehen. Dazu sind Tageszeiten und Tage getrennt zu betrachten.

Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft 3 Auswirkungen für diese Vorgehensweise. Im Beispiel 1 sind zwei Relationen gegeben: Die erste Relation verkehrt innerhalb von 48 Stunden von

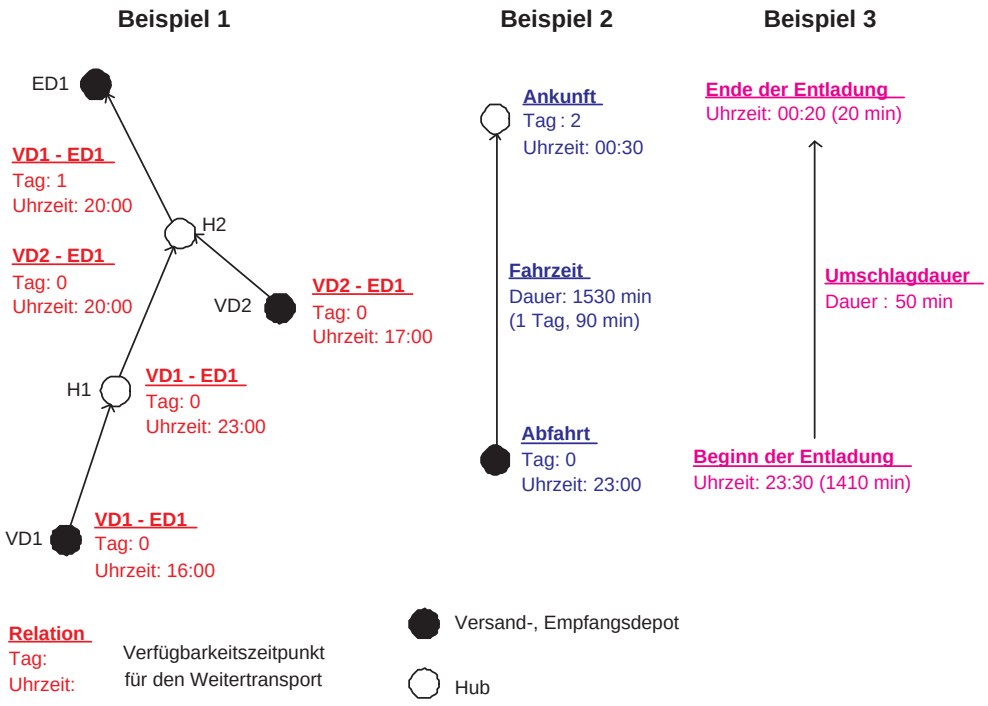

Abbildung 4.2.: Beispiele für die technische Auswirkung einer Servicezeit größer als 24 Stunden

VD1 nach ED1 über die Hubs H1 und H2. Die zweite verläuft innerhalb von 24 Stunden von VD2 über H2 nach ED1. Beide Relationen stehen um 20:00 Uhr am Hub H2 zum Weitertransport bereit. Unter Berücksichtigung der Tage unterscheiden sie sich jedoch in ihren Verfügbarkeitszeitpunkten. Deshalb sind bei einem Beginn der Planungszeit von 00:00 Uhr und der verwendeten Zeiteinheit von Minuten in dem Modell die Mengen der ersten Relation nicht erst in 2640 Minuten (24h (1 Tag) + 20h (20:00 Uhr) = 1440 Minuten + 1200 Minuten) sondern am Tag 1 und 1200 Minuten und die zweite Relation am Tag 0 und 1200 Minuten am H2 verfügbar. Ein ähnliches Problem zeigt Beispiel 2, in dem die Fahrzeit von einem Versanddepot zum Hub mehr als 24 Stunden dauert. Hierbei wird im Modell mit 1 Tag und 90 Minuten und nicht 1530 Minuten gearbeitet. Welchen Einfluss die Umschlagdauer auf die Servicezeit von mehr als 24 Stunden hat, zeigt Beispiel 3. Für ein Ladegefäß beginnt um 23:30 Uhr die Entladung, abgeschlossen ist sie um 00:20 Uhr. Daraus ergibt sich für das Ende des Umschlags ein Zeitwert von 20 Minuten und nicht 1460 Minuten. Mit der gezeigten Vorgehensweise in den Beispielen können Mengen von Relationen, die an unterschiedlichen Tagen, aber zueinander passenden Zeitpunkten verfügbar sind, auf das gleiche Ladegefäß geladen werden. Die Zeitwerte für den Tag bedürfen im Modell keiner weiteren Berücksichtigung.

4.2.2. Parameter

Allgemeine Parameter

MAXTIME: Maximale Anzahl von Zeitpunkten im Modell zur Diskretisierung der Zeit ($MAXTIME > 1$) $[-]$
Dieser Parameter wird benötigt, um den zeitlichen Verlauf des Geschehens im Modell zu beschreiben. Dabei kann der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Zeitpunkten eine oder mehrere Zeiteinheiten betragen. Je kleiner der Abstand, desto genauer ist die Planung durchführbar.

ZP_t: ($1 \leq t \leq MAXTIME$) Zeitpunkte $[ZE]$
Dieser Parameter gibt für die einzelnen Werte $t \in \{1, ..., MAXTIME\}$ die verschiedenen Zeitpunkte in der verwendeten Zeiteinheit an (im Allgemeinen handelt es sich um Minuten). Die Zeitpunkte sind aufsteigend sortiert und gleichverteilt. Der maximale Zeitpunkt $ZP_{MAXTIME}$ in der vorgegebenen Zeiteinheit entspricht 24 Stunden. Bei der verwendeten Zeiteinheit Minuten gilt z.B. $ZP_{MAXTIME} = 1440$.

MAXTV: Maximal mögliche Anzahl von Transportverbindungen auf einer Relation $[-]$
Der Parameter $MAXTV$ gibt an, wie viele Transportverbindungen eine Relation maximal haben kann. Sie wird als ein Zähler benötigt, um die einzelnen Ebenen von Transportverbindungen abarbeiten zu können. Diese Vorgehensweise berücksichtigt, dass nur etwas auf einer k-ten ($k > 1$) Transportverbindung einer Relation transportiert werden kann, was auf den vorhergehenden Transportverbindungen schon pünktlich transportiert wurde.

AnzKG: Anzahl Kenngrößen $[-]$
Mit dem Parameter $AnzKG$ wird die Anzahl der Kenngrößen in der Reihenfolge Paletten, Pakete, Dokumente, Volumen und Gewicht vorgegeben.

ZEU: Zeiteinheiten für die Umschlagkapazität eines Standortes $[ZE]$
Der Parameter ZEU beinhaltet den Zeitwert für die Umschlagkapazität eines Standortes und sagt aus, wie viel Mengen in ZEU Zeiteinheiten an einem Eingangstor umgeschlagen werden können. Wenn z.B. $ZEU = 30$ Minuten ist und die standortspezifische Umschlagkapazität an einem Standort 10 Pakete beträgt, dann können an diesem Standort an einem Eingangstor 10 Pakete in 30 Minuten umgeschlagen werden. Der Wert ZEU ist an allen Standorten gleich.

AnzL: Anzahl der zur Verfügung stehenden Ladegefäße $[-]$
Dieser Parameter gibt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Ladegefäße an. Dadurch erhält jedes Ladegefäß eine eindeutige Nummer im Planungssystem.

MaxAnzF: Maximal mögliche Anzahl von Fahrzeugtransporten $[-]$
Dieser Parameter gibt die maximal mögliche Anzahl der Fahrzeugtransporte an und er-

gibt sich aus der Summe aller zu transportierenden Ladegefäße auf den einzelnen Hauptläufen.

Zeitintervalle

Da im Modell eine Servicezeit von mehr als 24 Stunden erlaubt ist, können bei einem Zeitintervall $[a, b], a \leq ZP_{MAXTIME}, b \leq ZP_{MAXTIME}$ die Fälle $a < b$ und $a > b$ vorkommen. Um diese Fallunterscheidungen bei der Beschreibung von Restriktionen zu vermeiden, wird bei Verwendung der Symbolik $\tilde{\in}$ folgendes Intervall definiert:

$a, b \in \{ZP_1, ..., ZP_{MAXTIME}\} : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$ZP_t \tilde{\in} [a, b] :\Leftrightarrow \begin{cases} ZP_t \in [a, b] & \text{falls } (a \leq ZP_t \leq b) \vee ((a \leq ZP_t \leq ZP_{MAXTIME} \vee \\ & 0 \leq ZP_t \leq b) \wedge a > b) \\ ZP_t \in]a, b[& \text{sonst} \end{cases}$$

Parameter für Standorte

S: Anzahl der Standorte $[-]$
Der Parameter S gibt die Anzahl der Standorte im Modell an, zwischen denen die Ladegefäße verkehren.

Stufe$_i$: $(1 \leq i \leq S)$ Menge der Stufen des Standortes i $[-]$
Ein Standort kann drei verschiedene Stufen annehmen: Bei Stufe 0 handelt es sich um ein Versanddepot, bei Stufe 1 sprechen wir von einem Hub und bei Stufe 2 von einem Empfangsdepot. Daher gilt $Stufe_i \subseteq \{0, 1, 2\}$. Allgemein werden die Stufen zu verschiedenen Tageszeiten angenommen.

FAnfZP$_i^j$: $(1 \leq i \leq S; j \in Stufe_i)$ frühester Anfangszeitpunkt des Standortes i der Stufe j $[ZE]$
$FAnfZP_i^j$ gibt den frühestmöglichen Beginn der Be- und Entladung eines Ladegefäßes an.

SEndZP$_i^j$: $(1 \leq i \leq S; j \in Stufe_i)$ spätester Endzeitpunkt des Standortes i der Stufe j $[ZE]$
Dieser Zeitpunkt gibt den spätestmöglichen Beginn der Be- und Entladung eines Ladegefäßes an. Alle Zeitabstände zwischen dem Beginn und Ende der Öffnungszeiten einer Stufe eines Standortes betragen weniger als 24 Stunden.

EinTore$_i^j$: $(1 \leq i \leq S; j \in Stufe_i, j > 0)$ Anzahl der Eingangstore des Standortes i der Stufe j $[-]$
Dieser Wert gibt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Eingangstore an den Hubs und Empfangsdepots an.

Kapazi$_i^{j,k}$: $(1 \leq i \leq S; j \in Stufe_i, j > 0; 1 \leq k \leq AnzKG)$ **Umschlagkapazität des Standortes i der Stufe j für Kenngröße k pro** ZEU $[ME/ZE]$
Aus der Umschlagkapazität $Kapazi_i^{j,k}$ wird für ein Ladegefäß die Umschlagdauer ermittelt.

EV$_i^{j,t}$: $(1 \leq i \leq S; j \in Stufe_i, j = 0; 1 \leq t \leq MAXTIME)$ **Einrollverteilung des Standortes i der Stufe j zum Zeitpunkt** ZP_t [%]
Zum Zeitpunkt ZP_t sind $EV_i^{j,t}$% an Mengen der einzelnen Kenngrößen für die erste Transportverbindung einer Relation vorhanden, die am Versanddepot des Standortes i startet.

StufeZP$_i^t$: $(1 \leq i \leq S; 1 \leq t \leq MAXTIME)$ **die zu betrachtende Stufe am Standort i zum Zeitpunkt** ZP_t [−]
Zum Zeitpunkt ZP_t am Standort i wird die Stufe $StufeZP_i^t$ betrachtet. Dieser Parameter ist u.a. für die Berechnung der Verfügbarkeit eines Eingangstores an den zugehörigen Standorten erforderlich.

Der Wert $StufeZP_i^t$ wird so definiert, dass er der k-ten Stufe entspricht, wenn der zugehörige Zeitpunkt ZP_t in den betreffenden Zeitfenstern des Standortes liegt:

Festlegung der Werte von $StufeZP_i^t$
$\forall i \in \{1, ..., S\} : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\}$:

$$StufeZP_i^t = \begin{cases} k & \text{falls } \exists k \in Stufe_i : ZP_t \tilde{\in} \left[FAnfZP_i^k, SEndZP_i^k\right] \\ -1 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Definition des Wertes $StufeZP_i^t$ gilt unter der Annahme, dass es bei den Zeitfenstern eines Standortes keine Überschneidungen gibt.

Parameter zu Relationen

R: Anzahl der Relationen [−]
R beschreibt die Gesamtanzahl der Relationen.

TV$_i$: $(1 \leq i \leq R)$ **Anzahl der Transportverbindungen der Relation** i [−]
Die Anzahl der Transportverbindungen werden für die Beschreibung des Verlaufs der Relation i benötigt.

Von$_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ **Abholort der j-ten Transportverbindung der Relation i,** $Von_i^j \in \{1, ..., S\}$ [−]
Dieser Parameter definiert für die i-te Relation den Abholort der j-ten Transportverbindung.

Nach$_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ **Zulieferort der j-ten Transportverbindung der**

Relation i, $Nach_i^j \in \{1, ..., S\}$ $[-]$
Der Parameter $Nach_i^j$ definiert den Zulieferort der j-ten Transportverbindung der Relation i.

$StufeN_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ Stufe des Zulieferortes der j-ten Transportverbindung der Relation i, $StufeN_i^j \in Stufe_{Nach_i^j}$ $[-]$
Der Parameter $StufeN_i^j$ legt fest, um welchen Index es sich bei der Stufe des Zulieferstandortes $Nach_i^j$ handelt. Ein Parameter zwecks Angabe des Indexes für die Stufe am Abholort Von_i^j ist nicht notwendig, da die Stufe eines Standortes für die j-te Transportverbindung am Zielstandort gleich der Stufe ist, in der die $j+1$-te Transportverbindung der betrachteten Relation ist. Der Index für die Stufe der ersten bzw. letzten Transportverbindung einer Relation ist immer 0 (ein Versanddepot) bzw. 2 (ein Empfangsdepot).

KM_i^j: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq AnzKG)$ Mengen der Relation i der Kenngröße j $[ME]$
Der Parameter KM_i^j gibt die zu transportierenden Mengen der Kenngröße j der Relation i an.

$FAbfZP_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ frühester Abfahrtszeitpunkt der j-ten Transportverbindung der Relation i ($FAbfZP_i^j \leq ZP_{MAXTIME}$) $[ZE]$
Der Parameter $FAbfZP_i^j$ gibt an, wann frühestens die j-te Transportverbindung der Relation i bedient werden darf.

$FAbfTag_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ Tag des frühesten Abfahrtzeitpunktes der j-ten Transportverbindung der Relation i ($FAbfTag_i^j \geq 0$) $[Tage]$
Der Parameter $FAbfTag_i^j$ gibt den Tag an, in dem der früheste Abfahrtszeitpunkt $FAbfZP_i^j$ liegt.

$SAbfZP_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ spätester Abfahrtszeitpunkt der j-ten Transportverbindung der Relation i ($SAbfZP_i^j \leq ZP_{MAXTIME}$) $[ZE]$
Entsprechend zum frühesten Abfahrtszeitpunkt gibt der Parameter $SAbfZP_i^j$ an, wann spätestens die j-te Transportverbindung der Relation i bedient werden darf. Der zeitliche Abstand zwischen dem frühesten und spätesten Abfahrtszeitpunkt beträgt weniger als 24 Stunden.

$SAbfTag_i^j$: $(1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq TV_i)$ Tag des spätesten Abfahrtzeitpunktes der j-ten Transportverbindung der Relation i ($FAbfTag_i^j \geq 0$) $[Tage]$
Der Parameter $SAbfTag_i^j$ gibt den Tag an, in dem der späteste Abfahrtszeitpunkt $SAbfZP_i^j$ liegt.

Der Parameter für die Tage findet im Modell keine weitere Berücksichtigung.

Parameter zu Ladegefäßen

L: Anzahl der Ladegefäßarten $[-]$
Mit L werden die zur Verfügung stehenden Ladegefäßarten angegeben.

LKM_i^j: $(1 \leq i \leq L; 1 \leq j \leq AnzKG)$ **Kapazität der Ladegefäßart** i **für Kenngröße** j $[ME]$
Der Parameter LKM_i^j gibt an, wie viel Mengen bezogen auf Kenngröße j auf dem Ladegefäß i transportiert werden können.

$AndockZ_i$: $(1 \leq i \leq L)$ **Andockzeit der Ladegefäßart** i $[ZE]$
Die Andockzeit für das Ladegefäß i wird durch den Parameter $AndockZ_i$ beschrieben.

Parameter zum Hauptlauf

GHL: Menge aller Hauptläufe $[-]$
Der Parameter GHL drückt die Gesamtanzahl aller verschiedenen Hauptläufe im Modell aus, die sich aus der Anzahl von Transportverbindungen der Relationen mit unterschiedlichen Abhol- und Zulieferorten ergeben.

$GVon_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Abholort des** i**-ten Hauptlaufes,** $GVon_i \in \{1, ..., S\}$ $[-]$
Ein Hauptlauf kann von einem Versanddepot oder Hub starten.

$GNach_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Zulieferort des** i**-ten Hauptlaufes,** $GNach_i \in \{1, ..., S\}$ $[-]$
Ein Hauptlauf kann an einem Hub oder Empfangsdepot ankommen.

MHL_i: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Menge der Ladegefäße für den** i**-ten Hauptlauf** $[-]$
Welche Ladegefäße auf dem Hauptlauf i verkehren, wird durch den Parameter $MHL_i \subseteq \{1, ..., AnzL\}$ ausgedrückt.

MHF_i: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Menge der Fahrzeugtransporte für den** i**-ten Hauptlauf** $[-]$
Welche Fahrzeugtransporte für den Hauptlauf i zur Verfügung stehen, stellt der Parameter $MHF_i \subseteq \{1, ..., MaxAnzF\}$ dar.

$LArt_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Ladegefäßart auf dem** i**-ten Hauptlauf** $[-]$
Der Parameter $LArt_i \in \{1, ..., L\}$ definiert, welche Ladegefäßart auf dem i-ten Hauptlauf eingesetzt wird.

Fzt_i: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Fahrzeit auf dem** i**-ten Hauptlauf** $[-]$
Mit Hilfe des Parameters Fzt_i wird die Fahrzeit auf dem Hauptlauf i wiedergegeben.

$FztTag_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Anzahl Tage für die Fahrzeit auf dem** i**-ten Hauptlauf** $(FztTag_i \geq 0)$ $[Tage]$

Der Parameter $FztTag_i$ stellt die Anzahl Tage für die Fahrzeit auf dem Hauptlauf i dar. Auch dieser Parameter findet im Modell keine weitere Berücksichtigung.

Zuglaenge$_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Zuglänge der Fahrzeugtransporte auf dem i-ten Hauptlauf** $[-]$
Wegen des homogenen Fuhrparks beträgt für alle Fahrzeugtransporte die Zuglänge zwei.

Parameter zum Servicegrad

GKM$_i$: $(1 \leq i \leq AnzKG)$ **zu transportierende Mengen der einzelnen Kenngrößen** $[ME]$
Mit GKM_i wird ausgedrückt, wie viel Mengen von der Kenngröße i insgesamt transportiert werden müssen.

SumGKM: zu transportierende Gesamtmengeneinheiten aller Kenngrößen aus $GKM_i, 1 \leq i \leq 3, i \in \{1, ..., AnzKG\}$ $[ME]$
Mit $SumGKM$ wird ausgedrückt, wie viel Paletten, Pakete und Dokumente insgesamt transportiert werden müssen. Dabei werden die Gesamtmengen der einzelnen Kenngrößen aufsummiert.

Abgeleitete Parameter

RR$_i^j$: $(1 \leq i \leq GHL; 1 \leq j \leq MAXTV)$ **Menge der j-ten Transportverbindungen aller Relationen mit gleichem Abhol- und Zulieferort zum i-ten Hauptlauf**
Eine formale Darstellung dieser Menge sieht wie folgt aus:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in \{1, ..., MAXTV\} :$

$$RR_i^j := \left\{k \in \{1, ..., R\} \,|\, Von_k^j = GVon_i \wedge Nach_k^j = GNach_i \wedge j \leq TV_k\right\}$$

VorRR$_i^j$: $(1 \leq i \leq GHL; 1 \leq j \leq MAXTV - 1)$ **Menge der j-ten Transportverbindungen aller Relationen als Vorgänger zum i-ten Hauptlauf**
Eine formale Darstellung dazu sieht wie folgt aus:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in \{1, ..., MAXTV - 1\} :$

$$\begin{aligned} VorRR_i^j := \quad & \{k \in \{1, ..., R\} \,|\, Von_k^{j+1} = GVon_i \wedge Nach_k^{j+1} = GNach_i \\ & \wedge j < TV_k\} \end{aligned}$$

ZS: Menge aller Standorte, die Zulieferorte der jeweiligen Hauptläufe sind
In dieser Menge darf jeder Standort höchstens einmal vorkommen. Eine formale Dar-

stellung sieht wie folgt aus:

$$ZS := \{i \in \{1, ..., S\} \,|\exists j \in \{1, ..., GHL\} : GNach_j = i\}$$

VorLL$_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ **Menge aller Ladegefäße die Relationen für den i-ten Hauptlauf geladen haben könnten**
Die einzelnen Relationen die auf den Ladegefäßen aus der Menge $VorLL_i$ geladen wurden und Mengen für den i-ten Hauptlauf enthalten, sind Mengen aus $VorRR_i^j, 1 \leq j \leq MAXTV-1$. Die dazugehörige formale Formulierung sieht wie folgt aus:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\}$:

$$\begin{aligned} VorLL_i := \quad & \{l \in MHL_j, \forall j \in \{1, ..., GHL\}, j \neq i | \exists m \in \{1, ..., MAXTV - 1\} : \\ & \exists k \in VorRR_i^m : Von_k^m = GVon_j \wedge Nach_k^m = GNach_j \wedge m < TV_k\} \end{aligned}$$

4.2.3. Lösungsvariablen

Ladegefäße

AbfZPL$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Abfahrtszeitpunkt des i-ten Ladegefäßes** $[ZE]$
$AbfZPL_i$ gibt den Abfahrtszeitpunkt des i-ten Ladegefäßes am Abholort an.

SAbfZPL$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **spätestmöglicher Abfahrtszeitpunkt des Ladegefäßes** i $[ZE]$
Die Variable $SAbfZPL_i$ definiert den spätestmöglichen Abfahrtszeitpunkt des Ladegefäßes i. Eine Variable für den frühestmöglichen Abfahrtszeitpunkt muss nicht definiert werden, da dieser Wert der Abfahrtszeitpunkt $AbfZPL_i$ des Ladegefäßes i ist. Aus den zwei Variablen $AbfZPL_i$ und $SAbfZPL_i$ ergibt sich für das Ladegefäßes i das Zeitfenster.

AnkZPL$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Ankunftszeitpunkt des Ladegefäßes** i $[ZE]$
Die Variable $AnkZPL_i$ definiert den Ankunftszeitpunkt des Ladegefäßes i am Zulieferort.

LgelKM$_j^{l,m,t}$: $(1 \leq i \leq GHL; j \in MHL_i; 1 \leq l \leq AnzKG; 1 \leq k \leq MAXTV; m \in RR_i^k; t \in \{1, ..., MAXTIME\})$ **geladene Mengen der Kenngröße l der k-ten Transportverbindung der m-ten Relation auf dem j-ten Ladegefäß zum Zeitpunkt** t $[ME]$
Die Variable $LgelKM_j^{l,m,t}$ gibt die geladenen Mengen der Kenngröße l der k-ten Transportverbindung der m-ten Relation auf dem j-ten Ladegefäß an.

LgelKME$_i^l$: $(1 \leq i \leq AnzL; 1 \leq l \leq AnzKG)$ **geladene Mengen der Kenngröße l**

mit Fahrt zum Empfangsdepot auf dem i-ten Ladegefäß $[ME]$
Die Variable $LgelKME_i^l$ gibt die geladenen Mengen der Kenngröße l mit Fahrt zum Empfangsdepot an.

STUZ$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Zeitpunkt des Starts der Umschlagzeit des i-ten Ladegefäßes** $[ZE]$
Die Variable $STUZ_i$ gibt den Beginn der Umschlagzeit an.

ENUZ$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Zeitpunkt des Endes der Umschlagzeit des i-ten Ladegefäßes** $[ZE]$
Wann die Umschlagzeit für die geladenen Mengen eines Ladegefäßes enden, hängt vom Beginn der Umschlagzeit und der Umschlagdauer ab.

TUD$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Umschlagdauer für das Ladegefäß** i $[ZE]$
Die Variable TUD_i gibt die Umschlagdauer des Ladegefäßes i an.

PA$_j^{m,t}$: $(1 \leq i \leq GHL; j \in MHL_i; 1 \leq k \leq MAXTV - 1; m \in RR_i^k, k < TV_m; 1 \leq t \leq MAXTIME)$ **prozentualer Anteil der verfügbaren Mengen der Relation** m **zum Zeitpunkt** t **des Ladegefäßes** j $[\%]$
$PA_j^{m,t}$ muss nur für Relationen berechnet werden, wo das Ladegefäß j nicht die letzte Transportverbindung der Relation m transportiert.

EinDauer$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Dauer der Besetzung eines Eingangstores durch das Ladegefäß** i $[ZE]$
Wie lange ein Ladegefäß ein Eingangstor belegt, hängt von der Dauer der Umschlagzeit und der Andockzeit ab.

EinVerfZP$_i$: $(1 \leq i \leq AnzL)$ **Verfügbarkeitszeitpunkt eines Eingangstores für Ladegefäß** i $[ZE]$
Die Variable $EinVerfZP_i$ gibt an, zu welchem Zeitpunkt ein Eingangstor für das Ladegefäß i am Zulieferort zur Verfügung steht.

AnzEinT$_i^t$: $(1 \leq i \leq S; 1 \leq t \leq MAXTIME)$ **Anzahl belegter Eingangstore zum Zeitpunkt** t **am Standort** i $[-]$
Wie viele Eingangstore zum Zeitpunkt t am Standort i besetzt sind, wird durch die Variable $AnzEinT_i^t$ bestimmt.

VorhandenKE$_j^{m,t}$: $(1 \leq i \leq GHL; j \in MHL_i; 1 \leq k \leq MAXTV; m \in RR_i^k;$
$1 \leq t \leq MAXTIME)$ **Mengen von der m-ten Relation sind zum Zeitpunkt** ZP_t **auf dem j-ten Ladegefäß vorhanden oder nicht** $[-]$
$VorhandenKE_j^{m,t}$ ist eine binäre Variable und ist eins wenn Mengen der Relation m durch das Ladegefäß j transportiert werden und sonst null.

Verfügbare Mengen

Die Anzahl verschiedener Hauptläufe *GHL* gibt vor, wie viel unterschiedliche Strecken für die einzelnen Ladegefäße es gibt. Für diese einzelnen Strecken wird eine Variable definiert, die für die jeweiligen Zeitpunkte $t \in \{1, ..., MAXTIME\}$ die verfügbaren Mengen zum Abtransport angibt.

$\mathbf{VME}_i^{l,j,t}$: $(1 \leq i \leq GHL; 1 \leq l \leq AnzKG; 1 \leq k \leq MAXTV; j \in RR_i^k; 1 \leq t \leq MAXTIME)$ **Mengen der j-ten Relation auf dem i-ten Hauptlauf der Kenngröße l zum Zeitpunkt** t $[ME]$
Die verfügbaren Mengen $VME_i^{l,j,t}$ für den Hauptlauf i müssen auf die vorhandenen Ladegefäße geladen werden.

Servicegrad einer Lösung

Mit den Konstanten *SumGKM* und $GKM_i, i \in \{1, ..., AnzKG\}$ wissen wir bereits, wie viel Mengen insgesamt transportiert werden müssen. Um den Servicegrad ermitteln zu können, brauchen wir Informationen, wie viel Mengen der einzelnen Kenngrößen der jeweiligen Relationen pünktlich transportiert wurden. Dazu werden folgende Variablen definiert:

$\mathbf{PGKM}_i$: $(1 \leq i \leq AnzKG)$ **pünktlich angekommene Gesamtmengeneinheiten der Kenngrößen Paletten, Pakete, Dokumente, Volumen und Gewicht** $[ME]$
Mit $PGKM_i$ wird ausgedrückt, wie viel Mengen von der Kenngröße i pünktlich angekommen sind.

PSumGKM: Summe der pünktlich angekommenen Gesamtmengeneinheiten der Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente $[ME]$
Mit *PSumGKM* wird ausgedrückt, wie viel Mengen insgesamt der Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente pünktlich angekommen sind. Dabei werden die Gesamtmengen der ersten drei Kenngrößen aus $PGKM_i$ aufsummiert.

Fahrzeugtransporte

$\mathbf{AbfZPF}_i$: $(1 \leq i \leq MaxAnzF)$ **Abfahrtszeitpunkt des Fahrzeugtransportes** i $[ZE]$
Ist die Variable $AbfZPF_i \geq 0$, dann findet die Fahrt des Fahrzeugtransportes i statt. Soll die Fahrt des Fahrzeugtransportes i nicht stattfinden, so wird $AbfZPF_i = -1$ gesetzt.

$\mathbf{AnzGelLG}_i$: $(1 \leq i \leq MaxAnzF)$ **Anzahl geladener Ladegefäße auf dem Fahrzeugtransport** i $[-]$

Die Variable $AnzGelLG_i$ gibt an, wie viel Ladegefäße der Fahrzeugtransport i geladen hat.

$ZOLGF_i^j$: $(1 \leq i \leq AnzL; 1 \leq j \leq MaxAnzF)$ binäre Variable für die Feststellung, ob das i-te Ladegefäß dem j-ten Fahrzeugtransport zugeordnet ist $[-]$
$ZOLGF_i^j$ ist eins, wenn das i-te Ladegefäß durch den Fahrzeugtransport j transportiert wird und sonst null.

4.2.4. Konsolidierung der Mengen

Als erstes werden die zu transportierenden Mengen der einzelnen Relationen zu Ladungen für die Ladegefäße konsolidiert. Anschließend werden die beladenen Ladegefäße zu Fahrzeugladungen kombiniert. Daher handelt es sich um zwei mathematische Modelle, wobei das Letztere auf die Ergebnisse des Ersteren aufbaut.

Zielfunktion

Eine Lösung des Modells soll den Servicegrad maximieren. Dazu werden alle zu transportierenden und rechtzeitig gelieferten Mengen zum Empfangsdepot betrachtet. Sei in diesem Zusammenhang Y eine zulässige Lösung des Modells, so ist der Zielfunktionswert aus den schon genannten drei möglichen Servicegraden wie folgt zu ermitteln:

$$ZFW(Y) = \max\{PSumGKM/SumGKM, PGKM_4/GKM_4, PGKM_5/GKM_5\}$$

Nebenbedingungen

Bestimmung der pünktlich angekommenen Mengen

Die drei Variablen $PSumGKM, PGKM_4$ und $PGKM_5$ lassen sich wie folgt berechnen:

1. pünktlich angekommene Gesamtmengeneinheiten der Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente:

$$PSumGKM = \sum_{i=1}^{AnzL} \sum_{l=1}^{3} LgelKME_i^l$$

2. pünktlich angekommene Gesamtvolumeneinheiten:

$$PGKM_4 = \sum_{i=1}^{AnzL} LgelKME_i^4$$

3. pünktlich angekommene Gesamtgewichtseinheiten:

$$PGKM_5 = \sum_{i=1}^{AnzL} LgelKME_i^5$$

Berechnung der geladenen Mengen an das Empfangsdepot

Kenngrößen 1 bis 5:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} :$

$$LgelKME_j^l = \sum_{k=1}^{MAXTV} \sum_{\substack{\forall m \in RR_i^k \\ k = TV_m}} \sum_{t=1}^{MAXTIME} LgelKM_j^{l,m,t}$$

Dabei bedeutet die Bedingung $\forall m \in RR_i^k : k = TV_m$, dass nur Transportverbindungen berücksichtigt werden, die für die zugehörige Relation die Fahrt zum Empfangsdepot darstellen.

Abfahrtszeitpunkt eines Ladegefäßes

Der Abfahrtszeitpunkt $AbfZPL_i$ eines Ladegefäßes $i \in \{1, ..., AnzL\}$ hängt von den Zeitfenstern und Verfügbarkeitszeitpunkten der Transportverbindungen der pünktlich geladenen Relationen ab. Zunächst muss der Abfahrtszeitpunkt eines Ladegefäßes in den Zeitfenstern der geladenen Relationen liegen:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k :$
$\exists t \in \{1, ..., MAXTIME\} : VorhandenKE_j^{m,t} = 1 :$

$$AbfZPL_j \quad \tilde{\in} \quad \left[FAbfZP_m^k, SAbfZP_m^k\right]$$

Des Weiteren muss $AbfZPL_j$ mindestens so groß wie der späteste Verfügbarkeitszeitpunkt der geladenen Relationen sein:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} : VME_i^{l,m,t} * VorhandenKE_j^{m,t} > 0 :$

$$AbfZPL_j \quad \tilde{\in} \quad \left[ZP_t, SAbfZP_m^k\right]$$

Wenn ein Ladegefäß keine Relationen geladen hat, dann ist $AbfZPL_j$ beliebig:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k :$
$\sum_{t=1}^{MAXTIME} VorhandenKE_j^{m,t} = 0 :$

$$AbfZPL_j \quad \in \quad [ZP_1, ZP_{MAXTIME}]$$

Die verwendete Variable $VorhandenKE_j^{m,t}$ stellt sicher, dass nur Relationen Berücksichtigung finden, deren Mengen durch das j-te Ladegefäß auch transportiert werden:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k :$
$\forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$ZW_j^{k,m,t} = \sum_{l=1}^{3} LgelKM_j^{l,m,t}$$

$$VorhandenKE_j^{m,t} = \begin{cases} 1 & \text{falls } ZW_j^{k,m,t} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Zur Bestimmung des Zwischenwertes $ZW_j^{k,m,t}$ brauchen nur die ersten drei Kenngrößen verwendet werden, da die Einheiten Volumen und Gewicht automatisch für diese vorgegeben sind.

Start und Ende der Umschlagzeit

Die Ankunftszeit an einem Standort sagt noch nichts darüber aus, ab wann die Umschlagzeit beginnt. Deren Startzeitpunkt hängt von der Verfügbarkeit eines Eingangstores am Zulieferort und der Andockzeit des betreffenden Ladegefäßes ab. Die Fallunterscheidung ist wegen der zulässigen Servicezeit von mehr als 24 Stunden erforderlich.

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : m \in \{1, ..., L\}, m = LArt_i :$

$$STUZ_j \quad = \begin{cases} EinVerfZP_j + AndockZ_m & \text{falls } EinVerfZP_j + \\ & AndockZ_m \leq ZP_{MAXTIME} \\ EinVerfZP_j + AndockZ_m - ZP_{MAXTIME} & \text{sonst} \end{cases}$$

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i :$

$$ENUZ_j \qquad = \begin{cases} STUZ_j + TUD_j & \text{falls } STUZ_j + TUD_j \leq \\ & ZP_{MAXTIME} \\ STUZ_j + TUD_j - ZP_{MAXTIME} & \text{sonst} \end{cases}$$

Für die Umschlagdauer TUD_j werden zunächst Zwischenwerte ermittelt, aus denen an-

schließend das Maximum für die Umschlagdauer verwendet wird.

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : k \in \{1, ..., S\}, k = GNach_i : l \in Stufe_k, l = StufeZP_k^{STUZ_j}$:

Kenngrößen 1 bis 3

$$ZW1_j = \left(\sum_{h=1}^{3} \sum_{m=1}^{MAXTV} \sum_{\forall n \in RR_i^m} \sum_{t=1}^{MAXTIME} \frac{LgelKM_j^{h,n,t}}{Kapazi_k^{l,h}} \right) * ZEU$$

Volumen

$$ZW2_j = \left(\sum_{m=1}^{MAXTV} \sum_{\forall n \in RR_i^m} \sum_{t=1}^{MAXTIME} \frac{LgelKM_j^{4,n,t}}{Kapazi_k^{l,4}} \right) * ZEU$$

Gewicht

$$ZW3_j = \left(\sum_{m=1}^{MAXTV} \sum_{\forall n \in RR_i^m} \sum_{t=1}^{MAXTIME} \frac{LgelKM_j^{5,n,t}}{Kapazi_k^{l,5}} \right) * ZEU$$

Maximum
$\forall i \in \{1, ..., AnzL\}$:

$$TUD_i = \max \{ZW1_i, ZW2_i, ZW3_i\}$$

Bei Berechnung der Umschlagdauer wird vorausgesetzt, dass $TUD_i < ZP_{MAXTIME}$ ($\forall i \in \{1, ..., AnzL\}$) gilt.

Berücksichtigung der Einrollverteilung

Aufgrund der Einrollverteilung stehen Anteile von Mengen für die erste Transportverbindung der einzelnen Relationen erst zu vorgegebenen Zeiten zur Verfügung. Für die einzelnen Zeitpunkte lassen sich die Anteile wie folgt berechnen:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} : p \in \{1, ..., S\}, p = GVon_i : r \in Stufe_p, r = 0 :$
$k \in \{1, ..., MAXTV\}, k = 1 : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} : \forall j \in RR_i^k :$
$ZP_t \tilde{\in} \left[FAbfZP_j^k, SAbfZP_j^k\right]$:

$$VME_i^{l,j,t} = KM_j^l * EV_p^{r,t} - \sum_{m=1}^{t-1} VME_i^{l,j,m}$$

Diese Bedingung gilt unter der Annahme $t > 0$ für den ersten Wert $EV_p^{r,t} > 0$ und $t < MAXTIME$ für den ersten Wert $EV_p^{r,t} = 1$ an allen Versanddepots des Standortes p. Wenn es zum Zeitpunkt ZP_t auch frühere Zeitpunkte gibt, an denen Men-

gen von einzelnen Relationen schon berücksichtigt wurden, dann werden diese nicht mehr zum Zeitpunkt ZP_t berücksichtigt. Hierbei muss ZP_t auch in den Zeitfenstern der ersten Transportverbindung der jeweiligen Relation liegen. Wichtig ist auch, dass nur die Einrollverteilung des Standortes verwendet wird, von wo aus der Hauptlauf beginnt.

Prozentualer Anteil der verfügbaren Mengen

Wenn die Umschlagdauer für die geladenen Mengen eines Ladegefäßes sehr lang ist, stehen trotzdem nicht alle Mengen erst mit dem Ende der Umschlagzeit zur Verfügung. Sondern zu den einzelnen Zeitpunkten $ZP_t \tilde{\in} [STUZ_j, ENUZ_j]$ können bereits während des Abladevorgangs abgeladene Mengen berücksichtigt werden (Einrollverteilung am Hub). Wie hoch der zu berücksichtigende Anteil zum Zeitpunkt ZP_t ist, wird mit $PA_j^{m,t}$ ausgedrückt. Hierbei muss zwischen den Öffnungszeiten der Stufen eines Standortes unterschieden werden, da Relationen mit Fahrt zum Hub ebenso am Empfangsdepot entladen werden können. Für Relationen mit Fahrt zum Empfangsdepot ist keine Ermittlung von Verfügbarkeitszeitpunkten erforderlich.

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV - 1\} : \forall m \in RR_i^k, k < TV_m :$
$\forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$PA_j^{m,t} = \begin{cases} \frac{ZP_t - STUZ_j}{TUD_j} & \text{falls } ZP_t \tilde{\in} [STUZ_j, ENUZ_j] \\ & \wedge ZP_t \geq STUZ_j \\ & \wedge STUZ_j \tilde{\in} \\ & \left]FAnfZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k}, SEndZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k}\right] \\ \frac{ZP_{MAXTIME} - STUZ_j + ZP_t}{TUD_j} & \text{falls } ZP_t \tilde{\in} [STUZ_j, ENUZ_j] \\ & \wedge ZP_t < STUZ_j \\ & \wedge STUZ_j \tilde{\in} \\ & \left]FAnfZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k}, SEndZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k}\right] \\ 1 & \text{falls } ZP_t = FAnfZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k} \\ & \wedge STUZ_j \tilde{\in} \\ & \left]FAnfZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k}, SEndZP_{GNach_i}^{StufeN_m^k}\right[\\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Konsistenz zwischen den Transportverbindungen einer Relation

Da eine Relation aus mehreren Transportverbindungen bestehen kann, kann auf einer nachfolgenden Transportverbindung einer Relation nicht mehr transportiert werden, als was auf den vorhergehenden Transportverbindungen pünktlich transportiert wurde:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} : \forall k \in \{2, ..., MAXTV\} : \forall m \in VorRR_i^k : \forall t \in$

$\{2, ..., MAXTIME\}$:

$$VME_i^{l,m,t} = \sum_{\substack{\forall j \in VorLL_i \\ ZP_t \tilde{\in} [STUZ_j, ENUZ_j]}} \sum_{\forall n \in \{1,...,MAXTIME\}} (LgelKM_j^{l,m,n} * PA_j^{m,t}$$

$$- LgelKM_j^{l,m,n} * PA_j^{m,t-1})$$

Der Fall $t = 1$ muss wegen der Servicezeit von mehr als 24 Stunden extra behandelt werden und sieht wie folgt aus:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} : \forall k \in \{2, ..., MAXTV\} : \forall m \in VorRR_i^k$:

$$VME_i^{l,m,1} = \sum_{\substack{\forall j \in VorLL_i \\ ZP_1 \tilde{\in} [STUZ_j, ENUZ_j]}} \sum_{\forall n \in \{1,...,MAXTIME\}} (LgelKM_j^{l,m,n} * PA_j^{m,1}$$

$$- LgelKM_j^{l,m,n} * PA_j^{m,MAXTIME})$$

Bei Berechnung der Mengen für den i-ten Hauptlauf wird berücksichtigt, was auf den vorhergehenden Ladegefäßen transportiert wurde. Dies erfolgt für jede in Betracht kommende Relation m über die Summe aller Ladegefäße aus der Menge $VorLL_i$.

Berechnung der zu ladenden Mengen

Bei Berechnung der zu ladenden Mengen muss der zugehörige Verfügbarkeitszeitpunkt berücksichtigt werden:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall n \in RR_i^k$:

$$LgelKM_j^{l,n,t} \leq VME_i^{l,n,t} - \sum_{\substack{\forall m \in MHL_i \\ m \neq j}} LgelKM_m^{l,n,t}$$

Diese Bedingung stellt sicher, dass nicht mehr Mengen der Kenngrößen 1 bis 5 auf ein Ladegefäß geladen werden als zum Zeitpunkt ZP_t zur Verfügung stehen. Außerdem können nur die Mengen Berücksichtigung finden, die sich noch nicht auf einem anderen Ladegefäß befinden.

Einhaltung der Ladegefäßkapazitäten

Die Ladegefäße haben für die zu transportierenden Mengen in Bezug auf die Kenngrößen unterschiedliche Kapazitäten, die eingehalten werden müssen:

Kenngrößen 1 bis 3:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : n \in \{1, ..., L\}, n = LArt_i :$

$$\sum_{l=1}^{3} \sum_{k=1}^{MAXTV} \sum_{\forall m \in RR_i^k} \sum_{t=1}^{MAXTIME} \frac{LgelKM_j^{l,m,t}}{LKM_n^l} \leq 1$$

Volumen:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : n \in \{1, ..., L\}, n = LArt_i :$

$$\sum_{k=1}^{MAXTV} \sum_{\forall m \in RR_i^k} \sum_{t=1}^{MAXTIME} \frac{LgelKM_i^{4,m,t}}{LKM_n^4} \leq 1$$

Gewicht:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : n \in \{1, ..., L\}, n = LArt_i :$

$$\sum_{k=1}^{MAXTV} \sum_{\forall m \in RR_i^k} \sum_{t=1}^{MAXTIME} \frac{LgelKM_j^{5,m,t}}{LKM_n^5} \leq 1$$

Konsistenz zwischen geladenen und verfügbaren Mengen einer Relation

Die auf den einzelnen Ladegefäßen geladenen Mengen der jeweiligen Relationen dürfen die vorgegebenen Mengen einer Relation nicht überschreiten:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in \left\{1, ..., RR_i^k\right\} : \forall l \in \{1, ..., AnzKG\} :$

$$\sum_{\forall j \in MHL_i} \sum_{t=1}^{MAXTIME} LgelKM_j^{l,m,t} \leq KM_m^l$$

Gleicher Anteil der Mengen von allen Kenngrößen

Es muss sichergestellt werden, dass, wenn ein prozentualer Anteil der Einheiten Paletten, Pakete und Dokumente einem Ladegefäß zugeordnet werden, dann auch der selbe prozentuale Anteil des Volumens und Gewichts aufgeladen wird. Das Gleiche gilt für die Kenngrößen Paletten, Pakete und Dokumente untereinander.

Gleiche Anteile von Paletten, Pakete und Dokumente:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k :$
$\forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$\frac{LgelKM_j^{1,m,t}}{VME_i^{1,m,t}} = \frac{LgelKM_j^{2,m,t}}{VME_i^{2,m,t}} = \frac{LgelKM_j^{3,m,t}}{VME_i^{3,m,t}}$$

Für die zweite Restriktion wird zur vereinfachten Darstellung der Wert $ZW_j^{k,m,t}$ berechnet:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k :$
$\forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$ZW_j^{k,m,t} = \sum_{l=1}^{3} \frac{LgelKM_j^{l,m,t}}{VME_i^{l,m,t}}$$

Daraus folgt:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV\} : \forall m \in RR_i^k :$
$\forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$ZW_j^{k,m,t} = \frac{LgelKM_j^{4,m,t}}{VME_i^{4,m,t}} = \frac{LgelKM_j^{5,m,t}}{VME_i^{5,m,t}}$$

Bestimmung der Verfügbarkeitszeitpunkte von Eingangstoren

Es dürfen zum gleichen Zeitpunkt nicht mehr Eingangstore belegt werden als Eingangstore vorhanden sind. Hierbei muss berücksichtigt werden, wie lange ein Ladegefäß aufgrund der Belegungsdauer ein Tor blockiert. Unter der Bedingung $TUD_j + AndockZ_m < ZP_{MAXTIME}$ lässt sich diese Zeit wie folgt berechnen:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : m \in \{1, ..., L\}, m = LArt_i :$

$$EinDauer_j = TUD_j + AndockZ_m$$

Anschließend kann für jeden einzelnen Zeitpunkt die Anzahl belegter Eingangstore eines Standortes ermittelt werden. Dabei wird der Zähler $AnzEinT_i^t$ um eins nach oben gezählt, wenn der zu betrachtende Zeitpunkt im Belegungszeitraum eines Ladegefäßes liegt:

$\forall i \in ZS : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$

$$AnzEinT_i^t = \sum_{\substack{\forall j \in \{1,...,GHL\} \\ GNach_j = i}} \sum_{\substack{\forall k \in MHL_j \\ ZP_t \tilde{\in} [EinVerfZP_k, \\ EinVerfZP_k + EinDauer_k]}} 1$$

Daraus resultiert, dass die Anzahl belegter Eingangstore nicht die Anzahl vorhandener Eingangstore überschreiten darf:

$\forall i \in ZS : \forall j \in \{1, ..., GHL\}, GNach_j = i : \forall t \in \{1, ..., MAXTIME\} : m \in Stufe_i, m =$

$StufeZP_i^t$:

$$AnzEinT_i^t \leq EinTore_i^m$$

Weiterhin muss garantiert werden, dass der Verfügbarkeitszeitpunkt eines Eingangstores für ein Ladegefäß nicht früher als die Summe aus Abfahrtszeit und Fahrzeit des betreffenden Ladegefäßes und nicht später als der kleinste späteste Abfahrtszeitpunkt der weiter zu transportierenden geladenen Relationen ist. Zur Bildung des Zeitfensters für den Verfügbarkeitszeitpunkt erfolgt dazu zunächst die Ermittlung der Ankunftszeit:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i :$

$$AnkZPL_j = \begin{cases} AbfZPL_j + Fzt_i & \text{falls } AbfZPL_j + Fzt_i \leq ZP_{MAXTIME} \\ AbfZPL_j + Fzt_i - ZP_{MAXTIME} & \text{sonst} \end{cases}$$

Daraus folgt:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV - 1\} : \forall m \in RR_i^k, k < TV_m :$
$\sum_{t=1}^{MAXTIME} VorhandenKE_j^{m,t} > 0 :$

$$EinVerfZP_j \quad \tilde{\in} \quad \left[AnkZPL_j, SAbfZP_m^{k+1}\right]$$

Zum anderen muss $EinVerfZP_j$ in den Öffnungszeiten des Standortes liegen:

$\forall i \in ZS : \forall k \in \{1, ..., GHL\}, GNach_k = i : \forall j \in MHL_k : t \in \{1, ..., MAXTIME\} :$
$l \in Stufe_i, StufeZP_i^t \neq -1, l = StufeZP_i^t :$

$$EinVerfZP_j \quad \tilde{\in} \quad \left[FAnfZP_i^l, SEndZP_i^l\right]$$

Das Gleiche gilt für den Wert $EinVerfZP_j + EinDauer_j$:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : \forall k \in \{1, ..., MAXTV - 1\} : \forall m \in RR_i^k, k < TV_m :$
$\sum_{t=1}^{MAXTIME} VorhandenKE_j^{m,t} > 0 :$

$$EinVerfZP_j + EinDauer_j \quad \tilde{\in} \quad \left[EinVerfZP_j, SAbfZP_m^{k+1}\right]$$

Öffnungszeiten des Standortes:

$\forall i \in ZS : \forall k \in \{1, ..., GHL\}, GNach_k = i : \forall j \in MHL_k : \forall l \in \{1, ..., MAXTV - 1\} :$
$\exists m \in RR_k^l, l < TV_m : \sum_{t=1}^{MAXTIME} VorhandenKE_j^{m,t} > 0 \wedge StufeZP_i^{EinVerfZP_j} = 1 :$

$$EinVerfZP_j + EinDauer_j \quad \tilde{\in} \quad \left[EinVerfZP_j, SEndZP_i^1\right]$$

Hier sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der weichen Öffnungszeiten am Empfangsdepot Relationen mit Fahrt zum Empfangsdepot nicht berücksichtigt werden und der

Endzeitpunkt der Entladung von Ladegefäßen am Empfangsdepot nicht in den Öffnungszeiten liegen muss.

4.2.5. Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen

Nachdem die Ladegefäße beladen wurden, soll in diesem Abschnitt das Teilmodell für die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen aufgestellt werden. Dabei werden die Ergebnisse des vorhergehenden Modells übernommen. Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Anzahl Fahrzeugtransporte.

Im Modell werden alle Ladegefäße berücksichtigt. Jedoch besitzen nur Ladegefäße harte Zeitfenster für die Kombination zu Fahrzeugladungen, wenn sie pünktlich abtransportierte Mengen geladen haben. Dazu wird folgende Menge definiert:

GelPuenktlich: Menge aller Ladegefäße, die pünktlich abtransportierte Mengen geladen haben $[-]$

$$\begin{aligned} GelPuenktlich := \quad & \{j \in MHL_i, \forall i \in \{1, ..., GHL\}, | \exists k \{1, ..., MAXTV\} : \\ & \exists m \in RR_i^k : \exists t \in \{1, ..., MAXTIME\} : VorhandenKE_j^{m,t} = 1\} \end{aligned}$$

Zielfunktion

Die Anzahl benötigter Fahrzeugtransporte ergibt sich aus der Aufsummierung aller möglichen Fahrzeugtransporte mit $AbfZPF_i \geq 0$. In diesem Zusammenhang wird der Zielfunktionswert für eine zulässige Lösung Y folgendermaßen ermittelt:

$$ZFW(Y) = \quad \min(\sum_{\substack{\forall i \in \{1,...,MaxAnzF\} \\ AbfZPF_i \geq 0}} 1)$$

Nebenbedingungen

Bei der Festlegung des Wertes $SAbfZPL_i$ ($i \in \{0, ..., AnzL\}$) sind unter Berücksichtigung der Servicezeit größer als 24 Stunden der Beginn der Entladung und die Fahrzeit für die zurückzulegende Wegstrecke des Ladegefäßes i wichtig:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i : j \in GelPuenktlich : m \in \{1, ..., L\}, m = LArt_i :$

$$SAbfZPL_j = \begin{cases} STUZ_j - Fzt_i - AndockZ_m & \text{falls } STUZ_j - Fzt_i - AndockZ_m \geq 0 \\ ZP_{MAXTIME} + & \\ (STUZ_j - Fzt_i - AndockZ_m) & \text{sonst} \end{cases}$$

Beim Transport der Ladegefäße durch ein Fahrzeug muss die maximale Zuglänge eingehalten werden:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHF_i :$

$$AnzGelLG_j \leq Zuglaenge_i$$

Die Anzahl geladener Ladegefäße wird wie folgt ermittelt:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHF_i :$

$$AnzGelLG_j = \sum_{\substack{\forall k \in MHL_i \\ ZOLGF_k^j = 1}} 1$$

Ein Ladegefäß darf nur einem Fahrzeugtransport zugeordnet werden:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHL_i :$

$$\sum_{\forall k \in MHF_i} ZOLGF_j^k = 1$$

Wenn zwei Ladegefäße durch ein Fahrzeug transportiert werden, dann müssen die Zeitfenster der beiden Ladegefäße zueinander passen:

$\forall i \in \{1, ..., GHL\} : \forall j \in MHF_i : \forall k \in MHL_i, ZOLGF_k^j = 1 :$

$$AbfZPF_j \quad \tilde{\in} \quad [AbfZPL_k, SAbfZPL_k]$$

Für das hier beschriebene Modell Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen wird im Abschnitt 5.6 eine Variante vorgestellt und zur Lösung angewendet. Für die Zielfunktion im Modell vom Abschnitt 5.6 wird zur Minimierung der Kosten eine Kostenmatrix eingesetzt, die Zuordnungskosten für die Kombination von Ladegefäßen angibt. Durch die Berücksichtigung von Zuordnungskosten wird nicht nur die Anzahl der Fahrzeugtransporte minimiert, sondern es werden auch die Kombinationen von Ladegefäßen gegenüber alternativen Kombinationen bevorzugt, deren Abfahrtszeitpunkte näher beieinander liegen.

5. Lösungsverfahren und Fallstudien

In diesem Kapitel soll für die im Kapitel 4 beschriebene Problemstellung ein heuristisches Lösungsverfahren entwickelt werden, welches auf einer Zerlegung in Teilprobleme beruht: Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen in Verbindung mit der Festlegung von Zeitfenstern für die Bestimmung der Abfahrtszeiten und Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen in Verbindung mit der Festlegung der Abfahrtszeiten. Hierbei baut das letztere Teilproblem auf den Ergebnissen des ersten Teilproblems auf. Die Leistungsfähigkeit der zu untersuchenden Lösungsstrategien werden vor allem mittels der Kriterien Servicegrad, Rechenzeit und Anzahl benötigter Fahrzeugtransporte beurteilt. Bei der Betrachtung der Lösungsqualität der Ergebnisse einzelner Teilprobleme werden bezugnehmend auf das Gesamtverfahren Zusammenhänge hergestellt. In Bezug auf die Vorgaben aus der Praxis ist das Hauptziel der Untersuchungen, für die Linienverkehrsplanung einen sehr guten Servicegrad (mindestens 90%) bei einer angemessenen Rechenzeit ($<$ 1 Stunde) zu erzielen.

Im Folgenden wird im Abschnitt 5.1 näher auf die Implementierung und verwendete Hardware eingegangen. Auf die verwendeten realen Datensätze wird im Abschnitt 5.2 näher eingegangen. Anschließend wird zunächst im Abschnitt 5.3 das Teilproblem Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßen genauer betrachtet. Hierbei werden Problemfelder wie

1. Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen (Abschnitt 5.3.1),
2. Diskretisierung der Zeit (Abschnitt 5.3.2),
3. Identifizierung von ungeeigneten Mengen (Abschnitt 5.3.3) und
4. Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren (Abschnitt 5.4)

behandelt. Die Untersuchungen werden so durchgeführt, dass immer die Lösungsstrategie für die nachfolgenden Untersuchungsbereiche zum Einsatz kommt, die bezüglich des Servicegrades die besten Ergebnisse liefert. Wenn wir z.B. bei der Diskretisierung der Zeit mit Einminutenintervallen die besten Ergebnisse erhalten, dann kommt nur diese Lösungsstrategie für die nachfolgenden Untersuchungen zum Einsatz. Aufbauend auf den Ergebnissen des Teilproblems Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßen wird im Abschnitt 5.6 das Lösungsverfahren für die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen beschrieben und bewertet.

5.1. Hardware- und Softwareumgebung

Aufgrund von praktischen Vorgaben erfolgte die Implementierung des Lösungsverfahren für die Linienverkehrsplanung unter Anwendung von Microsoft Visual Studio 2008 in der Programmiersprache VB.NET. In dieser Umgebung wurden auch die Optimierungsalgorithmen von CPLEX eingebunden. Die empirischen Tests wurden auf einem Standard-PC mit einem Pentium D (dual core) 3 GHz Intel Prozessor und 4 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

Bei der Implementierung wurden unterschiedliche Techniken eingesetzt. Im Folgenden werden die fünf wichtigsten Merkmale genauer erläutert. Zunächst wurden Strukturen definiert, die benutzerdefinierte Datentypen darstellen. In ihnen werden Variablen (Eigenschaften) unterschiedlichen Datentyps gebündelt, die inhaltlich zusammengehören. Zum Beispiel wurden Strukturen für Ladegefäße, Standorte oder Relationen definiert. Eine zweites wichtiges Kennzeichen der Implementierung war die Definition von drei Modulen. Ein Modul ist für die Steuerung des Programmablaufs zuständig. In diesem werden die Module für den Datenimport inklusive der Datenaufbereitung und für die Linienverkehrsplanung aufgerufen. Für weitere Informationen über Strukturen und Module siehe z.B. Kühnel & Leibbrandt (2009).

Das dritte wichtige Kennzeichen der Implementierung ist der Aufbau einer Indexstruktur, mit der es möglich ist, auf die Daten in einer großen Datensammlung schnell zuzugreifen und dadurch die Rechenzeit für eine Linienverkehrsplanung stark zu reduzieren. Zum Beispiel wird beim Import der Daten für jedes Ladegefäß eine Liste gebildet, in der sich die Positionen für die zugehörigen Standorte und seinen Stufen aus der Liste *Standort* befinden. Somit wird z.B. bei der Abfrage der Öffnungszeiten eines Standortes für ein Ladegefäß vermieden, die ganze Liste der Standorte zu durchsuchen. In einer weiteren Indexliste für ein Ladegefäß wird die Position einer jeden Relation aus der Liste gespeichert, die die Information über die geladenen Relationen dieses Ladegefäßes angibt. Dies ist vor allem für die Ermittlung der Daten hilfreich, welche Relationen in welchem Umfang (bezüglich der Mengen) im mehrstufigen Prozess pünktlich weiter transportiert werden konnten. Schließlich wurden noch die im Abschnitt 4.2.2 zusätzlich definierten Konstanten

- RR_i^j: $(1 \leq i \leq GHL; 1 \leq j \leq MAXTV)$ als die Menge der j-ten Transportverbindungen aller Relationen mit gleichem Abhol- und Zulieferort zum i-ten Hauptlauf,
- $VorRR_i^j$: $(1 \leq i \leq GHL; 1 \leq j \leq MAXTV - 1)$ Menge der j-ten Transportverbindungen aller Relationen als Vorgänger zum i-ten Hauptlauf oder
- $VorLL_i$: $(1 \leq i \leq GHL)$ Menge aller Ladegefäße die Relationen für den i-ten Hauptlauf geladen haben könnten

berücksichtigt. Die Bildung dieser Mengen erfolgt beim Importieren der Daten aus der Datenbank.

Das letzte wichtige Merkmal ist die Implementierung einer Testfunktion, die die Richtigkeit der erzielten Ergebnisse sicherstellt. So eine Funktion ist aufgrund des Umfangs der getesteten Datensätze notwendig und basiert auf Plausibilitätstests, wie z.B.,

- dass alle zu befördernden Mengen auch am Empfangsdepot ankommen,
- dass der Abtransport der Mengen von den einzelnen Relationen in den zugehörigen Zeitfenstern liegt oder
- dass nur die Mengen im mehrstufigen Prozess pünktlich weiter transportiert werden, die auch schon auf den vorherigen Stufen pünktlich transportiert wurden.

Weiterhin wird in dieser Arbeit CPLEX 10.100 von der Firma ILOG (ILOG, 2009a) für die Teilprobleme Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren und Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen verwendet. CPLEX kann mit seinen Optimierungsalgorithmen in Lösungsverfahren für Optimierungsprobleme direkt eingebunden werden. Hierfür stehen Klassenbibliotheken für unterschiedliche Entwicklungsumgebungen wie .NET oder Java zur Verfügung. Optimierungsprobleme können lineare oder konvex quadratische Zielfunktionen, lineare oder quadratisch beschränkte Nebenbedingungen und diskrete oder kontinuierliche Variablen haben (ILOG, 2007). Zur Lösung unterschiedlicher Problemstellungen stehen Optimierer wie

- ILOG CPLEX Simplex Optimizer,
- ILOG CPLEX Barrier Optimizer,
- ILOG CPLEX Mixed Integer Optimizer (MIP) und
- ILOG CPLEX Parallel Optimizer

mit unterschiedlichen Tuning-Optionen und Presolve-Algorithmen zur Verkleinerung der Problemgröße zur Verfügung. Für weiterführende Literatur siehe ILOG (2009c).

Im Rahmen dieser Arbeit wird für bestimmte Teilprobleme der MIP zur Lösung von Optimierungsproblemen mit gemischt-ganzzahligen oder binären Variablen und linearen oder quadratischen Zielfunktionen eingesetzt.

5.2. Datensätze

Die hier behandelte Linienverkehrsplanung wurde in Kooperation mit dem Unternehmen PROLOGOS erarbeitet. PROLOGOS bietet die Software PRODISI CEP an (Abbildung 5.1), welche folgende Planungsfelder von KEP-Dienstleistern unterstützt:

- Netzstruktur,
- Anzahl, Lage, Kapazitäten und Arbeitszeiten der Standorte,

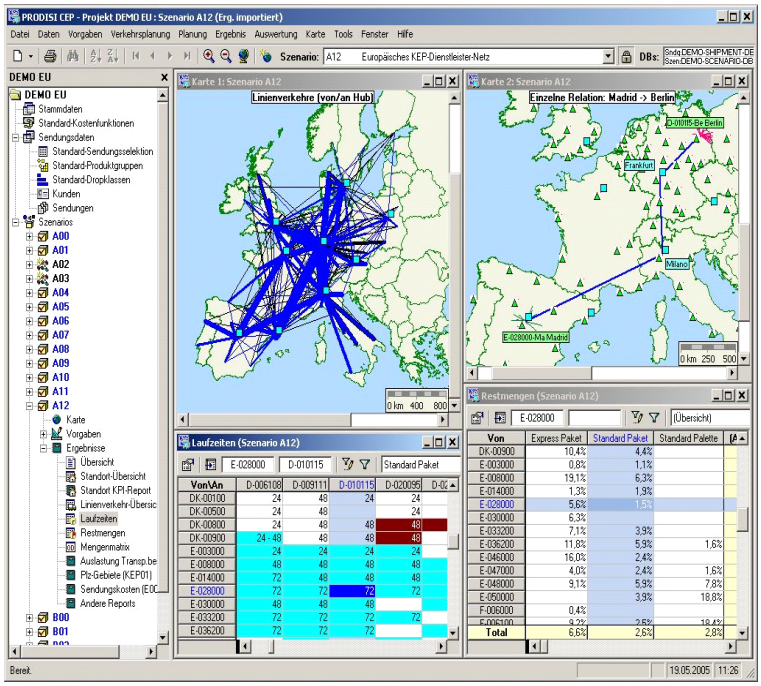

Abbildung 5.1.: Planungstool PRODISI CEP (Prologos, 2009)

- Sammel- und Verteilgebiete sowie Fuhrparkgröße aller Versand- und Empfangsdepots,
- Laufzeiten und ggf. Restmengen für alle Transportrelationen und Produkte,
- Anzahl, Kapazitäten und Fahrpläne für Linienverkehre.

Der letzte Punkt, die Linienverkehrsplanung, kann mit dem hier beschriebenen und neu entwickelten Lösungsansatz durchgeführt werden. Hierbei wird die Bestimmung der Transportwege je Relation in einem vorgelagerten Schritt unter Berücksichtigung der festgelegten Netzstruktur mit der Software PRODISI CEP bestimmt. Wie schon erwähnt, umfasst die Bestimmung des Transportweges einer Relation die Angabe der Versand- und Empfangsdepots sowie von Hubs, an denen umgeschlagen wird. Der Transportweg jeder Relation kann somit aus mehreren Transportverbindungen/-abschnitten bestehen.

Für Tests der Linienverkehrsplanung stehen zwei reale Datensätze zur Verfügung, die komplett aus der relationalen Datenbank von PRODISI CEP herausgelesen werden. Der Beispieldatensatz Frankreich (siehe Abbildung 5.2 und Tabelle 5.1) wird zunächst dazu verwendet, einige Plausibilitätstests wie Diskretisierung der Zeit oder Identifizierung von „schlechten“ Mengen durchzuführen. Die Ergebnisse für diese Tests sind auf den Beispieldatensatz Europa (siehe Abbildung 5.3 und Tabelle 5.2) übertragbar. Da jedoch im Datensatz Frankreich die Standorteigenschaften Anzahl Eingangstore und Umschlagkapazitäten an einem Eingangstor nicht enthalten sind, kann bei dem Teilproblem Zuord-

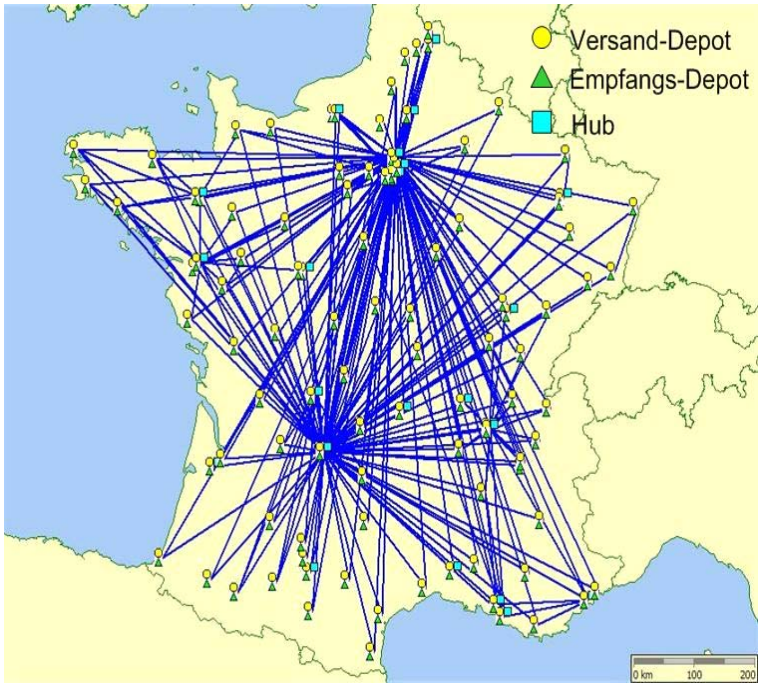

Abbildung 5.2.: Beispieldatensatz Frankreich (Prologos, 2009)

Problemmerkmale	**Ausprägung**
Versanddepots	ca. 70
Anzahl Hubs	ca. 10
Anzahl Empfangsdepots	ca. 90
maximale Servicezeit	48 h
Anzahl Relationen	ca. 6.000
Gesamtanzahl Transportabschnitte	ca. 12.000
maximale Anzahl Transportabschnitte	ca. 3
Anzahl Paletten	ca. 16.000
Anzahl Pakete	ca. 125.000
Volumen	ca. 16.000 qm
Gewicht	ca. 3.000 t
Anzahl Ladegefäße	ca. 1.300
Anzahl Ladegefäßtypen	2
obere Schranke für Servicegrad	98,93%
untere Schranke Anzahl Fahrzeugtransporte	756

Tabelle 5.1.: Hauptmerkmale des Beispieldatensatzes Frankreich

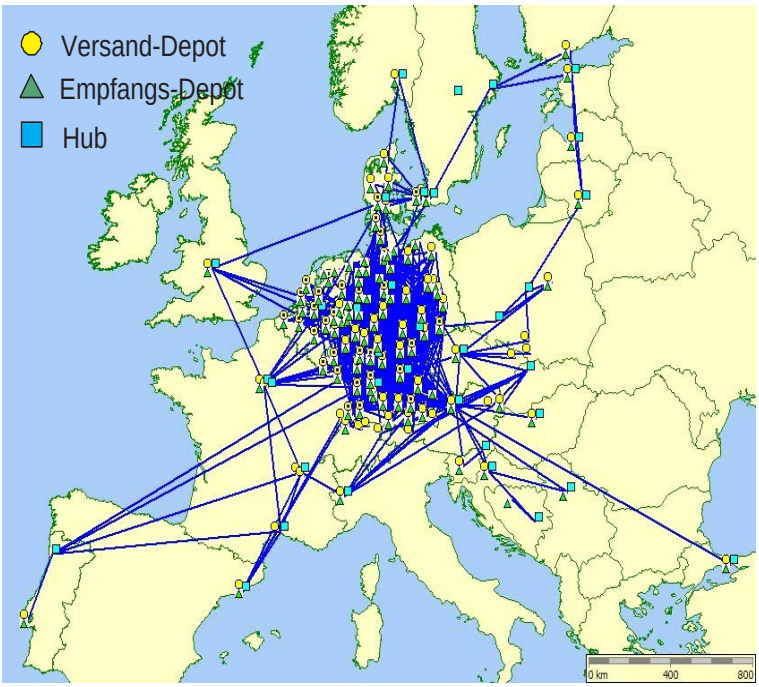

Abbildung 5.3.: Beispieldatensatz Europa (Prologos, 2009)

Problemmerkmale	**Ausprägung**
Anzahl Versanddepots	ca. 90
Anzahl Hubs	ca. 30
Anzahl Empfangsdepots	ca. 100
maximale Servicezeit	96 h
Anzahl Relationen	ca. 20.000
Gesamtanzahl Transportabschnitte	ca. 50.000
maximale Anzahl Transportabschnitte	ca. 9
Anzahl Pakete	ca. 1.600.000
Anzahl Ladegefäße	ca. 4.000
Anzahl Ladegefäßtypen	2
obere Schranke für Servicegrad	98,58%
untere Schranke Anzahl Fahrzeugtransporte	2345

Tabelle 5.2.: Hauptmerkmale des Beispieldatensatzes Europa

Abbildung 5.4.: Einzelne Transportabschnitte der Relationen Stufen zuteilen

nung von Ladegefäßen zu Eingangstoren für Tests lediglich der Beispieldatensatz Europa Berücksichtigung finden.

In den Tabellen der Beispieldatensätze gibt es das Merkmal Gesamtanzahl Transportabschnitte, das sich aus der Anzahl Relationen und der Anzahl Transportabschnitte der einzelnen Relationen ergibt. Bei z.B. zwei gegebenen Relationen mit zwei bzw. drei Transportabschnitten liegen insgesamt fünf Transportabschnitte vor. Weiterhin wird mit dem Merkmal maximale Anzahl Transportabschnitte ausgedrückt, was die höchste Anzahl Transportabschnitte einer Relation ist. Die vorgegebene Anzahl Ladegefäße ergibt sich aus der Aufsummierung aller Ladegefäße, die für die einzelnen Hauptläufe zur Verfügung stehen. Sie wurden in Abhängigkeit der zu transportierenden Mengen und der zur Verfügung stehenden Ladegefäßtypen auf den jeweiligen Hauptläufen berechnet.

Um die erzielten Ergebnisse bezüglich der Qualität einordnen zu können, wurden für die zwei Datensätze bezüglich des Servicegrades bei Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen obere Schranken und bezüglich der Anzahl Fahrzeugtransporte bei der Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen untere Schranken in den Tabellen 5.1 und 5.2 angegeben. Die einfachen oberen Schranken für den Servicegrad ergeben sich aus dem maximal möglichen Servicegrad von 100% abzüglich der Mengen, die aufgrund der Einrollverteilung am Versanddepot nicht zu 100% zum spätestmöglichen Abfahrtszeitpunkt zur Verfügung stehen. Die einfache untere Schranke für die Anzahl der Fahrzeugtransporte resultiert aus der Summe der notwendigen Transporte auf den einzelnen Hauptläufen.

5.3. Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen

Für das Teilproblem Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen wurde eine regelbasierte Konstruktionsheuristik entwickelt. Die Heuristik basiert auf einer Zuordnung der einzelnen Transportverbindungen zu Stufen: erste Transportverbindung zur Stufe eins, zweite Transportverbindung zur Stufe zwei, dritte Transportverbindung zur Stufe drei usw. (vgl. dazu Abbildung 5.4). Um in jeder Stufe möglichst viele Mengen pünkt-

lich weiterzuleiten, werden die Stufen bei eins beginnend sukzessive abgearbeitet. Diese Vorgehensweise berücksichtigt, dass auf der zweiten bzw. höher liegenden Stufe nur das pünktlich weitergeleitet werden kann, was auf den vorhergehenden schon pünktlich transportiert wurde.

Im Verfahren (siehe Verfahren 1) werden mit der ersten Stufe beginnend alle vorhandenen Stufen durchlaufen. Für jede Stufe existieren Hauptläufe, auf denen Mengen transportiert werden müssen. Diese Hauptläufe sind nach Start- und Zielpunkt sortiert und durch Ladegefäße gekennzeichnet. Die Anzahl der Ladegefäße auf den einzelnen Hauptläufen ist so groß, dass alle zu transportierenden Mengen transportiert werden können.

Verfahren 1 Pseudocode des Verfahrens für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen

for all Stufen **do**
  for all Hauptläufe auf der gewählten Stufe **do**
    1 Berechnung der verfügbaren Mengen
    2 wähle ein Ladegefäß für Beladung
     2.1 in der Reihenfolge nach Verfügbarkeitszeitpunkt,
     2.2 dabei Zeitfenster und Kapazitäten beachten,
     2.3 ggf. „schlechte“ Mengen von Relationen identifizieren und als verspätet kennzeichnen
    3 Aktualisierung der Kennzahlen des Ladegefäßes
     3.1 dabei Zuordnung vom Ladegefäß zu Eingangstor
    4 wenn Mengen noch verfügbar, wähle neues Ladegefäß und gehe zu 2
  end for
end for
Berechnung des Servicegrades

Bei der ersten Stufe werden unter Berücksichtigung der Einrollverteilung und Festlegung, in welchen Zeitabständen (z.B. Intervalle von 15 oder 30 Minuten) vorgegangen werden soll, die für Transporte verfügbaren Mengen ermittelt. Bei einer höheren Stufe stehen bei der Ermittlung der verfügbaren Mengen die Mengen zur Verfügung, die auf der vorhergehenden Stufe pünktlich transportiert wurden. Dabei können die relevanten Mengen auf verschiedene Ladegefäße geladen sein und daher unterschiedliche Verfügbarkeitszeitpunkte haben. Weiterhin hängt der Verfügbarkeitszeitpunkt der Mengen von der Verfügbarkeit eines Eingangstores und von der Umschlagdauer ab. Die Umschlagdauer ergibt sich aus der Umschlagkapazität am Eingangstor und wird zwecks Einrollverteilung in mehrere Zeitintervalle aufgeteilt. Die berechneten Mengen werden nach den Verfügbarkeitszeitpunkten aufsteigend sortiert.

Nach Ermittlung der verfügbaren Mengen können diese unter Berücksichtigung der Zeitfenster und Kapazitäten auf die vorhandenen Ladegefäße geladen werden. Hierbei können nur Mengen zusammen auf ein Ladegefäß geladen werden, deren Zeitfenster zueinander

passen. Da es auf den einzelnen Hauptläufen Mengen mit sehr engen Zeitfenstern geben kann, die eine schlechte Auslastung mit pünktlich geladenen Mengen von Ladegefäßen verursachen, müssen diese identifiziert und als verspätet gekennzeichnet werden. Dafür wurden unterschiedliche Strategien eingeführt (siehe Abschnitt 5.3.3). Anschließend können die Kennzahlen des betrachteten Ladegefäßes aktualisiert werden (etwa die früheste und späteste Abfahrtszeit und Auslastungswerte). Der früheste und späteste Abfahrtszeitpunkt eines Ladegefäßes ergibt sich aus den Zeitfenstern und Verfügbarkeitszeitpunkten der pünktlich geladenen Mengen der jeweiligen Relationen.

Bei Beachtung der Standortkapazitäten werden für ein Ladegefäß am Zielstandort der Verfügbarkeitszeitpunkt eines Eingangstores und die Umschlagdauer ermittelt. Dazu werden Informationen wie Öffnungszeiten, Umschlagkapazitäten, Anzahl Eingangstore und Andockzeit eines Ladegefäßes berücksichtigt. Das Ziel bei der Ermittlung des Verfügbarkeitszeitpunktes eines Eingangstores ist im Verfahren 1 die Maximierung der zeitlichen Auslastung der Eingangstore, da sie einen Engpass im ganzen System bilden (siehe Abschnitt 5.4). Die Festlegung des Starts des Umschlags und der Umschlagdauer ist wichtig für den Verfügbarkeitszeitpunkt der Mengen, die weiter transportiert werden müssen.

Eine Alternative zur Berechnung des Verfügbarkeitszeitpunktes eines Eingangstores zeigt Verfahren 2. In diesem Fall erfolgt die Zuordnung zu einem Eingangstor erst nach der Abarbeitung aller Hauptläufe auf der gewählten Stufe. Diese alternative Vorgehensweise hat für den Beispieldatensatz Frankreich noch keine Auswirkungen, da in ihm die Anzahl Eingangstore und Umschlagkapazitäten keine Berücksichtigung finden. Deshalb wird diese Alternative erst im Abschnitt 5.4 näher betrachtet.

Verfahren 2 Pseudocode des alternativen Verfahrens für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen

```
for all Stufen do
  for all Hauptläufe auf der gewählten Stufe do
    1 Berechnung der verfügbaren Mengen
    2 wähle ein Ladegefäß für Beladung
     2.1 in der Reihenfolge nach Verfügbarkeitszeitpunkt,
     2.2 dabei Zeitfenster und Kapazitäten beachten,
     2.3 ggf. „schlechte“ Mengen von Relationen identifizieren und als verspätet kennzeichnen
    3 Aktualisierung der Kennzahlen des Ladegefäßes
    4 wenn Mengen noch verfügbar, wähle neues Ladegefäß und gehe zu 2
  end for
  Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren
end for
Berechnung des Servicegrades
```

Konnten nicht alle verfügbaren Mengen auf das gewählte Ladegefäß geladen werden,

wird das nächste Ladegefäß des betroffenen Hauptlaufes ausgewählt; falls keines mehr vorhanden ist, gelten die restlichen Mengen als verspätet.

Mit diesem Verfahren können durch wechselnde Parametereinstellungen unterschiedliche Lösungen berechnet werden (siehe nachfolgende Abschnitte). Aus der erhaltenen Lösung wird der zugehörige Servicegrad aus dem Maximum der Servicegradkennzahlen hinsichtlich Gewicht, Volumen und Pakete + Paletten + Dokumente ermittelt.

Im Folgenden werden zunächst mit dem Verfahren 1 einige Verfahrenstechniken bzw. Parametertests durchgeführt, die Aufschluss über das Verhalten beim Auffinden einer Lösung geben. Hierbei wird nur ein repräsentativer Teil aller getesteten Kombinationen gezeigt, da dadurch keine Informationen verloren gehen. Anschließend kann nach Auswahl geeigneter Einstellungen im Verfahren die Alternative zur Berechnung des Verfügbarkeitszeitpunktes eines Eingangstores (siehe Verfahren 2) getestet werden.

5.3.1. Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen

Wie schon erwähnt, ist in der hier zu behandelnden Problemstellung in Abhängigkeit der Datensätze eine Servicezeit von mehr als 24 Stunden zulässig. Dadurch können unterschiedliche Relationen mit dem gleichen Ladegefäß transportiert werden, die an zueinander passenden Tageszeiten aber an unterschiedlichen Tagen zum Abtransport zur Verfügung stehen. Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 4.2 im Abschnitt 4.2.1. Welche Auswirkungen die Berücksichtigung dieser Eigenschaft (bezeichnet mit *ein Tag*) hat, zeigt Abbildung 5.5 (in Tabelle 5.3 die dazugehörigen Zahlenwerte). Mit der in der Abbildung verwendeten Bezeichnung *mehrere Tage* ist gemeint, dass nur die Relationen mit dem gleichen Ladegefäß transportiert werden können, die an zueinander passenden Tageszeiten und an gleichen Tagen für den Abtransport verfügbar sind.

Die Tests wurden so durchgeführt, dass zunächst unter Ausschluss der Parameterwerte *ein Tag* und *mehrere Tage* bestimmte Parametereinstellungen gewählt wurden, mit denen unterschiedliche Lösungen erzeugt werden konnten. Anschließend wurden für eine bestimmte Parameterkombination[1] die zwei möglichen Einstellungen *ein Tag* und *mehrere Tage* variiert. Die zwei erhaltenen Lösungen wurden miteinander verglichen.

Insgesamt konnte mit der Variante *ein Tag* der Servicegrad um mehr als 2% verbessert werden. Zu erklären ist dies mit den größeren Auswahlmöglichkeiten bei Zuordnung von Relationen zu Ladegefäßen, da hier lediglich die Tageszeiten Berücksichtigung fin-

[1] Eine Parameterkombination könnte z.B. die Diskretisierung der Zeit mit einer Zeitintervallgröße von 1 Minute und die Identifizierung von ungeeigneten Mengen mit einem *alpha*-Wert von 10% am Versanddepot und Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen am Hub sein. Für diese Parameter siehe Abschnitte 5.3.2 und 5.3.3.

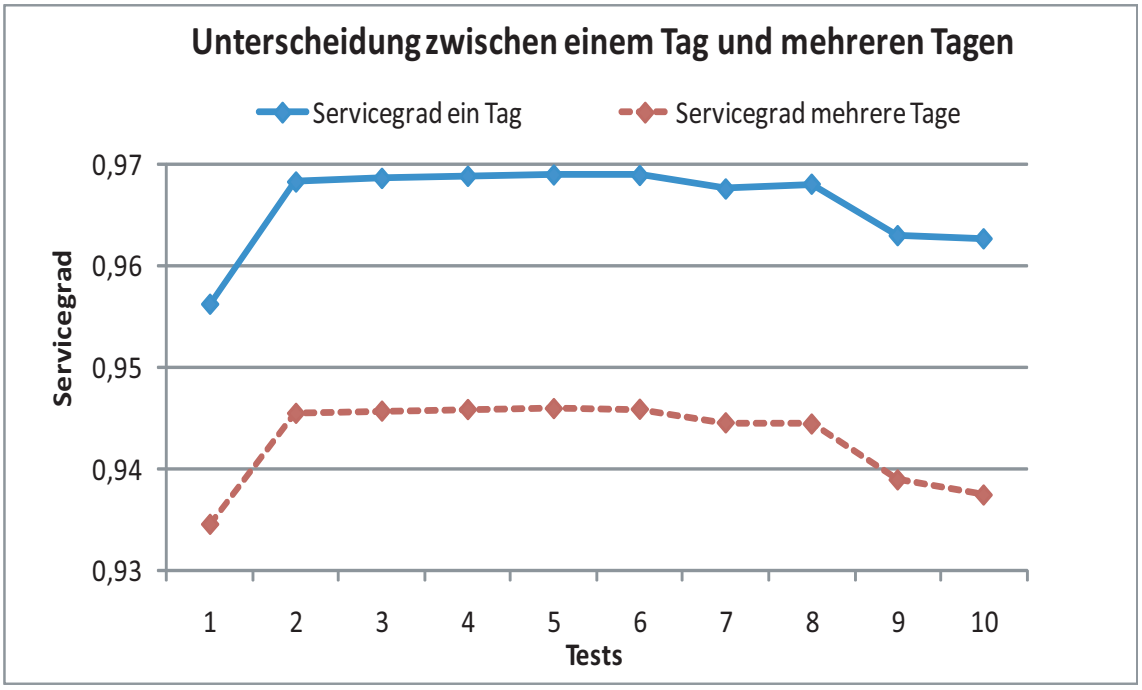

Abbildung 5.5.: Bezüglich des Servicegrades 10 ausgewählte Ergebnisse für die Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen (Beispieldatensatz Frankreich und Verfahren 1, in Tabelle 5.3 die dazugehörigen Zahlenwerte)

Test	ein Tag (Servicegrad)	mehrere Tage (Servicegrad)
1	0,956	0,935
2	0,968	0,946
3	0,969	0,946
4	0,969	0,946
5	0,969	0,946
6	0,969	0,946
7	0,968	0,945
8	0,968	0,944
9	0,963	0,939
10	0,963	0,937

Tabelle 5.3.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.5 (Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen) dargestellten Werte

Vorgabe im Stundentakt	**Diskretisierung der Zeit 20 Minutenintervallgröße**
14 Uhr: 0% verfügbare Menge	14:00 Uhr: 0% verfügbare Menge
15 Uhr: 30%	14:20 Uhr: 10%
16 Uhr: 70%	14:40 Uhr: 20%
17 Uhr: 100%	...

Tabelle 5.4.: Beispiel für die Diskretisierung der Zeit für die Einrollverteilung an einem Versanddepot

den. Bezüglich der Rechenzeit, die im Durchschnitt ca. 12 Sekunden betrug, gab es zwischen den zwei Varianten keine nennenswerte Unterschiede. Im weiteren Verlauf der Darstellung von Testergebnissen werden nur noch die Ergebnisse mit einem Tag gezeigt.

5.3.2. Diskretisierung der Zeit

Mit Diskretisierung der Zeit ist die Gewinnung von diskreten Zeitpunkten aus einem kontinuierlichen Zeitverlauf gemeint, indem Zeiträume aufgeteilt werden. Hierbei sind die durch die Diskretisierung der Zeit neu entstandenen Zeitintervalle gleich groß, wobei diese Abschnitte von der gewählten Zeitintervallgröße abhängen. Angewendet wird die Diskretisierung der Zeit

- bei der Einrollverteilung am Versanddepot und Hub,
- bei der Identifizierung von ungeeigneten Mengen und
- bei der Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren.

In diesem Abschnitt wird die Diskretisierung der Zeit für die Einrollverteilung am Versanddepot und Hub beispielhaft betrachtet. Die Diskretisierung der Zeit für die zwei anderen Punkte werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer erläutert. Die Einrollverteilungen an den Versanddepots liegen zunächst durch Erfahrungswerte aus der Praxis mit beliebiger Verteilung im Stundentakt vor. Anschließend werden die einzelnen Stundenintervalle durch kleinere Zeitintervalle gleichverteilt aufgesplittet. Ein Beispiel dazu zeigt Tabelle 5.4, wo eine Intervallgröße von 20 Minuten gewählt wurde.

Die Einrollverteilung am Hub kann unterschiedliche Ausgangswerte besitzen, da die zugehörigen Zeitwerte für ein Ladegefäß von der Verfügbarkeit eines Eingangstores und von der Umschlagdauer abhängen und somit diese erst mit Durchführung der Planung bestimmt werden. Beim Beispiel in Tabelle 5.5 beginnt die Entladung um 23:30 Uhr und endet bei einer Umschlagdauer von 40 Minuten um 0:10 Uhr. Bei einer gewählten Intervallgröße von 20 Minuten stehen um 23:50 50% der ankommenden Mengen für den

Ermittelte Umschlagzeiten	**Diskretisierung der Zeit 20 Minutenintervallgröße**
23:30 Uhr: Beginn der Entladung Umschlagdauer: 40 Minuten 00:10 Uhr: Ende der Entladung	23:30 Uhr: 0% verfügbare Menge 23:50 Uhr: 50% 00:10 Uhr: 100%

Tabelle 5.5.: Beispiel für die Diskretisierung der Zeit für die Einrollverteilung an einem Hub

Minuten	**Servicegrad**	**Rechenzeit [s]**
1	0,969	13,74
5	0,967	2,78
10	0,963	1,87
20	0,945	1,28
60	0,890	1,17

Tabelle 5.6.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.6 (Diskretisierung der Zeit) dargestellten Werte

Weitertransport zur Verfügung.

Für die Wahl der Minutenintervallgrößen bezüglich der Einrollverteilung wurden für das Versanddepot und Hub für einen Planungsdurchlauf immer die gleichen Werte genommen und nicht zwischen Versanddepot und Hub unterschieden. Die anderen Parametereinstellungen blieben konstant. Abbildung 5.6 (in Tabelle 5.6 die dazugehörigen Zahlenwerte) enthält ausgewählte Ergebnisse für die Intervallgrößen 1 Minute, 5 Minuten bis hin zu 60 Minuten. Je kleiner die gewählte Intervallgröße ist, um so besser ist der Servicegrad, da durch kleinere Zeitbereiche mehr Verfügbarkeitszeitpunkte für die weiter zu transportierenden Mengen ermittelt werden können und somit der Abstand zum spätestmöglichen Abfahrtszeitpunkt der jeweiligen Relationen geringer ist und mehr Mengen pünktlich weiter transportiert werden können. Schließlich sind durch kleinere Zeitbereiche genauere Planungen möglich. Der Nachteil der feineren Diskretisierung des Zeitraums liegt in deutlich höheren Rechenzeiten, da in diesem Fall mehr Informationen verarbeitet werden müssen. Im Beispiel der Abbildung 5.6 können wir mit 5 Minuten im Vergleich zur 1 Minute bei einer geringen Rechenzeit einen sehr guten Servicegrad erzielen. Intervallgrößen wie 20 oder 60 Minuten sind nicht zu empfehlen, da der Servicegrad bei nur geringer Verbesserung der Rechenzeit im Vergleich zu kleineren Intervallgrößen zu schlecht ist. Bei den nachfolgenden Testergebnissen werden nur noch die Ergebnisse mit einer Zeitintervallgröße von 1 Minute gezeigt.

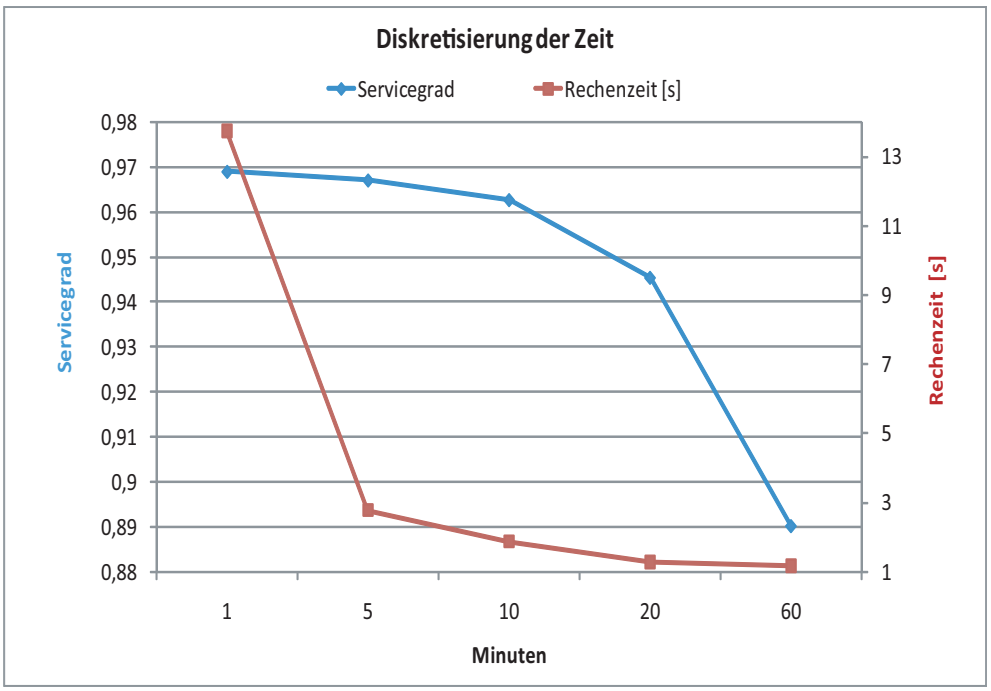

Abbildung 5.6.: Ausgewählte Ergebnisse für die Diskretisierung der Zeit (Beispieldatensatz Frankreich und Verfahren 1, in Tabelle 5.6 die dazugehörigen Zahlenwerte)

5.3.3. Identifizierung von ungeeigneten Mengen

Nach Ermittlung der verfügbaren Mengen im Verfahren 1 können diese unter Berücksichtigung der Zeitfenster und Kapazitäten auf die vorhandenen Ladegefäße geladen werden. Hierbei können nur Mengen zusammen auf ein Ladegefäß geladen werden, deren Zeitfenster zueinander passen. Da es auf den einzelnen Hauptläufen Mengen mit sehr engen Zeitfenstern geben kann, die eine schlechte Auslastung mit pünktlich geladenen Mengen von Ladegefäßen verursachen, müssen diese identifiziert und als verspätet gekennzeichnet werden. Solche Mengen bezeichnen wir als ungeeignet.

Die Verfügbarkeitszeitpunkte sind aufsteigend sortiert, wobei die Zeitangabe in Minuten (0 bis 1440) erfolgt. Wie Abbildung 5.7 als Beispiel zeigt, liegen die Verfügbarkeitszeitpunkte an einem Versanddepot zwischen 14:00 und 23:00 Uhr. Hiermit kann problemlos beginnend vom kleinsten Zeitwert die Beladung der Ladegefäße erfolgen. An einem Hub gestaltet sich diese Vorgehensweise etwas schwierig, da dort die Verfügbarkeitszeitpunkte im Allgemeinen zwischen 18:00 und 02:00 Uhr liegen (siehe dazu Abbildung 5.8). Somit haben die Mengen zwischen 00:01 und 02:00 Uhr die frühesten Verfügbarkeitszeitpunkte, obwohl die Entladung schon um oder vor 24:00 Uhr beginnt.

Um diese Sachverhalte am Versanddepot und Hub zu berücksichtigen, wurden für die Identifizierung von ungeeigneten Mengen unterschiedliche Strategien entwickelt. Zum

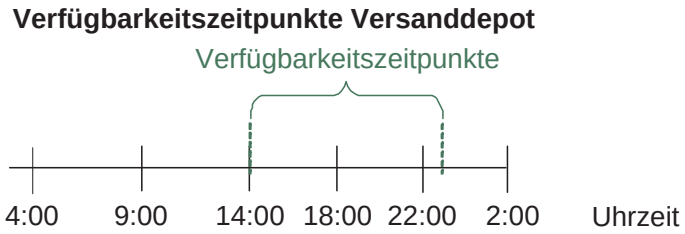

Abbildung 5.7.: Zeitraum für die Verfügbarkeitszeitpunkte an einem Versanddepot

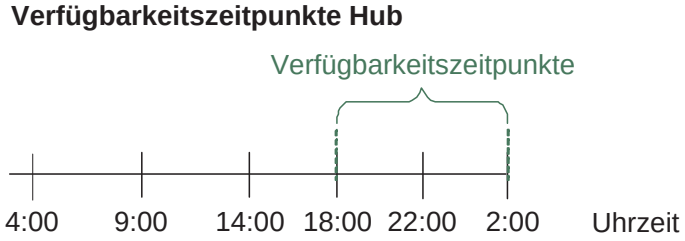

Abbildung 5.8.: Zeitraum für die Verfügbarkeitszeitpunkte an einem Hub

einen wurde ein Parameter *alpha* eingeführt, der angibt, wie groß der prozentuale Anteil verspäteter Mengen im Verhältnis zu einem mit pünktlichen Mengen voll ausgelasteten Ladegefäß höchstens sein darf (z.B. 10%). Ist der Anteil dieser Mengen nicht größer als der vorgegebene Wert, dann werden sie als verspätet markiert und die dazugehörigen Zeitfenster spielen keine Rolle mehr. Die Beladung des Ladegefäßes beginnt hierbei mit dem frühesten Verfügbarkeitszeitpunkt und der *alpha*-Wert hat nur dann eine Bedeutung, wenn es noch größere Mengen mit späteren Verfügbarkeitszeitpunkten gibt. Ein Beispiel dazu zeigt Tabelle 5.7, wo mit $alpha = 10\%$ und einer Ladegefäßkapazität von 11 ME der Grenzwert 1,1 lautet. Somit ist dieser Grenzwert bei 9 Minuten als Abfahrtszeit des Ladegefäßes mit R1 als geladene Menge unterschritten. Da es noch größere Mengen als die von R1 zu laden gibt, wird die Menge von R1 als verspätet markiert. Diese Vorgehensweise ist vor allem für das Versanddepot geeignet.

Zum anderen wird für die Beladung eines Ladegefäßes der Beginn der Beladung so festgelegt, dass die Auslastung eines Ladegefäßes mit den verfügbaren Mengen in Abhängigkeit

Relation	**frühester und spätester Abfahrtszeitpunkt (ZE)**	**Mengen (ME)**	**Lösung**
R1	$[6, 9]$	1	Abfahrt: 11. ZE
R2	$[10, 11]$	2	R1 verspätet
R3	$[11, 15]$	7	geladen: R2, R3
R4	$[12, 16]$	2	

Tabelle 5.7.: Beispiel für die Identifizierung ungeeigneter Mengen mit $alpha = 10\%$ (Kapazität des Ladegefäßes 11 ME)

Relation	**frühester und spätester Abfahrtszeitpunkt (ZE)**	**Mengen (ME)**	**Lösung**
R1	$[6, 9]$	1	Abfahrt: 11. ZE
R2	$[10, 11]$	2	
R3	$[11, 15]$	7	geladen: R2, R3
R4	$[12, 16]$	2	

Tabelle 5.8.: Beispiel für die Identifizierung ungeeigneter Mengen mit Hilfe der Maximierung der Auslastung des Ladegefäßes (Kapazität des Ladegefäßes 11 ME)

einer gewählten Intervallgröße (5 oder 10 Minuten) maximiert wird (Maximierung der Auslastung). Also muss die Beladung des Ladegefäßes nicht mit dem frühesten Verfügbarkeitszeitpunkt starten, sondern kann auch in der Mitte oder am Ende eines Zeitraumes liegen. Ein Beispiel dazu zeigt Tabelle 5.8, wo bei 6 Minuten mit einer Intervallgröße von 5 Minuten die Suche beginnt. Mit 11 Minuten konnte die höchste Auslastung des Ladegefäßes erzielt werden. Die Relationen R1 und R4 sind für das nächste Ladegefäß bestimmt. Hier zeigt sich auch der Nachteil für diese Vorgehensweise, die eine zeitliche Lücke zwischen R1 und R4 erzeugt. Die hier verwendete Intervallgröße ist gleich der, die bei der Diskretisierung der Zeit gewählt wurde (siehe Abschnitt 5.3.2). Daher werden für diesen Parameter keine weiteren Tests dargestellt. Bestimmt ist diese Vorgehensweise vor allem für das Hub.

Welchen Einfluss nun die einzelne Strategie auf den Servicegrad und die Rechenzeit hat, zeigen die Abbildungen 5.9 und 5.10 (die dazugehörigen Zahlenwerte in der Tabelle A.1). Dargestellt sind folgende Lösungskombinationen:

- *alpha*-Wert am Versanddepot und Hub,
- *alpha*-Wert am Versanddepot und Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen am Hub und
- Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen am Versanddepot und Hub.

Die Kombinationsmöglichkeit „Maximierung der Auslastung am Versanddepot und *alpha*-Wert am Hub“ wird hier aufgrund schlechter Ergebnisse nicht berücksichtigt. Da für *alpha*-Werte die Prozentzahlen 0% bis 100% getestet werden, gibt es für Tests mit *alpha*-Werten unterschiedliche Ergebnisse. Bei der Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen wird nur eine Lösung dargestellt, da hier der *alpha*-Wert nicht vorkommt. Die besten Servicegrade werden durch die Kombination *alpha*-Wert am Versanddepot und Maximierung der Auslastung am Hub erreicht, wobei hier *alpha* mindestens 7% betragen sollte. Zu erklären ist dies mit dem Vorteil der *alpha*-Strategie am Versanddepot und der Strategie der Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen am Hub (Begründung siehe oben). Jedoch liegt der Nachteil dieser Vorgehensweise in der Notwendigkeit, einen geeigneten *alpha*-Wert zu finden. Mit der Strategie Maximierung der Auslastung

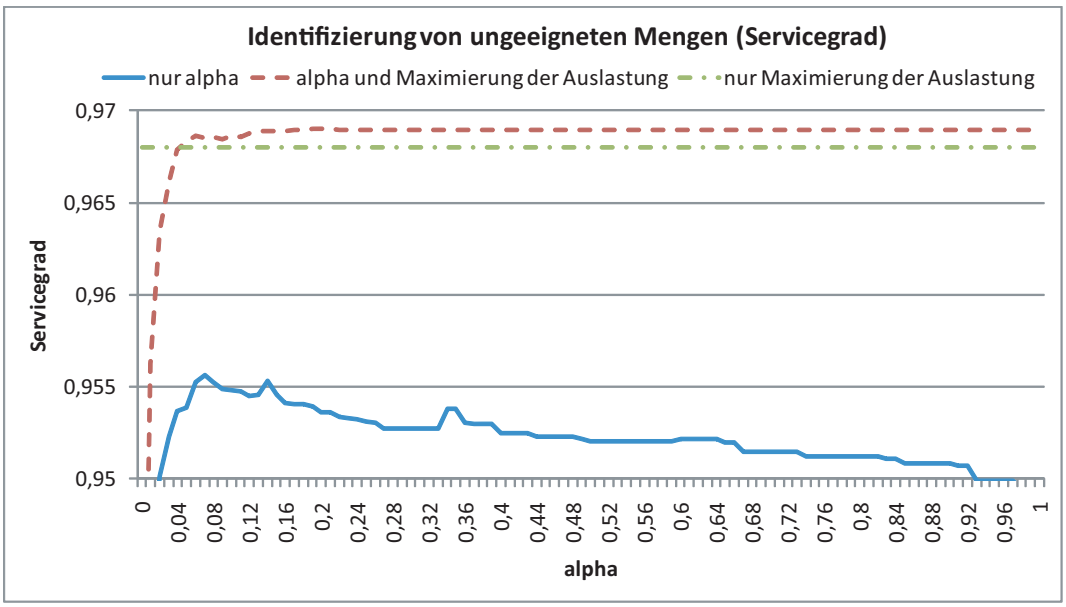

Abbildung 5.9.: Bezüglich des Servicegrades ausgewählte Ergebnisse für die Identifizierung ungeeigneter Mengen (Beispieldatensatz Frankreich und Verfahren 1, Zahlenwerte in der Tabelle A.1)

von Ladegefäßen am Versanddepot und Hub können auch sehr gute Servicegrade erzielt werden. Als nicht geeignet erweist sich die Strategie *alpha*-Wert am Versanddepot und Hub.

Die benötigte Rechenzeit (Abbildung 5.10) ist für die Strategie „Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen am Versanddepot und Hub“ am höchsten, da die Suche eines geeigneten Zeitpunktes für den Start der Beladung und somit die Berechnung unterschiedlicher Auslastungswerte von Ladegefäßen viel Zeit in Anspruch nimmt. Jedoch müssen hier keine *alpha*-Werte ermittelt werden. Bei der Strategie „*alpha*-Wert am Versanddepot und Maximierung der Auslastung von Ladegefäßen am Hub“ ist bei Annahme einer durchschnittlichen Rechenzeit von 13,5 Sekunden und bei Bewertung aller *alpha*-Werte für den Datensatz Frankreich mit einer Rechenzeit von ca. 22,5 Minuten zu rechnen.

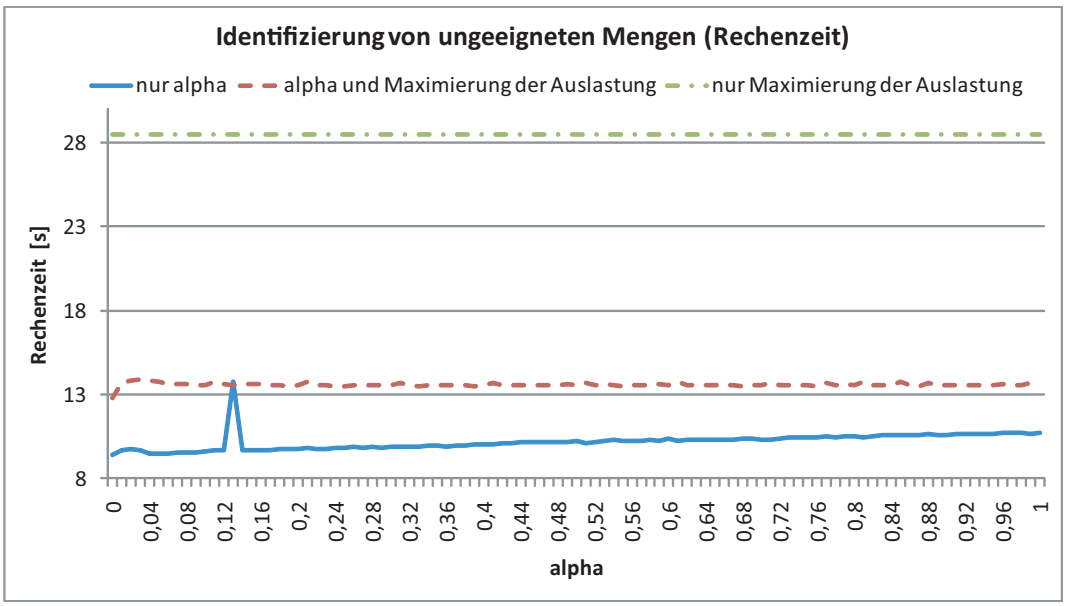

Abbildung 5.10.: Bezüglich der Rechenzeit ausgewählte Ergebnisse für die Identifizierung von ungeeigneten Mengen (Beispieldatensatz Frankreich und Verfahren 1, Zahlenwerte in der Tabelle A.1)

5.4. Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren

Da der Untersuchungsbereich „Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren“ sehr umfassend ist, werden die Ergebnisse getrennt von Abschnitt 5.3 in einem eigenen Abschnitt beschrieben.

Für die Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren wurden zwei Herangehensweisen untersucht, die von den Verfahren 1 und 2 abhängen. Im Folgenden werden diese näher beschrieben und deren Lösungsqualität beurteilt.

Wie schon oben erwähnt, wird bei Ermittlung des Verfügbarkeitszeitpunktes eines Eingangstores für ein Ladegefäß im Verfahren 1 als Ziel die zeitliche Auslastung der Eingangstore maximiert. Dazu wird eine Heuristik eingesetzt, die bekanntermaßen keine Optimalität garantiert. Zunächst wird bezüglich der Ankunftszeit die nächstgelegene Öffnungszeit bestimmt, da an einem Standort aufgrund mehrerer Stufen (Versanddepot, Hub, Empfangsdepot) verschiedene Öffnungszeiten existieren können. Anschließend wird in Abhängigkeit der Umschlagkapazität der gewählten Stufe die Belegungszeit (Umschlagdauer + Andockzeit) eines Eingangstores bestimmt. Mit der Belegungszeit wird der Verfügbarkeitszeitpunkt eines Eingangstores so berechnet, dass in Abhängigkeit einer gewählten Zeitintervallgröße der Abstand zwischen dem Beginn der Öffnungszeit bzw. dem Ende der Entladung eines Ladegefäßes und dem Start der Entladung des betrachteten Ladegefäßes minimiert wird. Hierbei werden die schon zu Eingangstoren zu-

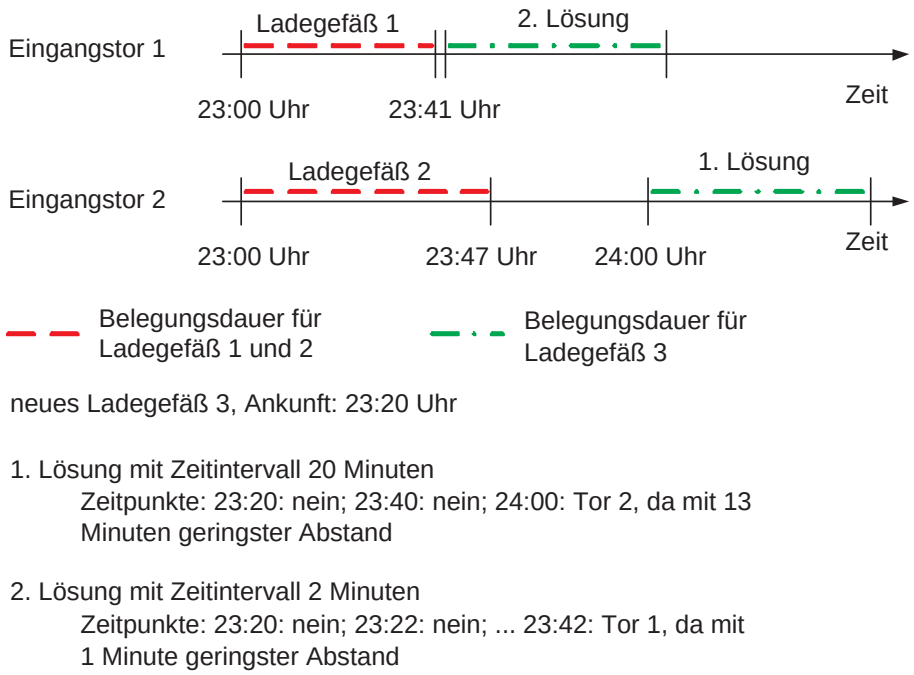

Abbildung 5.11.: Beispiel für die Zuordnung des Ladegefäßes 3 zu einem Eingangstor nach Verfahren 1

geordneten Ladegefäße in ihren Entladungszeiten nicht geändert.

Die Abbildung 5.11 zeigt hierfür ein Beispiel. Es sind zwei Eingangstore mit jeweils einem zugeordneten Ladegefäß gegeben. Um 23:20 Uhr steht das Ladegefäß 3 zur Verfügung, welches nicht sofort entladen werden kann, da beide Eingangstore bis 23:41 Uhr bzw. 23:47 Uhr belegt sind. Bei einer Zeitintervallgröße von 20 Minuten erhalten wir für die Suche des Verfügbarkeitszeitpunktes eines Eingangstores von 23:20 Uhr beginnend den Zeitpunkt 24:00 Uhr am Tor 2 als die Lösung 1, da hier mit 13 Minuten der Abstand zwischen Ende und Beginn einer Entladung am niedrigsten ist. Bei einer Intervallgröße von 2 Minuten beginnt für das Ladegefäß 3 die Entladung um 23:42 am Eingangstor 1 (Lösung 2). Die hier verwendete Zeitintervallgröße ist gleich der, die bei der Diskretisierung der Zeit gewählt wurde (siehe Abschnitt 5.3.2). Daher werden für diesen Parameter keine weiteren Tests dargestellt.

Diese Vorgehensweise im Verfahren 1 hat zwei wesentliche Schwächen: Es werden nicht die geladenen Relationen eines Ladegefäßes berücksichtigt, welches zu einem Eingangstor zugeordnet werden soll. Weiterhin können die schon erfolgten Zuordnungen von Ladegefäßen zu Eingangstoren bei einer neuen Zuordnung eines Ladegefäßes nicht mehr geändert werden. Beide Schwächen können sich negativ auf den für die Linienverkehrsplanung relevanten Servicegrad auswirken. Damit dies vermieden wird, wurde das Verfahren 2 als Alternative entwickelt.

Im Verfahren 2 erfolgt die Zuordnung eines Ladegefäßes zu einem Eingangstor erst nach

Lösung	**ET1**	**ET2**
1	LG1, LG2	LG3
2	LG1, LG3	LG2
3	LG2, LG1	LG3
4	LG3	LG1, LG2
...		

Tabelle 5.9.: Beispiellösungen für Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren an einem Standort

der Abarbeitung aller Hauptläufe auf der gewählten Stufe. Daraus ergibt sich ein Zuordnungsproblem, in dem eine bestimmte Anzahl von Ladegefäßen zu einer vorhandenen Anzahl von Eingangstoren zugeordnet werden. Mit Zuordnung eines Ladegefäßes zu einem Eingangstor ist der Zeitpunkt des Beginns der Entladung und somit der Verfügbarkeitszeitpunkt für den Weitertransport der geladenen Mengen bekannt (siehe dazu Abschnitt 4.2.4). Somit hat der Beginn der Entladung eines Ladegefäßes Einfluss auf das Gesamtergebnis der Linienverkehrsplanung. Als Beispiel für dieses Problem sind drei Ladegefäße (LG1, LG2, LG3) und zwei Eingangstore (ET1, ET2) gegeben. Vier mögliche Lösungen des Zuordnungsproblems zeigt Tabelle 5.9. Wegen der bezüglich der Umschlagkapazitäten identischen Eingangstore sind die Lösungen symmetrisch, d.h., die Lösungen eins und vier aus Tabelle 5.9 sind äquivalent.

Eine ähnliche Problemstellung existiert bei der Maschinenbelegung, wo eine Menge von Aufträgen I existieren, die von einer bestimmten Menge verschiedener parallelen Maschinen M bearbeitet werden müssen. Die Ausführung eines Auftrags $i \in I$ kann frühestens mit der Startzeit r_i beginnen und muss spätestens zum Fälligkeitszeitpunkt d_i abgeschlossen sein. Ein Auftrag i kann an einer beliebigen Maschine ausgeführt werden, wobei die Bearbeitungskosten bzw. Bearbeitungszeit vom Auftrag $i \in I$ auf der Maschine $m \in M$ C_{im} bzw. p_{im} betragen. Das Ziel ist, bei Bearbeitung aller Aufträge die gesamten Bearbeitungskosten zu minimieren (vergleiche dazu Jain & Grossman (2001, S. 266)).

Im Unterschied zum Problem der Maschinenbelegung sind bei der Problemstellung „Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren“ die Belegungszeiten eines Eingangstores durch ein Ladegefäß und die dazugehörigen Zuordnungskosten für alle Tore gleich. Da bei der Problemstellung die verspäteten Mengen für den Weitertransport minimiert werden sollen und die Ladegefäße Relationen mit unterschiedlichen Zeitfenstern geladen haben, ist als weiterer Unterschied die Zielfunktion stückweise linear. Dies ist eine Funktion, deren Definitionsbereich in Intervalle unterteilt ist, in denen entsprechend lineare Funktionen gelten.

Ein Beispiel für die stückweise lineare Kosten für ein Ladegefäß $i \in I$ an einen Hub zeigt Tabelle 5.10, wobei u_i für die Umschlagdauer steht. Neben den schon eingeführten Zeiten sind in dieser Tabelle auch die Relationen mit den frühesten und spätesten Ab-

Zeiten	**Relationen Zeitfenster, Mengen**	**Start der Entladung: Kosten**
$r_i = 10$	R1: [15, 16], 3	10: 0
$d_i = 20$	R2: [15, 17], 4	12: 36
$u_i = 5$	R3: [15, 19], 6	14: 98
	R4: [15, 20], 2	15: 195

Tabelle 5.10.: Beispiel für die stückweise lineare Kostenfunktion eines Ladegefäßes $i \in I$ an einem Hub

fahrtszeitpunkten und die zu transportierenden Mengen angegeben. Daraus ergibt sich die in der dritten Spalte angegebene stückweise lineare Funktion für das Ladegefäß $i \in I$, die sich zusammensetzt aus den Zeitpunkten als deren Stützstellen (Definitionsbereich) und den zugehörigen Kosten (Wertebereich).

Für die in diesem Abschnitt durchzuführenden Tests wird als Anzahl Stützstellen die Anzahl unterschiedlicher spätestmöglicher Abfahrtszeitpunkte der auf den Ladegefäßen $i \in I$ geladenen Relationen gewählt (jedoch mindestens zwei Stützstellen); diese werden zwischen dem frühesten Verfügbarkeitszeitpunkt und dem spätestmöglichen Ende der Entladung des jeweiligen Ladegefäßes gleichverteilt. Die Kosten entstehen aus dem Zeitpunkt für den Beginn der Beladung und den verspäteten Mengen, die aus dem Verfügbarkeitszeitpunkt für die Abfahrt und den Zeitfenstern der Relationen resultieren. So erhalten wir (siehe Tabelle 5.10) bei einem Startzeitpunkt der Entladung von 12 und der verspäteten Mengen von 3 aus Relation R1 die Kosten 36.

Handelt es sich um eine stückweise lineare Funktion am Empfangsdepot, dann müssen keine Zeitfenster von Relationen berücksichtigt werden und es gibt in der Funktion nur zwei Stützstellen: frühest- und spätestmöglicher Beginn (Ankunftszeit und Ende der Öffnungszeit minus Umschlagdauer) der Entladung des jeweiligen Ladegefäßes mit Kosten von 0. Somit sind hier lediglich die Zuordnungen von Ladegefäßen zu Eingangstoren möglich, bei der Beginn der Entladung eines Ladegefäßes in den Öffnungszeiten des Empfangsdepots liegt. Die Tabelle 5.11 verdeutlicht dies anhand eines Beispiels, in dem sowohl eine ungültige als auch eine gültige Lösung dargestellt wird. Die erste Lösung ist aufgrund der Verletzung des Endes der mit 00:20 Uhr angegebenen Öffnungszeit nicht gültig (LG5 mit Entladungszeitpunkt von 00:21 Uhr). Das Ende der Entladung am Empfangsdepot muss nicht in den Öffnungszeiten liegen (vergleiche dazu Abschnitt 4.2.4). Die in der vierten Spalte in Klammern angegebenen Zeiten sind die Startzeitpunkte für die Entladung.

Bei Berechnung der Kosten für die stückweise lineare Funktion wird auch die Einrollverteilung (Diskretisierung der Umschlagdauer) für die Mengen berücksichtigt. Dadurch werden nicht alle Mengen eines Ladegefäßes als verspätet bewertet, wenn der Startzeitpunkt der Entladung in den Öffnungszeiten und das Ende außerhalb der Öffnungszeiten einer Stufe des betreffenden Standortes liegt.

Ladegefäße	**frühest, spätest möglicher Beginn**	u_i	**Lösungen mit zwei Eingangstoren**
LG1	[12, 15]	5	ungültige Lösung
LG2	[12, 16]	4	ET1: LG1 (12), LG2 (17)
LG3	[14, 16]	4	ET2: LG3 (14), LG4 (18), LG5 (21)
LG4	[15, 17]	2	gültige Lösung
LG5	[17, 20]	2	ET1: LG1 (12), LG4 (17), LG5 (20) ET2: LG2 (12), LG3 (16)

Tabelle 5.11.: Beispiel für die Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren an einem Empfangsdepot, das zum Zeitpunkt 00:20 Uhr (20 Minuten) schließt

Im Folgenden sind für die Problemstellung „Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren“ die wesentlichen Merkmale zusammengefasst:

- Ein Zuordnungsproblem liegt vor, wenn die Anzahl Ladegefäße größer als die Anzahl Eingangstore an einer Stufe des betreffenden Standortes ist.
- Eingangstore sind bezüglich der Umschlagkapazität identisch (parallele Eingangstore).
- Aus dem Verfügbarkeitszeitpunkt eines Eingangstores folgt der Start der Entladung.
- Der Start der Entladung ist für den Weitertransport der Mengen entscheidend.
- Die Umschlagdauer wird in Abhängigkeit der geladenen Mengen berechnet.
- Die Umschlagdauer liegt durch Diskretisierung der Zeit als Einrollverteilung vor.
- Aufgrund unterschiedlicher Zeitfenster der geladenen Relationen ist eine stückweise lineare Zielfunktion erforderlich.
- Das Ziel ist die Minimierung verspäteter Mengen für den Weitertransport.

5.4.1. Mathematisches Modell

In Anlehnung an Jain & Grossman (2001) wird im Folgenden ein mathematisches Modell für die alternative Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren entwickelt. Gegeben sind die Menge der Ladegefäße I und die Menge der parallelen Eingangstore E. Die Entladung eines Ladegefäßes $i \in I$ kann frühestens mit der Startzeit r_i beginnen und muss spätestens zum Fälligkeitszeitpunkt d_i abgeschlossen sein. Hierbei ist die Umschlagdauer u_i nicht vom zugewiesenen Eingangstor abhängig. Für die stückweise lineare Zielfunktion ist mit S die Menge der Stützstellen vorgegeben. Eine ausreichend große Zahl $MaxZ$ wird zur Sicherstellung eines zeitlich ausreichend großen Abstandes zwischen zwei Ladegefäßen benötigt, die am gleichen Eingangstor entladen werden. Die zu den Stützstellen gehörigen Zeitpunkte werden in der Konstante $ZeitS_{i,s}$ mitgeführt. Wenn die stückweise linearen Kostenfunktionen für alle Ladegefäße in einer Matrix zusammengefasst werden, erhalten wir die Kostenmatrix $C_{i,s}, \forall i \in I, s \in S$. Für jedes $i, k \in I$ und $j \in E$ benötigen wir für das Modell unterschiedliche Entscheidungsvariablen:

- $Start_i$ als den Startzeitpunkt der Entladung für das Ladegefäß i,
- $ZO_{i,j} \in \{0, 1\}$ als die Zuordnungsmatrix mit dem Wert 1, wenn Ladegefäß i dem j-ten Eingangstor zugeordnet ist und sonst 0,
- $Sequenz_{i,k} \in \{0, 1\}$ als die Darstellung der Nachfolgebeziehungen zwischen den einzelnen Ladegefäßen mit dem Wert 1, wenn das Ladegefäß k direkt oder indirekt nach dem Ladegefäß i entladen wird und sonst 0,
- $GKosten$ als die Darstellung der Gesamtkosten für eine Lösung, in der die Entladungsreihenfolge der Ladegefäße festgelegt ist.

Zur einfacheren Darstellung wird für die Berechnung der Gesamtkosten die Notation $f(i, s)$ eingeführt, die für jedes $i \in I$ und $s \in S$ folgende Definition besitzt:

$$f(i,s) = \begin{cases} Start_i * C_{i,s} & s = 0, Start_i \leq ZeitS_{i,s} \\ (Start_i - ZeitS_{i,s-1}) * C_{i,s} & s > 0, ZeitS_{i,s-1} < \\ & Start_i \leq ZeitS_{i,s} \\ ZeitS_{i,s} * C_{i,s} & Start_i > ZeitS_{i,s} \\ 0 & sonst \end{cases} \tag{5.1}$$

Darauf aufbauend kann folgendes Modell formuliert werden:

$$\min GKosten \tag{5.2}$$

$$r_i \leq Start_i \qquad (i \in I) \tag{5.3}$$

$$Start_i \leq d_i - u_i \qquad (i \in I) \tag{5.4}$$

$$\sum_{j \in E} ZO_{i,j} = 1 \qquad (i \in I) \tag{5.5}$$

$$Sequenz_{i,k} + Sequenz_{k,i} \geq ZO_{i,j} + ZO_{k,j} - 1 \qquad (i,k \in I, k > i, j \in E) \tag{5.6}$$

$$Start_k \geq Start_i + \sum_{j \in E}(ZO_{i,j} * u_i) - MaxZ * (1 - Sequenz_{i,k}) \qquad (i,k \in I, k \neq i) \tag{5.7}$$

$$GKosten \geq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} f(i,s) \tag{5.8}$$

Die Zielfunktion 5.2 reduziert die für die Entladung aller Ladegefäße anfallende Kosten. Mit den Restriktionen (5.3) und (5.4) erfolgt die Entladung der Mengen vom Ladegefäß i frühestens zum Zeitpunkt r_i und die Mengen stehen spätestens zur Fälligkeit d_i zur Verfügung. Die Restriktion (5.5) garantiert die Zuordnung eines Ladegefäßes genau zu einem Eingangstor. Durch die Restriktion (5.6) werden *Sequenz* und *ZO* miteinander logisch verknüpft und durch (5.7) werden die zeitlichen Abstände zur Entladung zwischen zwei Ladegefäßen, die am gleichen Eingangstor entladen werden, eingehalten. Schließlich werden bei Anwendung von den Restriktionen (5.1) und (5.8) die Gesamtkosten für die Entladung der Ladegefäße bestimmt.

5.4.2. Symmetrie-brechende Restriktionen im mathematischen Modell für ILOG CPLEX

Die Problemstellung „Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren“ im Verfahren 2 soll mit dem bereits formulierten mathematischen Modell 5.2-5.8 und ILOG CPLEX gelöst werden. Für dieses MIP verwendet ILOG CPLEX einen Branch-and-Bound Algorithmus.

Wie schon erwähnt, sind die Eingangstore identisch und somit existieren wie in der Tabelle 5.9 alternative optimale Lösungen. Bei einer gegebenen Lösung, in der mit Zuordnung zu Eingangstoren die Entladungszeitpunkte der Ladegefäße festgelegt sind, kann durch Umnummerierung der Eingangstore eine andere Lösung mit dem gleichen Zielfunktionswert erzeugt werden. Es ist bekannt, dass diese Symmetrie durch unnötige Verdoppelungen den Branch-and-Bound Algorithmus verlangsamt (Jans, 2006, S. 2). Um diesen Problem entgegenzuwirken, können symmetrie-brechende Restriktionen dem formulierten MIP-Modell hinzugefügt werden.

In der Literatur gibt es einige Arbeiten, die sich mit dem Thema der Symmetrie in MIP-Modellen beschäftigen. Sherali & Smith (2001) untersuchen eine Reihe von symmetriebrechenden Restriktionen anhand von drei unterschiedlichen Problemstellungen. Degraeve et al. (2002) erforschen die Symmetrie für ein Lagerbestandsproblem aus der Modebranche. Aufbauend auf diesen Arbeiten untersucht Jans (2006) verschiedene symmetriebrechende Restriktionen für ein Losgrößenplanungsproblem. Die von ihm getesteten und im folgenden aufgelisteten Restriktionen (bezeichnet als lexikographisch ordnende Restriktionen) wollen wir auch für das hier zu bearbeitende alternative Problem Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren untersuchen:

$$ZO_{1,1} = 1 \tag{5.9}$$

$$\sum_{ii \in I, ii \leq i} 2^{i-ii} ZO_{i,j-1} \geq \sum_{ii \in I, ii \leq i} 2^{i-ii} ZO_{i,j} \qquad (i \in I, j \in E, j > 1) \tag{5.10}$$

$$\sum_{i \in I} 2^{|I|-i} ZO_{i,j-1} \geq \sum_{i \in I} 2^{|I|-i} ZO_{i,j} \qquad (j \in E, j > 1) \tag{5.11}$$

$$ZO_{1,j-1} \geq ZO_{1,j} \qquad (j \in E, j > 1) \tag{5.12}$$

$$\sum_{i \in I} i ZO_{i,j-1} \geq \sum_{i \in I} i ZO_{i,j} \qquad (j \in E, j > 1) \tag{5.13}$$

$$\sum_{i \in I} i^2 ZO_{i,j-1} \geq \sum_{i \in I} i^2 ZO_{i,j} \qquad (j \in E, j > 1) \tag{5.14}$$

Bei der symmetrie-brechenden Restriktion (5.9) (F1) wird das erste Ladegefäß dem Eingangstor eins zugeordnet. Dadurch entfallen alle alternativen Lösungen, bei denen das Ladegefäß 1 anderen Eingangstoren zugeordnet ist. Weitere Möglichkeiten für eine teilweise lexikographische Ordnung zwischen der Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren zeigen die Restriktionen (5.10) (F2), (5.11) (F3), (5.13) (F5) und (5.14) (F6), die sich durch verschiedene Koeffizienten unterscheiden. Mit (5.12) (F4) wird eine lexikographische Ordnung analog zur ersten Restriktion für das Ladegefäß 1 ohne Koeffizienten erzielt.

Für die Tests mit symmetrie-brechenden Restriktionen werden durch Hinzufügung der einzelnen Restriktionen zum obigen Grundmodell 5.2 - 5.8 (bezeichnet mit F0) die Auswirkungen auf die Rechenzeit mit ILOG CPLEX untersucht, wobei für ILOG CPLEX zunächst die Standardeinstellungen gelten. Weiterhin wurden für diese Tests repräsentativ 20 Datensätze ausgewählt, die für CPLEX lösbar sind. Für die Lösung der Probleminstanzen wurde ein Zeitlimit von 3600 Sekunden (eine Stunde) vorgegeben. Als Vergleichswerte wurden der Durchschnitt aus den Rechenzeiten für die 20 Datensätze und die Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen genommen. Konnte nach einer Stunde für einen Datensatz keine optimale Lösung ermittelt werden, dann wurde dies zum einen mit 3600 Sekunden im Vergleichswert durchschnittliche Rechenzeit und zum anderen bei der Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen berücksichtigt.

In Abbildung 5.12 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.12) sind die erzielten Ergebnisse zusam-

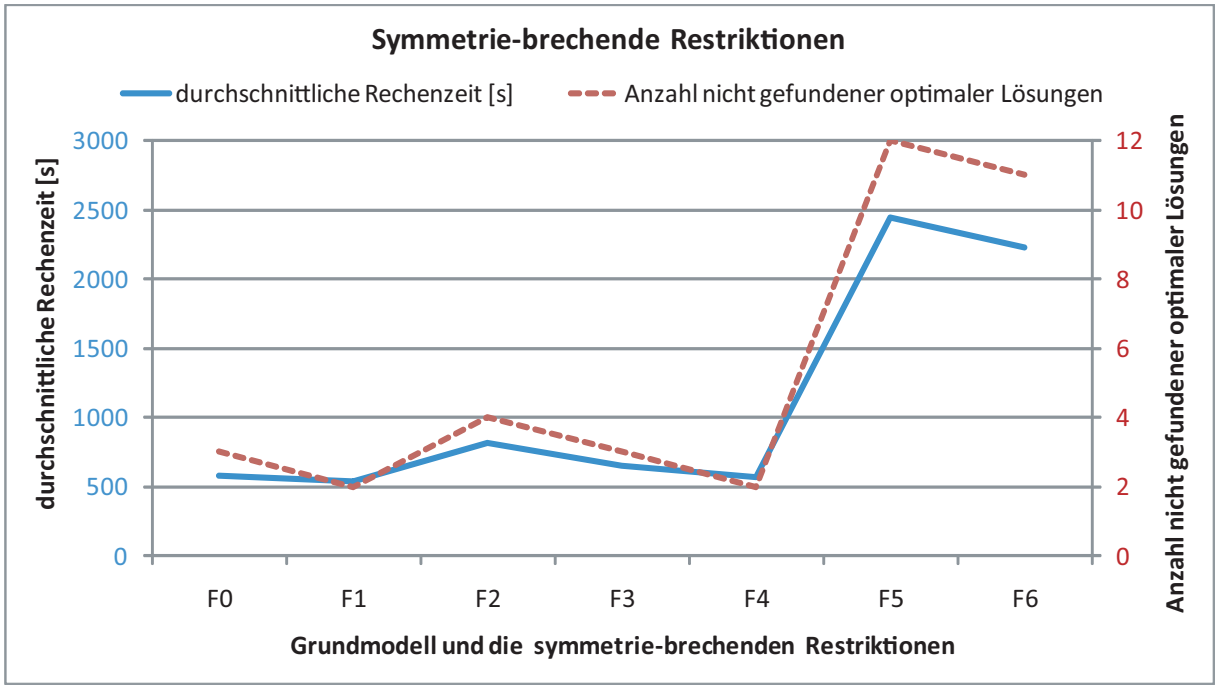

Abbildung 5.12.: Ergebnisse der Tests mit den symmetrie-brechenden Restriktionen im mathematischen Grundmodell 5.2 - 5.8 für ILOG CPLEX (Zahlenwerte in der Tabelle 5.12)

Grundmodell und symmetrie-brechende Restriktionen	durchschnittliche Rechenzeit [s]	Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen
F0	578,22	3
F1	535,88	2
F2	812,83	4
F3	646,45	3
F4	568,32	2
F5	2450,29	12
F6	2231,64	11

Tabelle 5.12.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.12 (symmetrie-brechende Restriktionen) dargestellten Werte

mengefasst. Bezüglich der durchschnittlichen Rechenzeit und der Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen wurden mit Hinzufügung der Restriktion F1 zum Grundmodell die besten Ergebnisse erzielt. Weiterhin ist erkennbar, dass keines der getesteten Modellvarianten alle Probleminstanzen in der vorgegebenen Zeit optimal lösen konnte. Im nächsten Abschnitt zeigen jedoch die Parametertests, dass dies mit einer bestimmten Parameterkombination möglich ist. Hinsichtlich der Rechenzeiten mit durchschnittlich ca. 500 Sekunden pro Testinstanz liegt ein hohes Verbesserungspotential vor. Für weitere Untersuchungen zur Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren wird die Restriktion F1 zum Grundmodell hinzugefügt.

5.4.3. Parametertests für ILOG CPLEX

Da bei der Linienverkehrsplanung eine Vielzahl der Zuordnungsprobleme „Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren“ in realistischen Laufzeiten für den Gesamtalgorithmus zu lösen sind (beim Europa-Datensatz in Abhängigkeit der Parameterwahl ca. 400), muss das Verfahren beschleunigt werden. Hierfür stellt CPLEX bei der Parametereinstellung unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung (ILOG, 2006). Aus der Fülle von Parametereinstellungen wurden acht ausgewählt. Für die nicht getesteten Parameter wurden die Standardeinstellungen übernommen. Wegen der von ILOG nur knappen Erklärung der CPLEX-Parameter wird auf Grund der Vermeidung von Fehldarstellungen auf eine ausführliche Beschreibung der Parameter verzichtet. Weiterhin werden die originalen Parameterbezeichnungen aus dem Englischen übernommen.

Die Parametervariationen sind in den Tabellen 5.13, 5.14 und 5.15 zusammengefasst. In der Tabelle 5.13 sind die Parameter aufgelistet, die den Verlauf des Weges beeinflussen, den der Algorithmus im Branch-and-Bound-Baum geht. Die Knotenauswahlstrategie wird zur Festlegung des nächsten auszuwählenden Knoten verwendet, um die Abarbeitung eines Knotens zu beginnen (Backtracking). Die zu verzweigende Variable für das Branching wird in der Variablenauswahlstrategie festgelegt. Der letzte den Weg des Algorithmus betreffende Parameter ist die Branching-Richtung.

Tabelle 5.14 fasst die Algorithmen zusammen, die zur Lösung der Start-Relaxation und der Teilprobleme nach der Start-Relaxation in einem MIP eingesetzt werden. Hinsichtlich Informationen über die einzelnen Algorithmen hält sich ILOG bedeckt.

Weiterhin stehen die in der Tabelle 5.15 aufgelisteten Parameter für empirische Tests zur Verfügung. Bei der MIP Dive Strategie kann CPLEX als Probing Dives bezeichnete Schritte durchführen. Hierbei werden zwei Nachfolgeknoten analysiert. Das Ergebnis solcher Schritte ist für die Auswahl des nächsten zu betrachtenden Knoten von Bedeutung. Sie sind vor allem beim Auffinden von ganzzahligen Lösungen hilfreich. Der MIP Emphasis Indikator ist einer der wichtigsten Beschleunigungsparameter für schwierige MIP. Der Benutzer kann hierbei CPLEX die Ziele seiner Optimierung mitteilen: Entweder legt der Nutzer einen größeren Wert auf eine schnelle zulässige Lösung oder er

Parameter	**Parametereinstellungen**
Knotenauswahlstrategie	Depth-first search
	Best-bound search
	Best-estimate search
	Alternative best-estimate search
Variablenauswahlstrategie	Branch on variable with minimum infeasibility
	Automatic: let CPLEX choose variable to branch on
	Branch on variable with maximum infeasibility
	Branch based on pseudo costs
	Strong branching
	Branch based on pseudo reduced costs
Branching-Richtung	Down branch selected first
	Automatic: let CPLEX choose
	Up branch selected first

Tabelle 5.13.: Parametereinstellungen für Bestimmung des Weges des Algorithmus im Baum (**Standard**) (ILOG, 2006, S. 46f)

Parameter	**Parametereinstellungen**
MIP-Start-Algorithmus	**Automatic**: let CPLEX choose
	Primal Simplex
	Dual Simplex
	Network Simplex
	Barrier
	Sifting
	Concurrent (Dual, Barrier, and Primal)
MIP Teilproblem Algorithmus	**Automatic**: let CPLEX choose
	Primal Simplex
	Dual Simplex
	Network Simplex
	Barrier
	Sifting

Tabelle 5.14.: Parametereinstellungen für Lösung der Start-Relaxation und der Teilprobleme nach der Start-Relaxation in einem MIP (**Standard**) (ILOG, 2006, S. 44f)

Parameter	Parametereinstellungen
MIP Dive Strategie	**Automatic**: let CPLEX choose
	Traditional dive
	Probing dive
	Guided dive
MIP Emphasis Indikator	**Balance optimality and feasibility**
	Emphasize feasibility over optimality
	Emphasize optimality over feasibility
	Emphasize moving best bound
	Emphasize finding hidden feasible solutions
Symmetrie brechend	**Automatic**: let CPLEX choose
	Turn off symmetry breaking
	Exert a moderate level of symmetry breaking
	Exert an aggressive level of symmetry breaking
	Exert a very aggressive level of symmetry breaking

Tabelle 5.15.: Weitere Parametereinstellungen für empirische Tests (**Standard**) (ILOG, 2006, S. 22, 31, 46)

möchte einen großen Stellenwert auf die Optimalität der Lösung legen oder er will einen Ausgleich zwischen den zwei erstgenannten Zielstellungen erreichen. Als letztes wird der symmetrie-brechende Parameter getestet, wo in einem Preprocessing-Schritt symmetrische Lösungen in einem MIP-Modell eventuell gestrichen werden.

5.4.4. Ergebnisse mit ILOG CPLEX

Wie schon erwähnt, ist das Ziel dieser Parametertests eine Konfiguration von CPLEX zu finden, die in kurzer Zeit gute Ergebnisse liefert. Hierbei wird untersucht, wie sich die Rechenzeiten bei den verschiedenen Parametern unterscheiden. Performance-Kennzahlen wie Anzahl der Simplexiterationen oder Anzahl gelöster Knoten des Branch-and-Bound-Baumes spielen hier keine weitere Rolle.

Die Untersuchungen wurden analog zu den Tests mit den symmetrie-brechenden Restriktionen durchgeführt. Hierbei kamen die gleichen 20 Datensätze zur Anwendung und als Vergleichswerte wurden wiederum der Durchschnitt aus den Rechenzeiten für die 20 Datensätze und die Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen genommen. Gegenüber der Standardeinstellung von CPLEX wurde zunächst immer nur ein Parameter geändert (erster Schritt). Im zweiten Schritt wurden die Parametereinstellungen miteinander kombiniert, die im ersten Durchgang die besten durchschnittlichen Rechenzeiten lieferten. Dazu wurde die Parametereinstellung mit der besten durchschnittlichen Rechenzeit und der geringsten Anzahl von nicht optimal gefundenen Lösungen aus dem ersten Schritt als Benchmark genommen.

Parameter	Parameter-einstellungen	durchschnitt-liche Rechen-zeit [s]	Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen
KAS	Depth-first search	550	3
	Best-bound search	546	2
	Best-estimate search	193	1
	Alternative best-estimate search	198	1
VAS	Branch on variable with minimum infeasibility	1175	6
	Automatic	531	2
	Branch on variable with maximum infeasibility	546	2
	Branch based on pseudo costs	729	3
	Strong branching	761	3
	Branch based on pseudo reduced costs	1165	5
BR	Down branch selected first	1214	5
	Automatic	539	2
	Up branch selected first	454	2

Tabelle 5.16.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.13 (Parametereinstellungen zur Bestimmung des Weges im Baum) dargestellten Werte (KAS: Knotenauswahlstrategie, VAS: Variablenauswahlstrategie, BR: Branching-Richtung)

Die Abbildung 5.13 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.16) zeigt die Ergebnisse, die die Parametereinstellungen zur Bestimmung des Weges vom Algorithmus im Baum betreffen. Bei der Knotenauswahlstrategie liefern die Parameterwerte *Best-estimate search* und *Alternative best-estimate search* die besten Ergebnisse. Somit sollten bevorzugt die Knoten ausgewählt werden, die durch eine Schätzung die größte Neigung zu einer ganzzahligen Lösung in Bezug zur Verschlechterung des Zielfunktionswertes aufzeigen. Eine Tiefensuche (*Depth-first search*) kommt für eine spätere festzulegende Parametereinstellung nicht in Frage. Eine Auswahl des Knotens über den besten Zielfunktionswert der zugehörigen LP-Relaxation (*Best-bound search*) als Standardeinstellung kann in Abhängigkeit der weiteren Ergebnisse noch von Bedeutung sein.

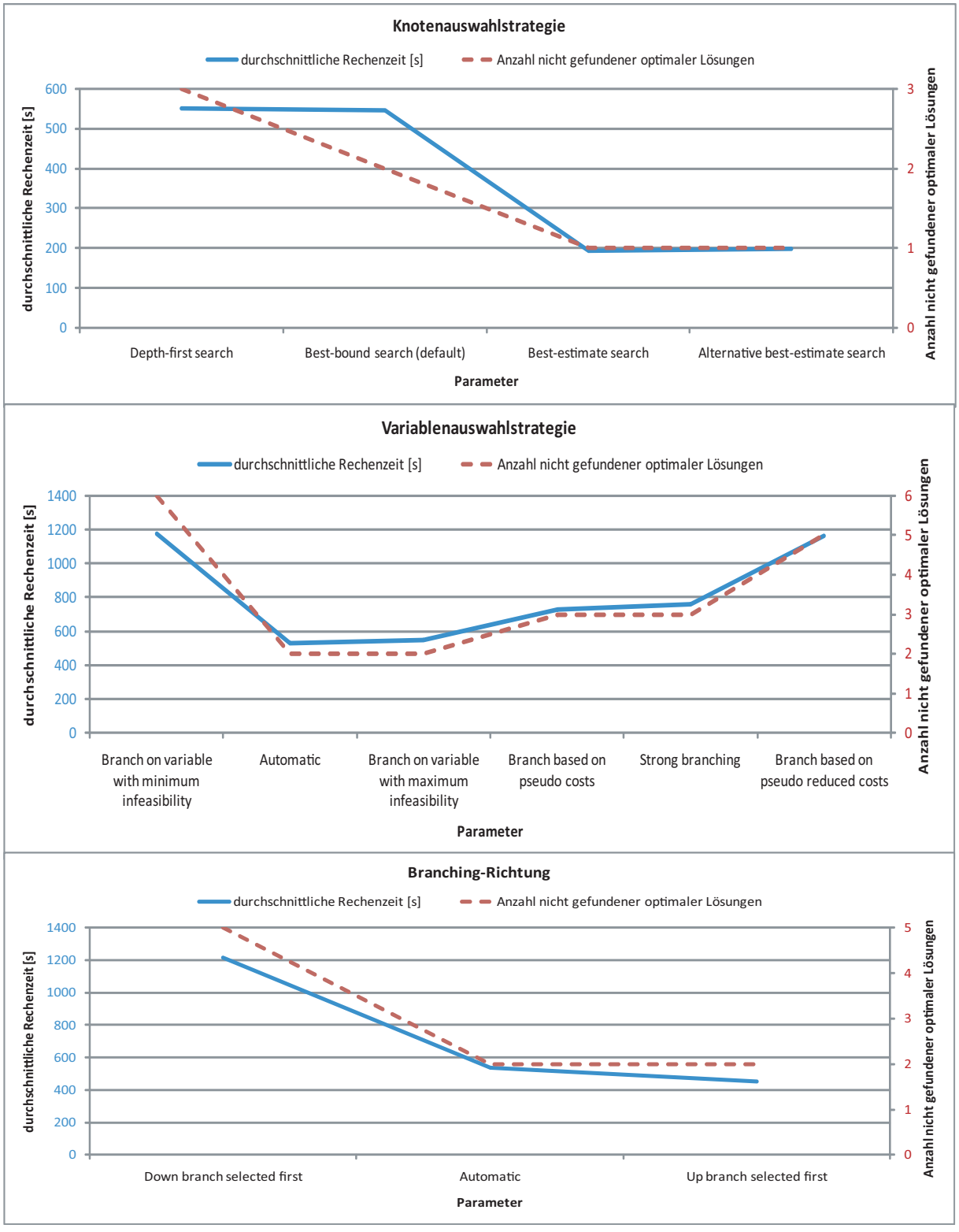

Abbildung 5.13.: Ergebnisse der Parametereinstellungen zur Bestimmung des Weges vom Algorithmus im Baum (Zahlenwerte in der Tabelle 5.16)

Bei der Auswertung der unterschiedlichen Optionen zur Wahl einer Variable im Branch-and-Bound-Baum erhalten wir mit der Standardeinstellung *Automatic* die kürzesten durchschnittlichen Rechenzeiten. Hierbei wird die Strategie von CPLEX mittels des Problems und des Verlaufs im Baum bestimmt. Auch die Strategie, bei der das Branching mittels der Variable erfolgt, deren nicht ganzzahliger Wert die größte Distanz zu einer ganzen Zahl hat (*Branch on variable with maximum infeasibility*), könnte für weitere Untersuchungen eine Rolle spielen. Alle anderen Parametereinstellungen haben im Mittel deutlich schlechtere Ergebnisse.

Bei der Ergebnisanalyse für die Tests zur Branching-Richtung zeigen die Parameter *Automatic* und *Up branch selected first* die besten Ergebnisse. Im zweiten Schritt weiter unten wird ermittelt, ob wir uns für die Standardeinstellung oder die UP-Verzweigungsstrategie entscheiden.

Die Ergebnisse der Parametereinstellungen zur Lösung der Start-Relaxation und der Teilprobleme nach der Start-Relaxation in einem MIP zeigt Abbildung 5.14 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.17). Den MIP-Start-Algorithmus betrachtend liefert *Sifting* die beste und bisher niedrigste durchschnittliche Rechenzeit. Zugleich können mit diesem Algorithmus alle Instanzen optimal gelöst werden. Aufgrund dieser Eindeutigkeit finden die anderen Algorithmen keine weitere Berücksichtigung.

Der Sifting-Algorithmus kann Probleme, die extrem viele Variablen haben, effektiver lösen. Dabei löst dieser Algorithmus eine Reihe von LP-Teilproblemen. Die Lösung eines Teilproblems wird für die Spaltenauswahl im originalen Problem verwendet, welche dann in das nächste Teilproblem eingesetzt werden. Damit ist dieser Algorithmus eine einfache Form der Spaltengenerierung (ILOG, 2009b).

Beim MIP-Teilproblem-Algorithmus erzielt die Standardeinstellung *Automatic* die besten Ergebnisse. Da bei Verwendung dieses Wertes der Dual-Simplex-Algorithmus verwendet wird, ist das Ergebnis mit dem Parameter *Dual Simplex* äquivalent.

Zum Abschluss des ersten Testdurchganges betrachten wir die Abbildung 5.15 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.18), in der die Ergebnisse für weitere Parametereinstellungen aufgelistet sind. Die Auswertung der Ergebnisse für die Tests zur MIP Dive Strategie zeigen ganz klar, dass die besten Ergebnisse mit *Probing dive* möglich sind. Das bedeutet, dass es bei der Wahl des nächsten Knotens von Vorteil ist, die zwei nachfolgenden Knoten zu überprüfen.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim „MIP Emphasis“-Indikator, wo eindeutig der Parameter *Emphasize moving best bound* die kleinste durchschnittliche Rechenzeit und die geringste Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen liefert. Bei diesem Parameter hat die Optimalität der Lösung eine hohe Relevanz.

Abschließend werden noch die Ergebnisse für den Parameter Symmetrie brechend ausgewertet. Bei Analyse der durchschnittlichen Rechenzeit zeigt sich, dass sich die Ergebnisse für die einzelnen Einstellungswerte *Off*, *Moderate level of symmetry breaking* und *Aggres-*

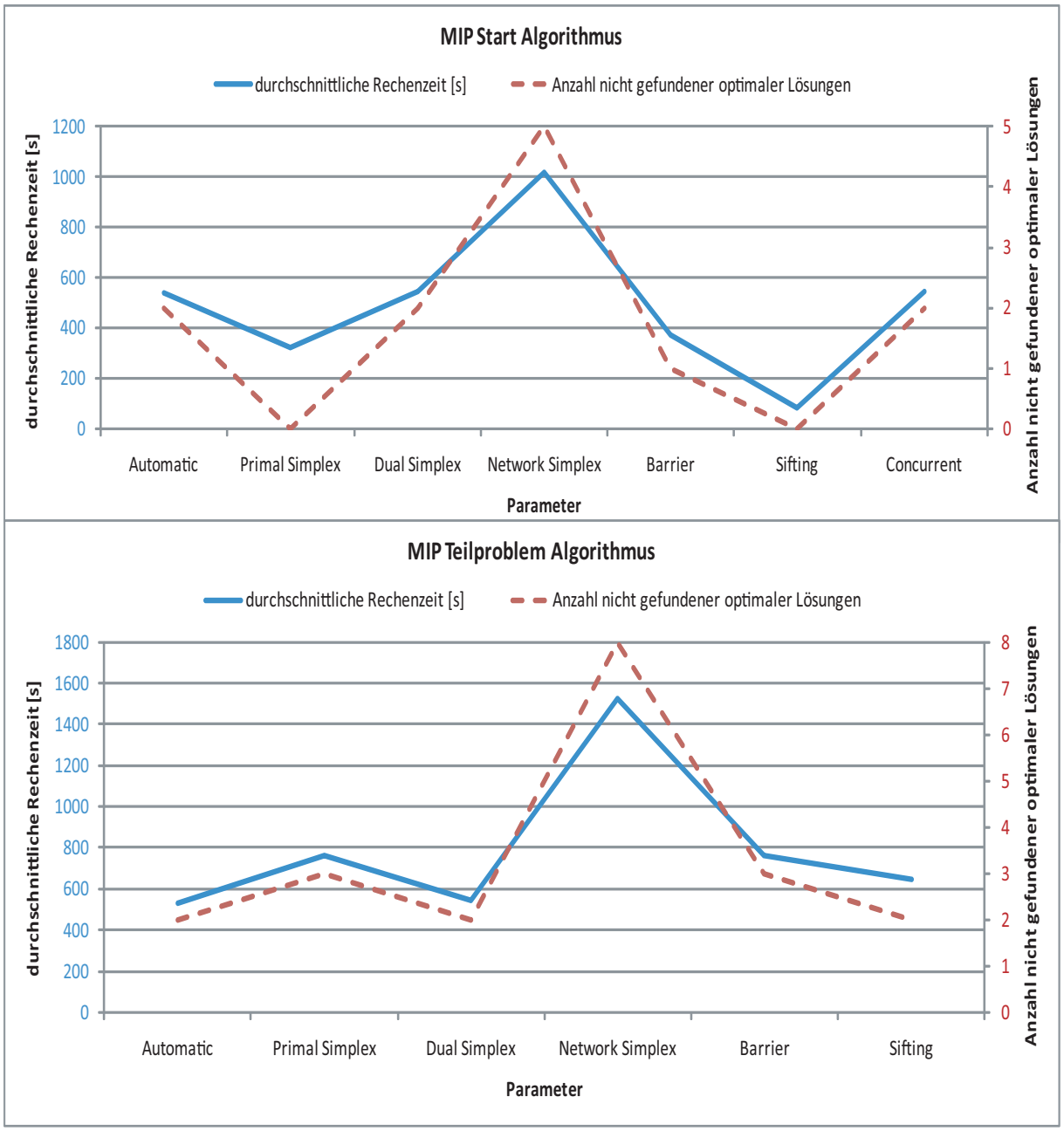

Abbildung 5.14.: Ergebnisse der Parametereinstellungen zur Lösung der Start-Relaxation und der Teilprobleme nach der Start-Relaxation in einem MIP (Zahlenwerte in der Tabelle 5.17)

Parameter	Parameter-einstellungen	durchschnitt-liche Rechen-zeit [s]	Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen
MIP SA	Automatic	538	2
	Primal Simplex	319	0
	Dual Simplex	542	2
	Network Simplex	1020	5
	Barrier	371	1
	Sifting	80	0
	Concurrent	543	2
MIP TA	Automatic	529	2
	Primal Simplex	762	3
	Dual Simplex	541	2
	Network Simplex	1526	8
	Barrier	759	3
	Sifting	649	2

Tabelle 5.17.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.13 (Parametereinstellungen zur Bestimmung des Weges im Baum) dargestellten Werte (MIP SA: MIP-Start-Algorithmus, MIP TA: MIP Teilproblem Algorithmus)

sive level of symmetry breaking kaum unterscheiden. Welcher Parameterwert nun letzlich gewählt wird, muss der nächste Schritt zeigen, in dem die besten Parametereinstellungen miteinander kombiniert werden.

Bei den acht untersuchten CPLEX-Parametern konnten wir mit der Parametereinstellung *Sifting* für den MIP-Start-Algorithmus die besten Ergebnisse erreichen. Diese sollen als Benchmark genommen werden, wenn wir die Parametereinstellungen mit den besten erzielten Ergebnissen miteinander kombinieren. In Tabelle 5.19 sind alle getesteten Einstellungen aufgelistet. Parametereinstellungen, die nicht aufgelistet sind, haben den Standardwert. Die Ergebnisse der Parametereinstellungen aus Tabelle 5.19 zeigt Abbildung 5.16 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.20). Hierbei wird deutlich, dass die Parameterkombination MIP-Start-Algorithmus mit Sifting und Standardeinstellungen für alle anderen Parametern schon die besten Ergebnisse liefert. Deshalb werden für weitere Untersuchungen die Standard-Einstellungen bis auf den MIP-Start-Algorithmus (Sifting) für CPLEX übernommen.

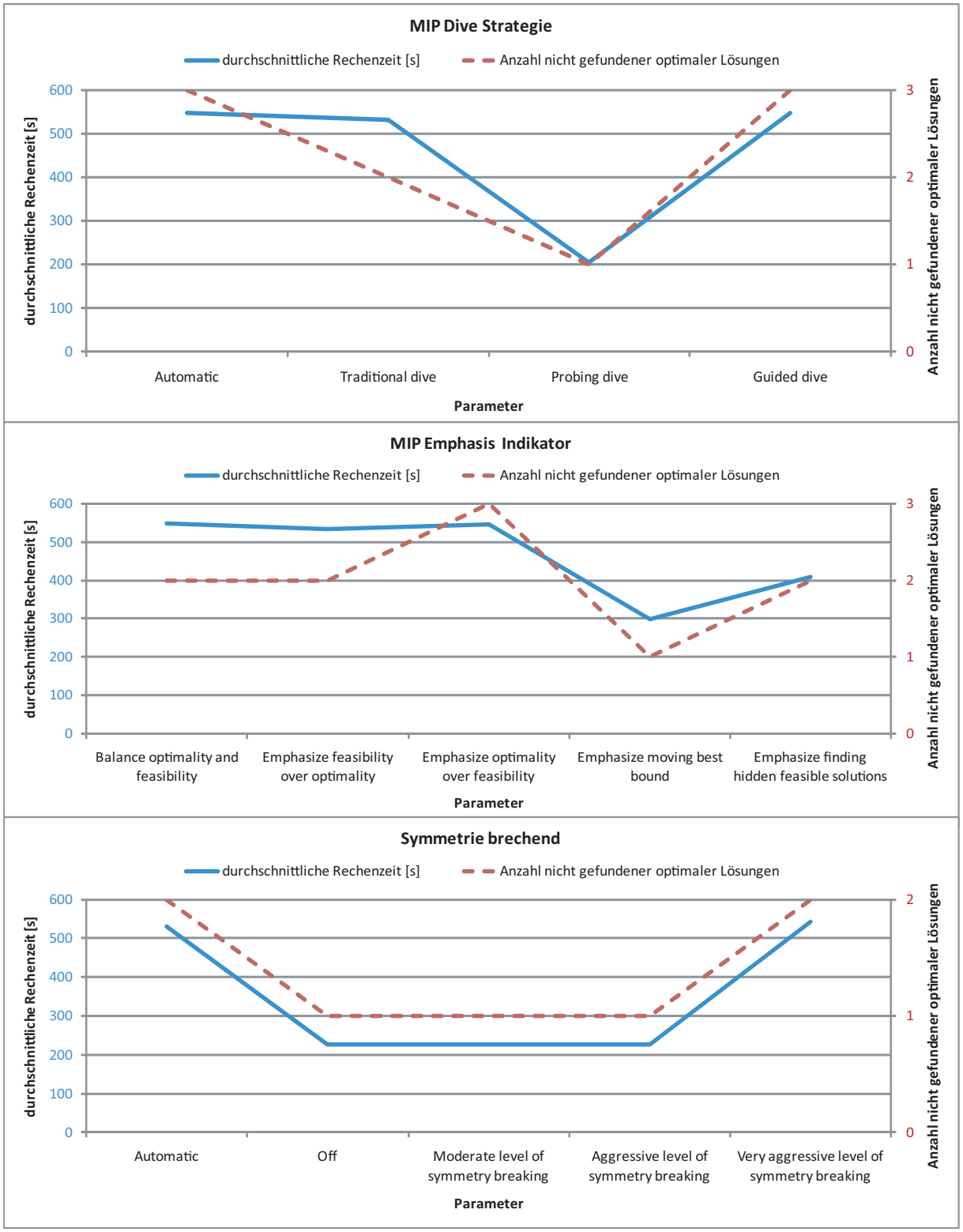

Abbildung 5.15.: Ergebnisse der weiteren Parametereinstellungen für empirische Tests (Zahlenwerte in der Tabelle 5.18)

Parameter	Parameter-einstellungen	durchschnitt-liche Rechen-zeit [s]	Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen
MIP DS	Automatic	547	3
	Traditional dive	531	2
	Probing dive	203	1
	Guided dive	546	3
MIP EI	Balance optimality and feasibility	547	2
	Emphasize feasibility over optimality	532	2
	Emphasize optimality over feasibility	546	3
	Emphasize moving best bound	298	1
	Emphasize finding hidden feasible solutions	408	2
SB	Automatic	531	2
	Turn off symmetry breaking	225	1
	Exert a moderate level of symmetry breaking	225	1
	Exert an aggressive level of symmetry breaking	225	1
	Exert a very aggressive level of symmetry breaking	543	2

Tabelle 5.18.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.15 (weitere Parametereinstellungen für empirische Tests) dargestellten Werte (MIP DS: MIP Dive Strategie, MIP EI: MIP Emphasis Indikator, SB: Symmetrie brechend)

Test	Parametereinstellungen
Test 1	Knotenauswahl: Best-estimate search
Test 2	Knotenauswahl: Alternative best-estimate search
Test 3	Symmetry: Off
Test 4	Symmetry: Moderate level of symmetry breaking
Test 5	Symmetry: aggressive level of symmetry breaking
Test 6	Branching Richtung: Up branch selected first
Test 7	MIP Dive Strategie: Up branch selected first
Test 8	MIP Emphasis Indikator: Probing dive

Tabelle 5.19.: Kombination der Parametereinstellungen mit *Sifting* für den MIP-Start-Algorithmus (übrigen Werte auf Standard gesetzt)

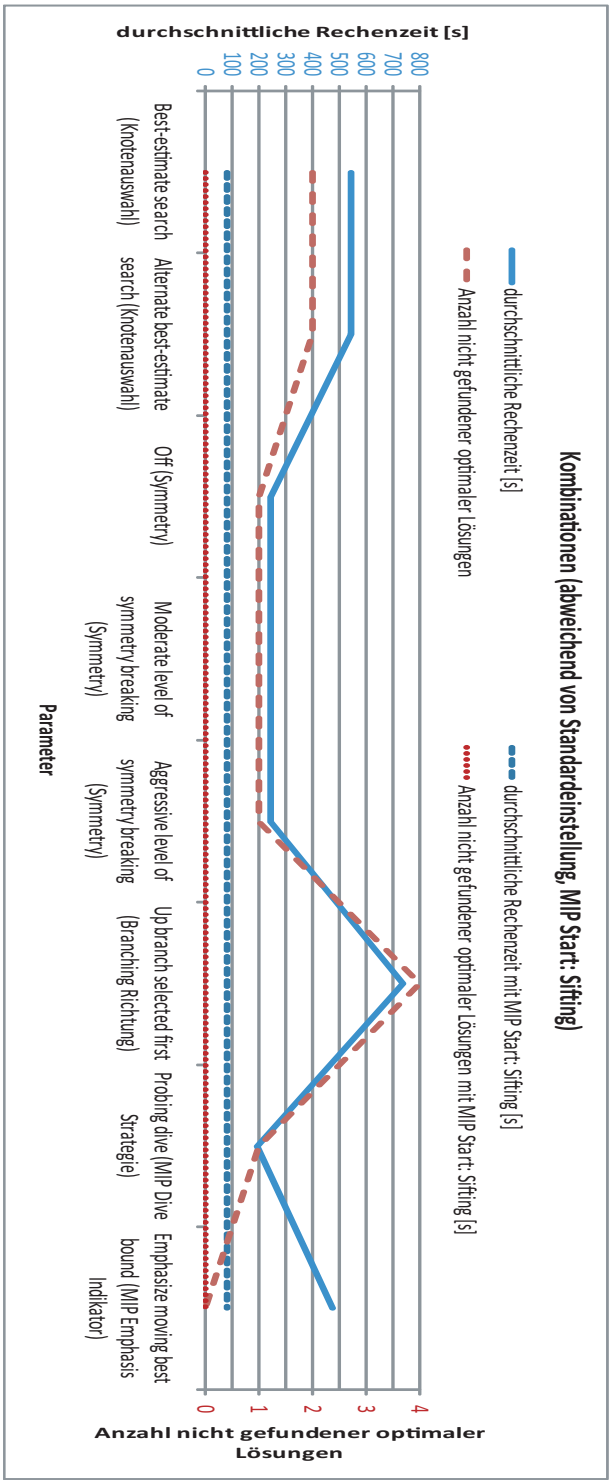

Abbildung 5.16.: Ergebnisse aus Kombination bester Parametereinstellungen mit Sifting in MIP Start (Rest: Standardeinstellung, Zahlenwerte in der Tabelle 5.20)

Test	durchschnittliche Rechenzeit [s]	Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen
Test 1	544,0	2
Test 2	543,0	2
Test 3	244,0	1
Test 4	244,1	1
Test 5	244,1	1
Test 6	739,6	4
Test 7	193,8	1
Test 8	477,5	0
Benchmark	80,1	0

Tabelle 5.20.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.16 (Kombination bester Parametereinstellungen mit Sifting in MIP Start) dargestellten Werte

5.4.5. Lokale Suchmethoden

Aus unserer Sicht sind die mit CPLEX bezüglich der Rechenzeit erzielten Ergebnisse nicht zufriedenstellend (bestes Ergebnis: 80,08 Sekunden als durchschnittliche Rechenzeit und 0 als Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen). Weiterhin gibt es bei dem Problem „Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren“ größere Instanzen, die mit CPLEX nicht oder nicht in kurzer Zeit lösbar sind. Deshalb möchten wir zwei alternative Lösungsverfahren vorstellen und deren Lösungsqualität analysieren.

Von Hauptmerkmalen einer Metaheuristik wie (Blum & Roli, 2003, S. 270)

- den Suchprozess „lenken“,
- den Suchraum erkunden, um (fast) optimale Lösungen zu finden und
- einfache lokale Suchverfahren

ausgehend, gehören beide Verfahren in die Familie von Metaheuristiken. Sie basieren bei der Nachbarauswahlregel auf einer Greedy-Strategie (alternative Bezeichnung: Steepest Descent (SD) Methode), wo die bestbewertete benachbarte Lösung genommen wird. Hierbei wird die Suche beendet, „wenn die aktuelle Nachbarschaft keine Lösung beinhaltet, die besser als die aktuelle Lösung bewertet ist; damit endet die Suche in einem lokalen Optimum“ (Fink, 2000, S. 75).

Unterschiede zwischen beiden Verfahren existieren in der Betrachtung des Lösungsraumes. Das Verfahren 3 hat als Ausgangspunkt eine Liste S von Ladegefäßen, die aufsteigend nach frühesten Startzeitpunkten sortiert sind. Weiterhin gibt es eine Funktion *Dekodierung*, in der eine geordnete Zuordnung von Ladegefäß zu Eingangstor in der Reihenfolge gemäß S durch sukzessives bestmögliches Anfügen an ein Tor und der Ziel-

funktionswert dieser Lösung berechnet wird. Anschließend werden alle Nachbarschaftszüge in S als neue Lösung bewertet und es wird der Zug durchgeführt, der die größte Verbesserung liefert. Das Verfahren terminiert dann, wenn keine Verbesserungen mehr möglich sind.

Verfahren 3 SD Decode Konstruktion

```
S = Liste der Ladegefäße
als Startlösung: Ladegefäße sortiert nach aufsteigenden frühesten Startzeitpunkten
Dekodierung: Erzeuge geordnete Zuordnung zu Eingangstor in der Reihenfolge gemäß
S durch sukzessives bestmögliches Anfügen an ein Tor und berechne Zielfunktionswert
SBest = S und SBestKosten = berechneter Zielfunktionswert
SBestKosten1 = SBestKosten
break = 0
repeat
  for all möglichen Verschiebungen von Ladegefäßen in S do
    Dekodierung
    SKosten = berechneter Zielfunktionswert
    if SKosten < SBestKosten1 then
      SBestKosten1 = SKosten
      SBest = S
    end if
  end for
  if SBestKosten1 < SBestKosten then
    SBestKosten = SBestKosten1
    S = SBest
  else
    break = 1
  end if
until break = 1
```

Eine Erweiterung vom Verfahren 3 stellt das Verfahren 4 dar. In diesem werden durch unterschiedliche zufallsgenerierte Startlösungen unterschiedliche lokale Optima berechnet. Zum Schluss wird das lokale Optimum mit dem besten Zielfunktionswert gewählt.

Der Nachteil des Verfahrens 3 und seiner Erweiterung liegt in der permanenten kompletten Neuberechnung der Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren bei jeder Nachbarschaftsbewertung einer Ladegefäßliste S. Bei einer Anzahl von n Ladegefäßen müssen in einer Iteration $n \times (n-1)$ Nachbarlösungen bewertet werden. Hinzu kommt die stückweise lineare Zielfunktion des Modells, in der in einer Schleife die geeignete Stützstelle gefunden werden muss. Dadurch sind bei m Eingangstoren und k Stützstellen pro Nachbarschaftsbewertung im Worst Case $n \times m \times k$ Bewertungen vorzunehmen. Insgesamt ergibt sich daraus ein Aufwand von $n \times (n-1) \times n \times m \times k$ Operationen. Beispielsweise können bei 150 Ladegefäßen, 20 Eingangstoren und 25 Stützstellen in der Zielfunktion pro Iteration bis zu $150 \times 149 \times 150 \times 20 \times 25 = 1,67625 \times 10^9$ Daten bewertet

Verfahren 4 SD Decode Zufall

```
als Startlösung: Ladegefäße sortiert nach aufsteigenden frühesten Startzeitpunkten
Dekodierung: Erzeuge geordnete Zuordnung zu Eingangstor in der Reihenfolge gemäß
S durch sukzessives bestmögliches Anfügen an ein Tor und berechne Zielfunktionswert
SBest = S und SBestKosten = berechneter Zielfunktionswert
SBest1 = S und SBestKosten1 = SBestKosten
SBestKosten2 = SBestKosten
break = 0
for all n Zufallspermutationen von S do
  repeat
    for all möglichen Verschiebungen von Ladegefäßen in S do
      Dekodierung
      SKosten = berechneter Zielfunktionswert
      if SKosten < SBestKosten1 then
        SBestKosten1 = SKosten
        SBest = S
      end if
    end for
    if SBestKosten1 < SBestKosten then
      SBestKosten = SBestKosten1
      S = SBest
    else
      break += 1
    end if
  until break = 1
  break = 0
  if SBestKosten < SBestKosten2 then
    SBestKosten2 = SBestKosten
    SBest1 = SBest
  end if
  S = neue Zufallspermutation(S)
  Dekodierung
  SBestKosten = berechneter Zielfunktionswert
end for
```

werden.

Wie die ständige komplette Neuberechnung der Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren bei jeder Nachbarschaftsbewertung einer Ladegefäßliste S vermeidbar ist, zeigt das Verfahren 5. Hier werden nicht mehr die Nachbarschaften einer Ladegefäßliste S ausgewertet, sondern die Nachbarschaften in der Zuordnungsmatrix Ladegefäß zu Eingangstor. Welche Nachbarschaften dabei Berücksichtigung finden, zeigt Abbildung 5.17. In der Zuordnungsmatrix Ladegefäß zu Eingangstor werden mit den Ladegefäßen sogenannte *Shifts* (verschieben) bzw. *Swaps* (vertauschen) durchgeführt. Dadurch müssen nur die Zuordnungen an Eingangstore neu bewertet werden, wo aufgrund von Shifts bzw. Swaps Änderungen in der Reihenfolge der Entladung stattfanden.

Der Ausgangspunkt im Verfahren 5 entspricht dem im vorhergehenden Verfahren. Wir haben eine Liste S, in der die Ladegefäße nach aufsteigenden frühesten Startzeitpunkten sortiert sind. Nach Dekodierung dieser Liste existiert die Zuordnungsmatrix $ZOLGET$ (Ladegefäße zu Eingangstore). Weiterhin werden die Funktionen *KostenShift* bzw. *KostenSwap* definiert, die die Kostenersparnis auf Basis eines Shifts bzw. Swaps berechnen. Ausgehend von allen Shifts und Swaps einer Lösung ist der Kern des Verfahrens die Betrachtung aller Nachbarschaftslösungen von $ZOLGET$ und die gleichzeitige Bewertung der Shifts und Swaps. Es wird nach Beendigung einer Iteration der Zug durchgeführt, der die größte Kostenersparnis erzielt. Das Verfahren terminiert dann, wenn keine Kostenersparnis mehr möglich ist und somit ein lokales Optimum gefunden wurde.

Auch für dieses Verfahren existiert mit Verfahren 6 eine Erweiterung, in dem durch Zufallspermutationen von S unterschiedliche Startlösungen von $ZOLGET$ generiert werden, die zu unterschiedlichen lokalen Optima führen können.

Bei einer Komplexitätsbetrachtung der Nachbarschaftsbewertungen im Verfahren 5 sind im Vergleich zum Verfahren 3 deutlich weniger Rechenoperationen notwendig. Bei n Ladegefäßen, m Eingangstoren und k Stützstellen in der stückweisen linearen Zielfunktion des Modells ist im Worst Case ein Rechenaufwand von $n \times (n-1) \times m \times k$ Operationen zu verzeichnen. Im oberen Beispiel mit 150 Ladegefäßen, 20 Eingangstoren und 25 Stützstellen in der Zielfunktion fallen pro Iteration 1.1175×10^7 Bewertungen an (1.665075×10^9 weniger).

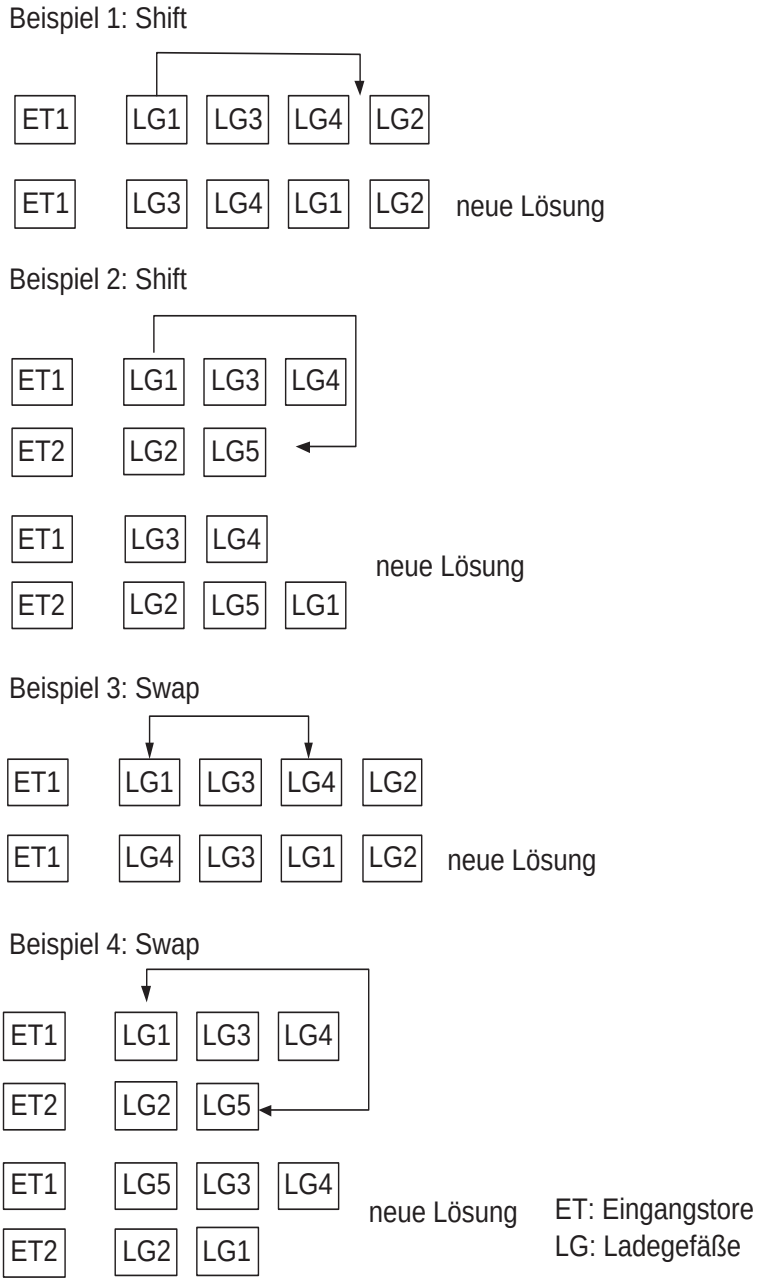

Abbildung 5.17.: Beispiele für Shifts und Swaps als Nachbarschaftsbeziehungen in einer Lösung

Verfahren 5 SD Shift Swap Konstruktion

```
S = Liste der Ladegefäße
als Startlösung: Ladegefäße sortiert nach aufsteigenden frühesten Startzeitpunkten
ZOLGET = Zuordnungsmatrix Ladegefäße (Zeilen) zu Eingangstore (Spalten)
Dekodierung: Erzeuge geordnete Zuordnung zu Eingangstor in der Reihenfolge gemäß
S durch sukzessives bestmögliches Anfügen an ein Tor und erzeuge ZOLGET
ZOLGETBest = ZOLGET
KostenShift: berechne Kostenersparnis auf Basis eines Shifts in ZOLGET
KostenSwap: berechne Kostenersparnis auf Basis eines Swaps in ZOLGET
break = 0
repeat
  Kostenersparnis = 0
  KostenersparnisBest = 0
  for all möglichen Shifts und Swaps von Ladegefäßen in ZOLGET do
    Kostenersparnis = KostenShift
    if Kostenersparnis > KostenersparnisBest then
      KostenersparnisBest = Kostenersparnis
      ZOLGETBest = ZOLGET
    end if
    Kostenersparnis = KostenSwap
    if Kostenersparnis > KostenersparnisBest then
      KostenersparnisBest = Kostenersparnis
      ZOLGETBest = ZOLGET
    end if
  end for
  if KostenersparnisBest > 0 then
    ZOLGET = ZOLGETBest
  else
    break = 1
  end if
until break = 1
```

Verfahren 6 SD Shift Swap Zufall

```
S = Liste der Ladegefäße
als Startlösung: Ladegefäße sortiert nach aufsteigenden frühesten Startzeitpunkten
ZOLGET = Zuordnungsmatrix Ladegefäße (Zeilen) zu Eingangstore (Spalten)
Dekodierung: Erzeuge geordnete Zuordnung zu Eingangstor in der Reihenfolge gemäß
S durch sukzessives bestmögliches Anfügen an ein Tor und erzeuge ZOLGET
ZOLGETBest = ZOLGET
KostenShift: berechne Kostenersparnis auf Basis eines Shifts in ZOLGET
KostenSwap: berechne Kostenersparnis auf Basis eines Swaps in ZOLGET
SBestKosten1 = Zielfunktionswert von ZOLGET
break = 0
for all n Zufallspermutationen von S do
  repeat
    KostenersparnisBest = 0
    for all möglichen Shifts und Swaps von Ladegefäßen in ZOLGET do
      Kostenersparnis = KostenShift
      if Kostenersparnis > KostenersparnisBest then
        KostenersparnisBest = Kostenersparnis
        ZOLGETBest = ZOLGET
      end if
      Kostenersparnis = KostenSwap
      if Kostenersparnis > KostenersparnisBest then
        KostenersparnisBest = Kostenersparnis
        ZOLGETBest = ZOLGET
      end if
    end for
    if KostenersparnisBest > 0 then
      ZOLGET = ZOLGETBest
    else
      break = 1
    end if
  until break = 1
  break = 0
  SBestKosten = Zielfunktionswert von ZOLGETBest
  if SBestKosten < SBestKosten1 then
    SBestKosten1 = SBestKosten
    ZOLGETBest1 = ZOLGETBest
  end if
  S = neue Zufallspermutation(S)
  Dekodierung
end for
```

5.4.6. Ergebnisse mit lokalen Suchmethoden

In der Abbildung 5.18 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.21) sind die Ergebnisse beider Lösungsalgorithmen und deren zugehörigen Erweiterungen dargestellt. Außerdem beinhaltet die Abbildung auch die Ergebnisse der Tests, die mit umfangreichen Datensätzen durchgeführt wurden und mit CPLEX nicht oder nicht in akzeptabler Zeit lösbar waren. Analog zu den Tests mit CPLEX betrug auch hier die maximal zulässige Rechenzeit eine Stunde.

Benchmark für die Ergebnisse sind die besten mit CPLEX erzielten durchschnittlichen Rechenzeiten und Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen. Diese wurden mit Sifting als MIP-Start-Algorithmus und Standardeinstellungen für die restlichen Parameter erreicht (vgl. Abbildung 5.16) und betragen ca. 80 Sekunden für die durchschnittliche Rechenzeit bzw. 0 für die Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen.

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit CPLEX sind die mit den Metaheuristiken erhaltenen durchschnittlichen Rechenzeiten für die 20 Testinstanzen deutlich besser. Sie betragen zum Teil weniger als eine Sekunde. Jedoch konnten nur mit dem Verfahren 6 alle optimalen Lösungen ermittelt werden.

Beim Vergleich der Verfahren untereinander schneiden bzgl. der benötigten durchschnittlichen Rechenzeit erwartungsgemäß die Verfahren am besten ab, die bei Überprüfung einer Nachbarschaftslösung nicht die komplette Lösung neu generieren müssen (Verfahren 5 und seine Erweiterung). Das gleiche Bild ergibt sich bei der Anzahl nicht ermittelter Optima. Dies ist auch nachvollziehbar, da mit den gleichzeitigen Shifts und Swaps ein viel größerer Lösungsraum untersucht wird.

Bei Betrachtung der Ergebnisse von den mit den umfangreicheren Problemstellungen durchgeführten Tests verfestigt sich der mit den anderen Tests gewonnene Eindruck, dass das Verfahren 5 und seine Erweiterung bzgl. der durchschnittlichen Rechenzeiten und durchschnittlich erzielten Zielfunktionswerten (Minimierungsproblem) deutlich besser sind. Hierbei können lediglich die durchschnittlich erzielten Zielfunktionswerte und nicht die Anzahl nicht erreichter Optima betrachtet werden, da nicht von allen Problemstellungen das Optimum bekannt ist. Die durchschnittliche Rechenzeit für das Verfahren 4 (SD Decode Zufall) beträgt 3600 Sekunden, d.h., für alle umfangreichen Probleminstanzen konnte das Verfahren kein Optimum finden.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird für die Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren in der Linienverkehrsplanung in dieser Arbeit nur noch das Verfahren 5 und seine Erweiterung berücksichtigt. Aufgrund der hohen Rechenzeiten und schlechten Lösungsqualitäten bei maximal zulässiger Rechenzeit mit CPLEX und den Verfahren 3 bzw. 4 können diese hier nicht weiter angewendet werden, da vor allem bei einer kompletten Linienverkehrsplanung für ca. 400 solcher Zuordnungsprobleme Lösungen zu finden sind.

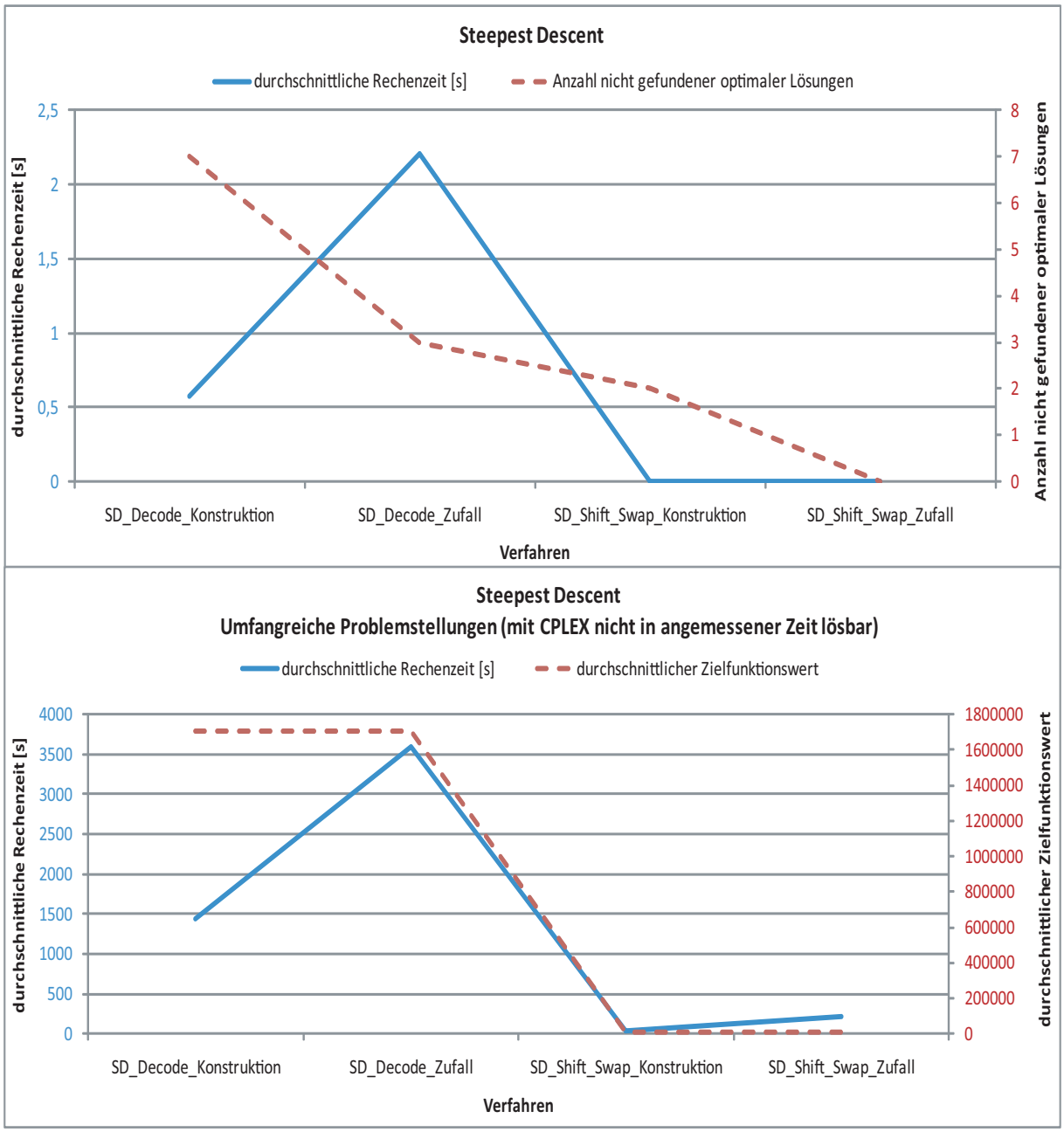

Abbildung 5.18.: Ergebnisse für getestete Steepest Descent Varianten (inklusive umfangreiche Problemstellungen, Zahlenwerte in der Tabelle 5.21)

Datensätze	Verfahren	durchschnittliche Rechenzeit [s]	Anzahl nicht gefundener optimaler Lösungen	DZFW
normal	SD Decode Konstruktion	0,58	7	
	SD Decode Zufall	2,21	3	
	SD Shift Swap Konstruktion	0,08	2	
	SD Shift Swap Zufall	0,08	0	
umfangreich	SD Decode Konstruktion	1437,19		1709448,8
	SD Decode Zufall	3600,06		1709281,4
	SD Shift Swap Konstruktion	44,00		10867,0
	SD Shift Swap Zufall	209,00		10860,0

Tabelle 5.21.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.18 (getestete Steepest Descent Varianten) dargestellten Werte (DZFW: durchschnittlicher Zielfunktionswert)

5.4.7. Bewertung der Verfahren 1 und 2

Wie schon erwähnt, unterscheiden sich die Verfahren 1 und 2 untereinander in der Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren. Im Folgenden sollen die Auswirkungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen auf den Servicegrad und die Rechenzeit beim Datensatz Europa untersucht werden. Die anderen Parametereinstellungen bleiben mit folgenden Standardeinstellungen konstant (vergleiche dazu Abschnitte 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3):

- ein Tag oder mehrere Tage: ein Tag,
- Diskretisierung der Zeit: 1 Sekunde und
- Identifizierung von ungeeigneten Mengen: *alpha*-Wert am Versanddepot und Maximierung der Auslastung am Hub.

Bezüglich des bei Identifizierung von ungeeigneten Mengen eingesetzten *alpha*-Wertes werden lediglich die Werte zwischen 0,01 und 0,4 getestet, da in diesem Bereich die besten Servicegrade für den Europa-Datensatz zu erwarten sind (vergleiche dazu auch Abschnitt 5.3.3).

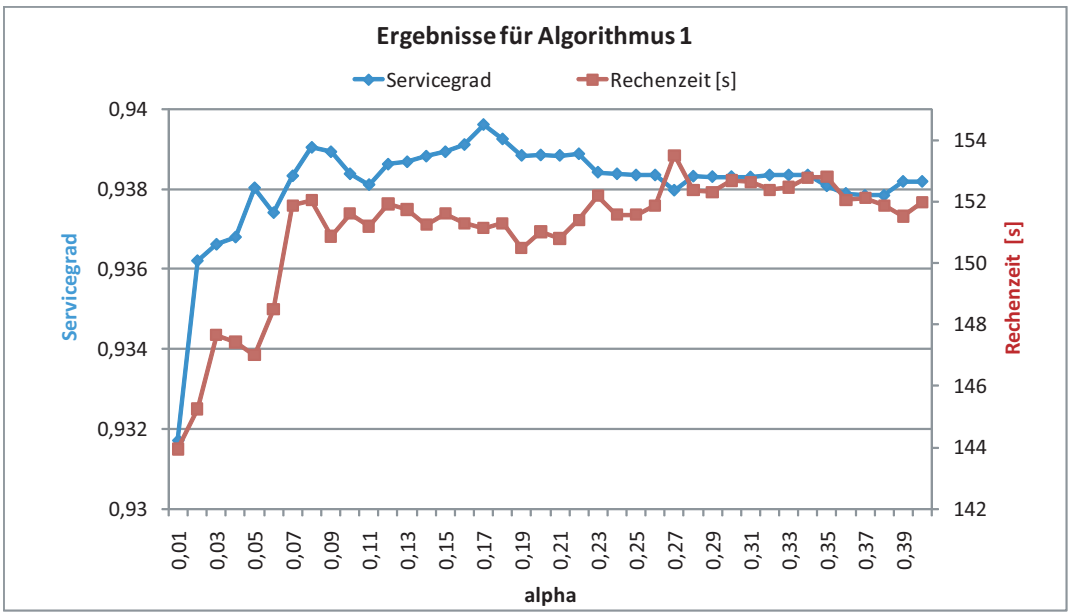

Abbildung 5.19.: Ergebnisse für Verfahren 1 (Datensatz Europa, Zahlenwerte in der Tabelle 5.22)

Abbildung 5.19 (Zahlenwerte in der Tabelle 5.22) fasst die Ergebnisse für die Anwendung des Verfahrens 1 auf den Datensatz Europa zusammen. Der beste Servicegrad mit ca. 94,0% wird mit dem *alpha*-Wert 0,17 bei einer Rechenzeit von ca. 150 Sekunden erzielt. Hinsichtlich der Rechenzeit und des Servicegrades gibt es zwischen den unterschiedlichen ausgewählten *alpha*-Werten kaum Unterschiede. Bei einer oberen Schranke von 98,58% (vergleiche dazu Tabelle 5.2) erscheint der erlangte Servicegrad noch verbesserungswürdig. Ob dies nun durch die alternative Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren im Verfahren 2 erreicht werden konnte zeigen die folgenden Testergebnisse.

α	**α und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**	α	**α und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**
0,01	0,932; 143,94	0,21	0,939; 150,79
0,02	0,936; 145,25	0,22	0,939; 151,40
0,03	0,937; 147,66	0,23	0,938; 152,18
0,04	0,937; 147,42	0,24	0,938; 151,57
0,05	0,938; 147,00	0,25	0,938; 151,57
0,06	0,937; 148,48	0,26	0,938; 151,87
0,07	0,938; 151,87	0,27	0,938; 153,51
0,08	0,939; 152,04	0,28	0,938; 152,37
0,09	0,939; 150,87	0,29	0,938; 152,30
0,1	0,938; 151,60	0,30	0,938; 152,68
0,11	0,938; 151,20	0,31	0,938; 152,63

Weiter auf der nächsten Seite

α	α **und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**	α	α **und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**
0,12	0,939; 151,91	0,32	0,938; 152,38
0,13	0,939; 151,74	0,33	0,938; 152,46
0,14	0,939; 151,24	0,34	0,938; 152,77
0,15	0,939; 151,60	0,35	0,938; 152,80
0,16	0,939; 151,29	0,36	0,938; 152,06
0,17	0,940; 151,13	0,37	0,938; 152,12
0,18	0,939; 151,29	0,38	0,938; 151,87
0,19	0,939; 150,48	0,39	0,938; 151,52
0,2	0,939; 151,01	0,4	0,938; 151,98

Tabelle 5.22.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.19 (Ergebnisse für Verfahren 1) dargestellten Werte (SG: Servicegrad, RZ: Rechenzeit)

Für das Zuordnungsproblem „Ladegefäße zu Eingangstoren“ im Verfahren 2 wurde das Verfahren 6 herangezogen, welches mit dem Wert 0 als die Anzahl der Zufallspermutationen für die unterschiedlichen Startlösungen dem Verfahren 5 entspricht. Für die Tests wurden folgende Parameter variiert:

- maximal zulässige Rechenzeit für die Lösung eines Zuordnungsproblems „Ladegefäße zu Eingangstore“ ($maxZeit$): 1, 10, 100, 1000, 3600 Sekunden,
- maximal zulässige Anzahl der Zufallspermutationen für die unterschiedlichen Startlösungen im Verfahren 6 ($maxPermut$): 0, 5, 10 und
- *alpha*-Wert mit 0,01 bis 0,40.

Zunächst werden die besten erreichten Servicegrade hinsichtlich der unterschiedlichen Parameterwerte $maxZeit$ untersucht. Abbildung 5.20 zeigt deutlich, dass gute Servicegrade erst mit einem $maxZeit$-Wert von 100 Sekunden erreicht werden und somit Werte wie 1 oder 10 Sekunden hier keine Bedeutung haben. Jedoch sind bei den Werten 1 bzw. 10 Sekunden die Rechenzeiten für die komplette Linienverkehrsplanung am geringsten, da für die Lösung des Zuordnungsproblems „Ladegefäße zu Eingangstore“ nur wenig Zeit zur Verfügung steht. Dass mit 1000 Sekunden eine kleinere Rechenzeit als mit 100 Sekunden erzielbar ist, kann auf die unterschiedlichen Parameterwerte für $maxPermut$ zurückgeführt werden, mit denen die besten Servicegrade erreicht wurden. Denn bei 1000 Sekunden hat $maxPermut$ den Wert 0 und bei 100 Sekunden den Wert 10 (vergleiche dazu auch Tabelle A.2).

Aus der Abbildung 5.21 (Zahlenwerte in der Tabelle A.2) können wir mit 95,65% auch den besten errechneten Servicegrad für den Datensatz Europa entnehmen, der mit der Parameterkombination $alpha = 0,08$, $maxZeit = 100$ Sekunden und $maxPermut = 10$ erreicht wurde. Bei gleichbleibenden *alpha*- und $maxZeit$-Werten und Variation von

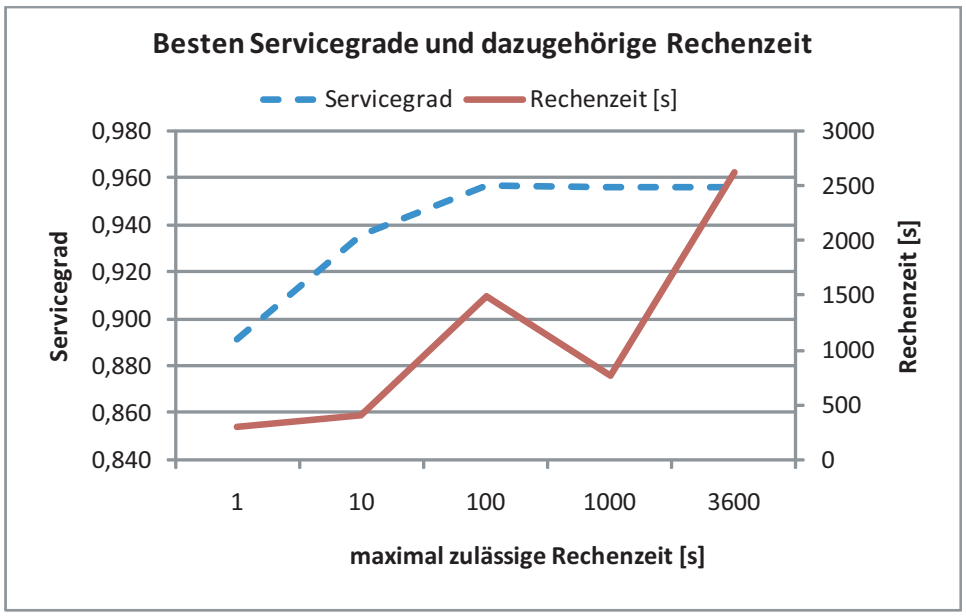

Abbildung 5.20.: Die besten erlangten Servicegrade bezüglich der Gruppierung des Parameters für die maximal zulässige Rechenzeit zur Lösung eines Zuordnungsproblems „Ladegefäße zu Eingangstore“ ($maxZeit$) im Verfahren 2 (Datensatz Europa, Zahlenwerte in der Tabelle A.2)

$maxPermut$ liegen die maximalen Abweichungen bei ca. 0,1%. Es kann auch kein eindeutiger Trend hinsichtlich einer geeigneten Anzahl von $maxPermut$ abgeleitet werden, da bei 100, 1000 bzw. 3600 Sekunden für $maxZeit$ die besten Ergebnisse mit 10, 0 bzw. 5 für $maxPermut$ berechnet wurden. Da das Zuordnungsproblem „Ladegefäße zu Eingangstore“ nur ein Teilproblem für die komplette Linienverkehrsplanung ist und aufgrund der Mehrstufigkeit der Problemstellung Abhängigkeiten zwischen den Verfügbarkeitszeitpunkten, dem Weitertransport und der Ankunftszeit am nächsten Standort (Hub oder Empfangsdepot) existieren, ist bei einer besseren Lösung eines Zuordnungsproblems „Ladegefäße zu Eingangstore“ insgesamt ein schlechterer Servicegrad möglich. Weiterhin ist auf die bezüglich des Servicegrades geringen Differenzen zwischen den Parameterkombinationen bei einem konstanten Servicegrad hinzuweisen. So existiert mit 0,083% zwischen dem Servicegrad 95,431% mit $maxZeit = 100$ und $maxPermut = 10$ und dem Servicegrad 95,348% mit $maxZeit = 3600$ und $maxPermut = 10$ bei einem $alpha = 0,4$ die größte Differenz (siehe dazu auch Abbildung 5.22). Daher ist es für die komplette Linienverkehrsplanung hinsichtlich des Servicegrades nicht von Bedeutung, ob für $maxZeit$ die Werte 100, 1000 oder 3600 bzw. für $maxPermut$ die Werte 0, 5 oder 10 gelten. Jedoch sollte beim Datensatz Europa der $alpha$-Wert zwischen zwischen 0,07 und 0,1 betragen.

Abbildung 5.23 (dazugehörigen Zahlenwerte in der Tabelle A.2) fasst hinsichtlich der Rechenzeit ausgewählte Ergebnisse ($maxZeit \geq 100$) zusammen, die für die Berechnung der in der Abbildung 5.22 wiedergegebenen Servicegrade benötigt werden. Hierbei

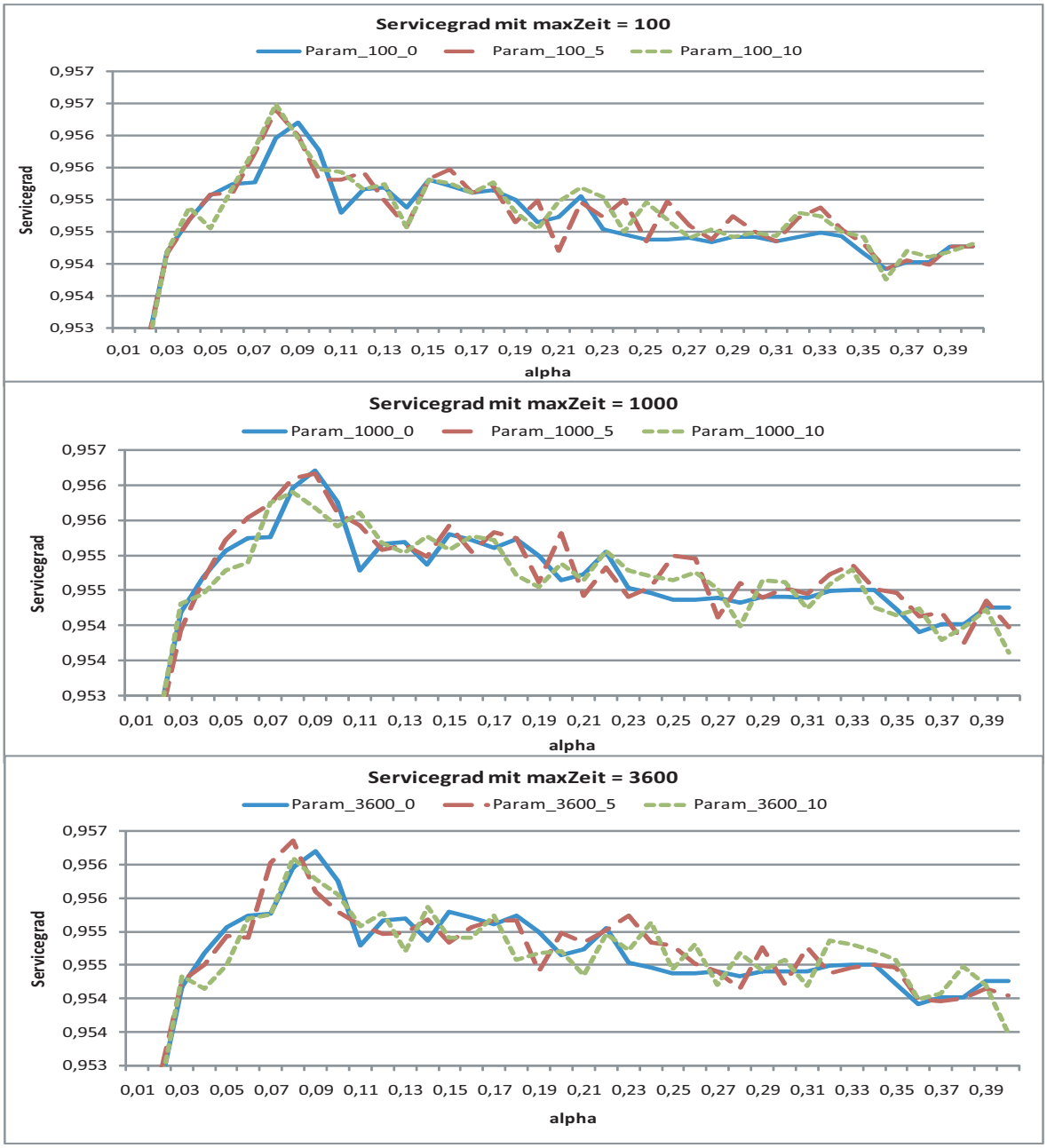

Abbildung 5.21.: Bezüglich des Servicegrades ausgewählte Testergebnisse für das Verfahren 2 (Datensatz Europa, Zahlenwerte in der Tabelle A.2)

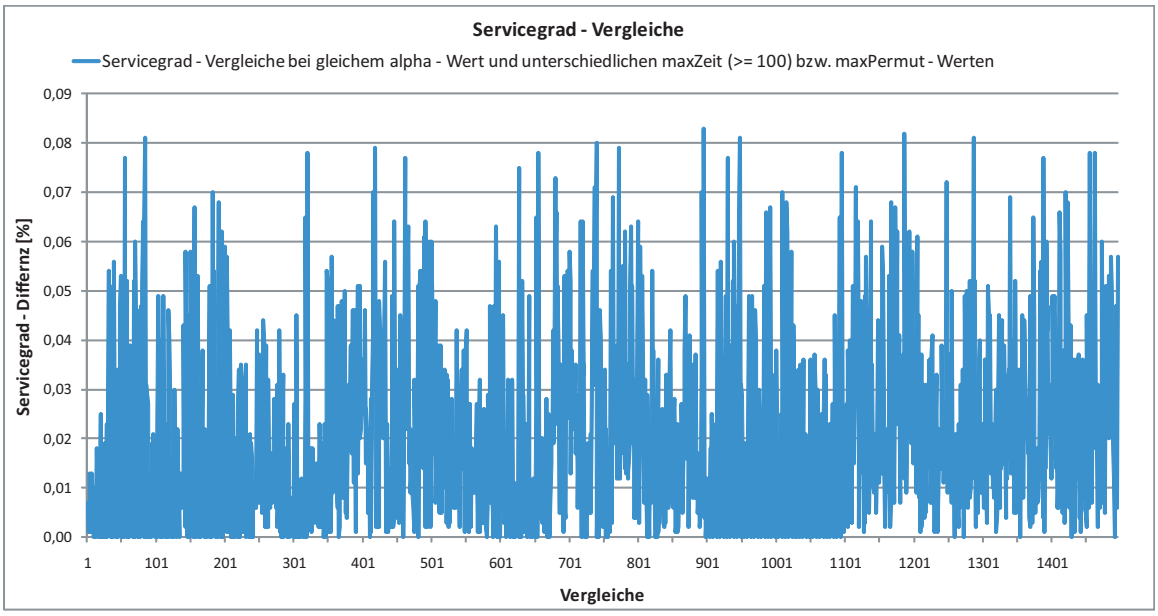

Abbildung 5.22.: Verglichene Servicegrade bei gleichem *alpha*-Wert und unterschiedlichen $maxZeit$- (≥ 100) bzw. $maxPermut$-Werten (Datensatz Europa, verglichene Zahlenwerte aus der Tabelle A.2)

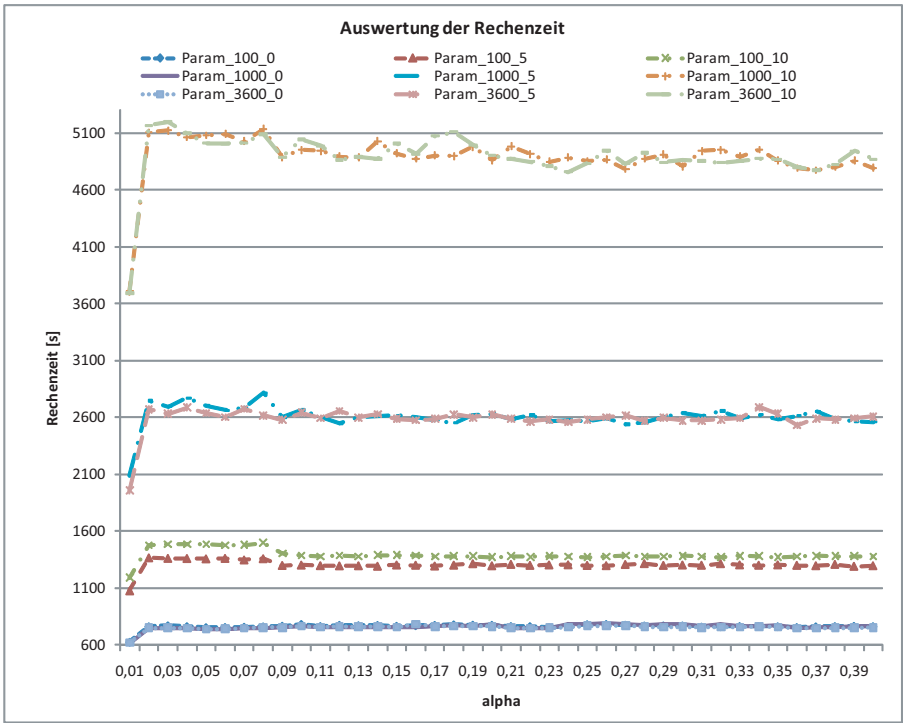

Abbildung 5.23.: Bezüglich der Rechenzeit ausgewählte Ergebnisse für das Verfahren 2 (Datensatz Europa, Zahlenwerte in der Tabelle A.2)

ist zunächst zu erwähnen, dass es kaum Unterschiede bei der Rechenzeit für die einzelnen *alpha*- und *maxZeit*-Werte beim gleichen $maxPermut = 0$ gibt. Erklärbar ist dies durch die maximal benötigte Rechenzeit für alle Zuordnungsprobleme „Ladegefäße zu Eingangstore“, die in den meisten Fällen kleiner oder gleich 100 Sekunden beträgt. Bestätigt wird dies durch die Rechenzeiten für $maxPermut > 0$. Mit $maxZeit = 100$ werden die niedrigsten Rechenzeiten erzielt, da durch die geringere zur Verfügung stehende Zeit die Lösung der Zuordnungsprobleme „Ladegefäße zu Eingangstore“ vorzeitig abgebrochen werden. Am größten sind die Rechenzeiten für $maxPermut = 10$ und 1000 bzw. 3600 Sekunden für die *maxZeit*-Werte. Auch hier weichen deren Rechenzeiten kaum voneinander ab, da für die meisten Zuordnungsprobleme „Ladegefäße zu Eingangstore“ bei einer Anzahl von 10 Zufallsstartlösungen maximal 1000 Sekunden benötigt werden. Gleiches ist bei $maxPermut = 5$ zu beobachten.

Zusammenfassend sollte der Parameterwert für *maxZeit* ausreichend groß sein, da mit den Werten 1 und 10 Sekunden keine guten Lösungen für das Zuordnungsproblem „Ladegefäße zu Eingangstore“ berechnet werden konnte und somit schlechte Servicegrade für die komplette Linienverkehrsplanung verursacht wurden. Damit auch die Rechenzeiten für die komplette Linienverkehrsplanung nicht zu groß werden, dürfen die *maxZeit*-Werte nur bis zu einer bestimmten Grenze gehen. Hier hat sich $maxZeit = 100$ als vernünftig erwiesen. Hinsichtlich *maxPermut* kann es von Vorteil sein, Werte größer als 0 zu wählen. Dabei sei auf den besten Servicegrad (95,65%) für den Datensatz Europa hingewiesen, der mit der Parameterkombination $maxZeit = 100$ und $maxPermut = 10$ erreicht werden konnte. Die *alpha*-Werte zwischen 0,07 und 0,10 sind für den Datensatz Europa am geeignetsten.

5.5. Zusammenfassung für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen

In den vorhergehenden Abschnitten wurde für die Problemstellung Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen unterschiedliche Lösungsvarianten wie bei der Unterscheidung zwischen *einem Tag* und *mehreren Tagen*, Diskretisierung der Zeit, Identifizierung von ungeeigneten Mengen oder Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren untersucht. Zur Bewertung der Lösungsvarianten in den ersten drei Untersuchungsbereichen kam der Datensatz Frankreich zum Einsatz, deren Ergebnisse bezüglich der Parametereinstellungen auf den Datensatz Europa übertragbar sind. Da im Datensatz Europa zusätzlich Standorteigenschaften wie Anzahl Eingangstore und Umschlagkapazität an einem Eingangstor vorliegen, wurde dieser für die Bewertung der unterschiedlichen Lösungsvarianten im Untersuchungsbereich Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren herangezogen. Als Bewertungsmaßstab war der Servicegrad, der sich aus der Durchführung der kompletten Linienverkehrsplanung ergibt, die wichtigste Kenngröße. Weiterhin wurde die Rechenzeit zur Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Bei der Unterscheidung zwischen *einem Tag* und *mehreren Tagen* (siehe Abschnitt 5.3.1) konnte mit der ersten Variante gegenüber der zweiten der Servicegrad um insgesamt ca. 2% verbessert werden. Deshalb wurden nur noch Ergebnisse mit der Variante *ein Tag* berücksichtigt. Im Untersuchungsbereich Diskretisierung der Zeit (siehe Abschnitt 5.3.2) wurden in Abhängigkeit der Intervallgröße Zeiträume aufgeteilt, um eine genauere Planung durchzuführen. Mit Intervallgrößen 1 und 5 Minuten konnten sehr gute Servicegrade berechnet werden, wobei mit 5 Minuten deutlich geringere Rechenzeiten für die Linienverkehrsplanung erreichbar sind. Um jedoch die besten Servicegrade erhalten zu können, wurde mit einer 1 Minute weitergearbeitet. Bei der Identifizierung von ungeeigneten Mengen (vergleiche dazu Abschnitt 5.3.3) ging es um das Erreichen einer besseren Auslastung der Ladegefäße mit pünktlich geladenen Mengen. Da die besten Servicegrade durch die Kombination *alpha*-Wert am Versanddepot und Maximierung der Auslastung am Hub erreicht wurden, setzen wir diese auch für weitere Untersuchungen ein.

Der letzte Untersuchungsbereich war die Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren (siehe Abschnitt 5.4). Hierbei standen mit den Verfahren 1 und 2 zwei alternative Vorgehensweisen zur Verfügung. Da im zweiten Verfahren bei Berechnung des Verfügbarkeitszeitpunktes eines Eingangstores für ein Ladegefäß eine genauere Berücksichtigung der geladenen Mengen aller Ladegefäße erfolgt, die am selben Standort entladen werden, hatte dieses Verfahren hinsichtlich des Servicegrades gegenüber dem anderen deutliche Vorteile. Im letzteren Verfahren müssen in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameterwerte ca. 400 solcher Zuordnungsprobleme für eine komplette Linienverkehrsplanung gelöst werden. Um nun die Rechenzeit der kompletten Linienverkehrsplanung nicht zu groß werden zu lassen, war eine geringe Rechenzeit für die Lösung eines einzelnen Zuordnungsproblems erforderlich. Zunächst wurde versucht, diese Zuordnungsprobleme unter Berücksichtigung von Parametertests und symmetrie-brechenden Restriktionen im mathematischen Modell mit CPLEX zulösen. Da jedoch die Rechenzeiten für die Testinstanzen zu groß waren, wurden als Alternative lokale Suchmethoden eingesetzt. Mit dem Verfahren 6 im Verfahren 2 konnte der Servicegrad um ca. 2% gegenüber der Vorgehensweise 1 verbessert werden.

In den Tabellen 5.1 und 5.2 wurden für die Beispieldatensätze Frankreich und Europa mit 98,93% und 98,58% obere Schranken für den Servicegrad angegeben. Die besten erzielten Servicegrade betragen für den Datensatz Frankreich 96,9% bzw. für den Datensatz Europa 95,65%. Der erzielte Servicegrad für den Datensatz Frankreich ist im Vergleich zum Datensatz Europa deshalb deutlich besser, da für diesen Datensatz keine Standorteigenschaften wie Anzahl Eingangstore oder Umschlagkapazitäten an den Eingangstoren vorliegen. Da weiterhin die oberen Schranken nur auf Basis der Berücksichtigung der Einrollverteilung am Versanddepot berechnet wurden und somit schwache obere Schranken darstellen, sind die besten erzielten Servicegrade mit weniger als 3% Abstand zu den oberen Schranken gut.

Der erzielte Servicegrad ist nicht unmittelbar mit in der Praxis ermittelten Service-

gradwerten vergleichbar, da hier lediglich eine Planung und keine Steuerung der Linienverkehre durchgeführt wird. Daher werden z.B. keine Störereignisse berücksichtigt. Außerdem ist das hier zugrunde gelegte Modell in einigen Aspekten (in Übereinstimmung mit den Anforderungen der Fallstudien) bewusst einschränkender ausgeführt, während in der praktischen Realisierung harte Restriktionen nicht immer eingehalten werden. Wenn beispielsweise durch das Verfahren ermittelte Laderaster zu einer Ausschöpfung der Ladegefäßkapazität führen, können in der Praxis gegebenenfalls immer noch Mengen zugeladen werden (etwa aufgrund von Abweichungen zwischen Planungs- und Steuerungsdaten hinsichtlich Volumen, Gewicht oder Anzahl von Paketen, Paletten und Dokumenten).

Die benötigten Rechenzeiten für die besten Servicegrade liegen beim Datensatz Frankreich bei ca. 13 Sekunden und beim Datensatz Europa bei ca. 1500 Sekunden (25 Minuten). Die deutlich größere Rechenzeit beim Datensatz Europa ist auf die Größe des Datensatzes und auf die Optimierung der Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren zurückzuführen.

5.6. Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen

Nachdem die zu transportierenden Mengen zu Ladegefäßen gebündelt wurden, können im Folgenden die Ladegefäße zu Fahrzeugladungen kombiniert werden. Vorausgesetzt, dass alle Fahrzeuge zwei Ladegefäße transportieren können, werden nur Hauptläufe mit mindestens zwei Ladegefäßen betrachtet. (Bei Hauptläufen mit nur einem Ladegefäß besteht kein Entscheidungsproblem.) Im Folgenden wird ein Modell entwickelt, das jeweils einen Hauptlauf betrachtet und sich vom Modell im Abschnitt 4.2.5 vor allem durch eine Zuordnungskostenmatrix in der Zielfunktion unterscheidet. Durch die Berücksichtigung von Zuordnungskosten wird nicht nur die Anzahl der Fahrzeugtransporte minimiert, sondern es werden auch die Kombinationen von Ladegefäßen gegenüber alternativen Kombinationen bevorzugt, deren Abfahrtszeitpunkte näher beieinander liegen.

Der wichtigste Ausgangspunkt bei der Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen sind die Zeitfenster der Ladegefäße. Der früheste Abfahrtszeitpunkt eines Ladegefäßes ergibt sich aus dem Maximum der frühesten Abfahrtszeitpunkte der geladenen Mengen. Der späteste Abfahrtszeitpunkt ist der Beginn der Entladung abzüglich die Fahrzeit vom Start- zum Zielstandort. Hat ein Ladegefäß nur verspätete Mengen geladen, dann ist das Zeitfenster beliebig, d.h., die untere bzw. obere Schranke beträgt 0:00 Uhr bzw. 23:59 Uhr.

5.6.1. Mathematisches Modell

Einen Hauptlauf von einem Versanddepot oder Hub zu einem Hub oder Empfangsdepot betrachtend, kann die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen als ein lineares Zuordnungsproblem formuliert werden und ist somit aus komplexitätstheoretischer Sicht ein einfaches Problem (Domschke & Drexl, 2007, S. 13ff). Dazu werden für das Modell in Anlehnung an Abschnitt 4.2.5 zunächst folgende Konstanten definiert:

- F : maximale Anzahl zur Verfügung stehender Fahrzeugtransporte (= Fahrzeuge),
- LG : Anzahl zu transportierender Ladegefäße,
- $Zuglaenge$: zugelassene Zuglänge (Kapazität) eines Fahrzeugs und
- $ZOK_{i,j}, i, j \in |LG|$: Zuordnungskosten für die Kombination von Ladegefäßen.

Die maximale Anzahl zur Verfügung stehender Fahrzeugtransporte F ist gleich der Anzahl zur transportierender Ladegefäße LG. Die Zuordnungskostenmatrix $ZOK_{i,j}$ hängt vom Abstand der beiden frühesten Abfahrtszeitpunkte ab. Überschneiden sich die Zeitfenster zweier betrachteter Ladegefäße nicht, dann ist auch eine Kombination dieser beiden Ladegefäße nicht möglich. Dies wird in der Zuordnungsmatrix mit dem Wert -1 gekennzeichnet. Ladegefäße, die miteinander kombiniert werden können, haben mindestens die Zuordnungskosten 0. Da hier zur Lösung der Problemstellung nur ein Hauptlauf betrachtet wird und alle Fahrzeuge, die auf dem selben Hauptlauf fahren, die gleiche zugelassene Zuglänge (Kapazität) haben, braucht für $Zuglaenge$ wie im Abschnitt 4.2.5 kein weiterer Index mitgeführt werden.

Als Entscheidungsvariablen werden definiert:

- $MAXanzF$: benötigte Anzahl von Fahrzeugtransporten,
- $anzFEinsp$: Einsparungen der Anzahl Fahrzeugtransporte gegenüber der maximal möglichen Anzahl von Fahrzeugtransporten und
- $ZOJaNein_{i,j}, i, j \in |LG|$: Zuordnungsmatrix mit der Information, ob zwei Ladegefäße i und j miteinander (1) oder nicht miteinander kombiniert (0) werden.

Aufbauend auf den definierten Konstanten und Variablen kann folgendes LP-Modell formuliert werden:

$$\min MAXanzF \tag{5.15}$$

$$\sum_{i \in |LG|} ZOJaNein_{i,i} = 0 \tag{5.16}$$

$$ZOJaNein_{i,i} * ZOK_{i,j} \geq 0 \qquad (i,j \in |LG|) \tag{5.17}$$

$$\sum_{j \in |LG|} ZOJaNein_{i,j} \leq Zuglaenge - 1 \qquad (i \in |LG|) \tag{5.18}$$

$$ZOJaNein_{i,j} = ZOJaNein_{j,i} \qquad (i,j \in |LG|) \tag{5.19}$$

$$\sum_{i \in |LG|} \sum_{j \in |LG|, j>i} ZOJaNein_{i,j} = anzFEinsp \tag{5.20}$$

$$MAXanzF = F - anzFEinsp \tag{5.21}$$

$$ZOJaNein_{i,j} \in \{0,1\} \qquad (i,j \in |LG|) \tag{5.22}$$

Mit der Zielfunktion (5.15) wird die Anzahl benötigter Fahrzeugtransporte minimiert. Die Restriktion (5.16) stellt sicher, dass ein Ladegefäß nicht sich selbst zugeordnet wird. Mit der Restriktion (5.17) wird ein Ladegefäß nur dann zu einem anderen Ladegefäß zugeordnet, wenn die zugehörigen Zuordnungskosten größer -1 sind. Die Einhaltung der Zuglänge (Kapazität) eines Fahrzeugs garantiert die Restriktion (5.18). Die Restriktion (5.19) ermöglicht die Konsistenz in den Zeilen und Spalten der Entscheidungsmatrix $ZOJaNein_{j,i}$. Für die Berechnung der Einsparungen gegenüber der maximal möglichen Anzahl von Fahrzeugtransporten wird die Restriktion (5.20) eingesetzt. Schließlich wird mit der Gleichung (5.21) die Anzahl benötigter Fahrzeugtransporte berechnet.

Die im obigen Modell enthaltene Restriktion (5.16) ist eigentlich nicht notwendig, da das Zuordnungsverbot schon mit dem Wert -1 in der Zuordnungsmatrix garantiert wird. Jedoch wird mit dieser Restriktion der Lösungsraum für CPLEX eingeschränkt und somit kann schneller eine Lösung berechnet werden.

5.6.2. Lösungsverfahren und Tests

Für eine komplette Linienverkehrsplanung müssen für den Datensatz Frankreich ca. 220 und für den Datensatz Europa ca. 800 solcher linearer Zuordnungsprobleme gelöst werden. Die Problemgrößen variieren zwischen 2 und 40 Ladegefäßen. Zur Lösung der linearen Zuordnungsprobleme wird CPLEX eingesetzt. Dabei werden bezüglich der Parametereinstellungen die Standardeinstellungen von CPLEX übernommen, da hinsichtlich der Rechenzeit CPLEX mit den Standardeinstellungen für die vorliegenden Problemgrößen erwartungsgemäß keine Schwierigkeiten hat. Die durchschnittlich bzw. die maximal benötigte Rechenzeit für die Lösung einer Problemstellung liegt bei etwa 0,001 Sekun-

den bzw. 0,031 Sekunden. Das Lösungsvorgehen für die Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen ist im Verfahren 7 zusammengefasst.

Verfahren 7 Pseudocode des Verfahrens Kombination der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen

```
for all Hauptläufe mit mehr als einem Ladegefäß do
  1 Ermittlung der Zuordnungskosten
   Berücksichtigung der Zeitfenster
  2 Löse lineares Zuordnungsproblem mit CPLEX
   Minimierung der Anzahl Fahrzeugtransporte
end for
```

Die berechnete Anzahl der Fahrzeugtransporte hängt von der ermittelten Lösung für das erste Teilproblem Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßladungen ab. Für unterschiedliche Lösungen für das erste Teilproblem kann die Anzahl der Fahrzeugtransporte verschieden sein. Beispielsweise wurde für den Datensatz Frankreich mit 801 die kleinste Anzahl von Fahrzeugtransporten ermittelt (bei einem Servicegrad von 82,9%). Dahingegen betrug für den besten ermittelten Servicegrad von 96,9% die Anzahl Fahrzeugtransporte 867. Für den Datensatz Europa sind die Ergebnisse analog: 2667 als die niedrigste Anzahl von Fahrzeugtransporten bei einem Servicegrad von 80,48% und 2915 Fahrzeugtransporte für den besten ermittelten Servicegrad.

Die Abbildung 5.24 (Zahlenwerte in der Tabelle A.3) veranschaulicht die Abhängigkeit zwischen der Anzahl Fahrzeugtransporte und dem Servicegrad: Umso höher der Servicegrad ist, desto höher ist auch die benötigte Anzahl von Fahrzeugtransporten. Die Ursache hierfür liegt im geringeren Anteil von pünktlich weiter transportierten Mengen bei einem kleineren Servicegrad. Somit besitzen zum einen die Zeitfenster der Ladegefäße, die pünktlich geladene Mengen haben, im Vergleich zu einem größeren Servicegrad größere Abstände zwischen den frühesten und spätesten Abfahrtszeitpunkten. Zum anderen existieren bei einem kleineren Servicegrad mehr Ladegefäße, die nur verspätete Mengen geladen haben. In diesem Fall ist das Zeitfenster der jeweiligen Ladegefäße beliebig. Daher ist bei größeren bzw. beliebigen Zeitfenstern von Ladegefäßen die Kombinierbarkeit der Ladegefäße untereinander leichter.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Kombination Zuordnung der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen für die in dieser Arbeit zu behandelnden Problemstellungen keine Schwierigkeit darstellt. Es konnte ein mathematisches Modell verwendet werden, mit dem in kurzer Zeit optimale Ergebnisse erreicht wurden. Die Ergebnisse zeigen auch bezüglich einer Linienverkehrsplanung die deutliche Abhängigkeit zwischen dem Servicegrad und der Anzahl benötigter Fahrzeugtransporte. Je größer der Servicegrad ist, desto größer ist auch die benötigte Anzahl von Fahrzeugtransporten. Die Anzahl Fahrzeugtransporte ist eine wichtige Einflussgröße für die Umlaufplanung der Fahrzeuge. Hierbei ist davon auszugehen, dass bei einer größeren Anzahl von Fahrzeugtransporten auch mehr Fahrzeuge für die Linienverkehrsplanung benötigt werden, was wiederum Einfluss auf die Kosten hat.

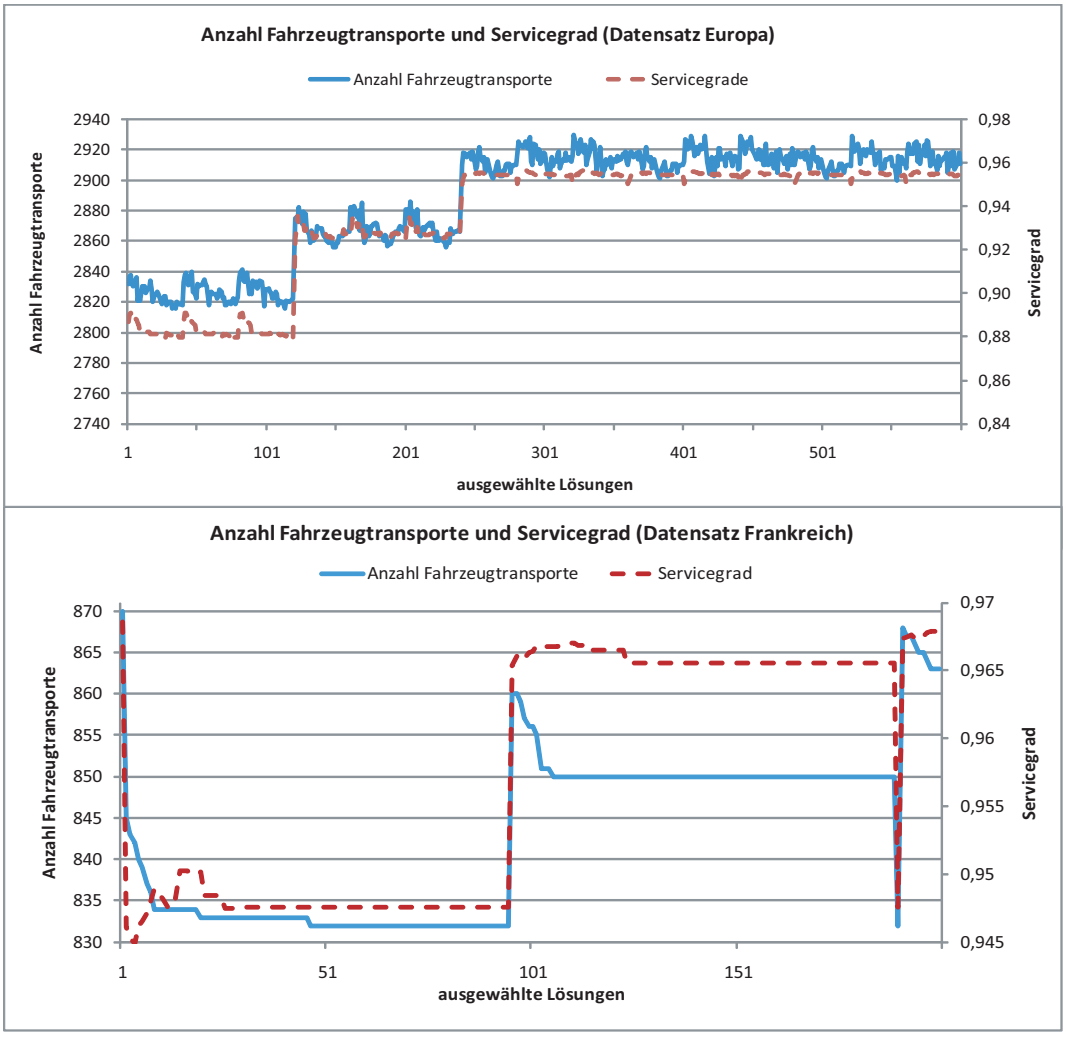

Abbildung 5.24.: Vergleich von Anzahl Fahrzeugtransporte und Servicegrad für die Datensätze Europa und Frankreich (Zahlenwerte in der Tabelle A.3)

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens für einen Teilbereich der Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste. Die grundsätzlichen Vorgaben und Ziele entstammen den praktischen Erfordernissen international (Europa) tätiger Logistikdienstleister.

Das betrachtete Modell zeichnet sich durch die weitgehende Berücksichtigung verkomplizierender Merkmale der realen Problemstellung aus (etwa spezifische Einrollverteilungen und Standortkapazitäten einschließlich der Verfügbarkeit von Eingangstoren).

Die wichtigsten im Modell zu treffenden Entscheidungen sind die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßen und die Bündelung der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen in Verbindung mit der Festlegung von Abfahrtszeiten. Die zweite Entscheidung baut auf der ersten auf. Im Teilmodell für die Konsolidierung der Mengen zu Ladegefäßen wird zunächst festgelegt, welchen Ladegefäßen die Transportverbindungen der einzelnen Relationen zugeordnet werden. Anschließend können die sich daraus ergebenden Abfahrts- und Ankunftszeiten der Ladegefäße bestimmt werden. Als nächstes erfolgt die Ermittlung des Beginns der Entladung am Eingangstor und der Umschlagdauer für die zu entladenen Mengen eines Ladegefäßes. Daraus resultiert, wann welche Mengen zum Weitertransport zur Verfügung stehen. In diesem Teilmodell soll der Servicegrad, der den Anteil der am Empfangsdepot rechtzeitig angekommenen Mengen der einzelnen Relationen angibt, maximiert werden. Kommen Einheiten am Empfangsdepot nicht pünktlich an, so gelten sie als verspätet.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Lösung des ersten Modells soll im zweiten Teilmodell die Anzahl der Fahrzeugtransporte minimiert werden. Dazu sind bei der Festlegung der Kombinierbarkeit von Ladegefäßen Informationen wie Abfahrtszeiten und der Beginn der Entladung eines Ladegefäßes sowie die Fahrzeit für die zurückzulegende Wegstrecke wichtig.

Da für KEP-Dienstleister die Kundenzufriedenheit als wichtig betrachtet wird, ist die Erreichung eines möglichst hohen Servicegrades als Hauptziel vorgegeben. Dementsprechend wird zunächst das erste Teilproblem gelöst (mit Servicegradzielsetzung), wodurch gegebenenfalls eine höhere Anzahl von Fahrzeugtransporten in Kauf genommen wird.

Für das erste Teilproblem wurde eine regelbasierte Konstruktionsheuristik entwickelt, die auf einer Zuordnung der einzelnen Transportverbindungen zu Stufen basiert. Diese Vorgehensweise berücksichtigt, dass auf der zweiten bzw. höher liegenden Stufe nur das pünktlich weitergeleitet werden kann, was auf den vorhergehenden schon pünktlich transportiert wurde. Um das Verfahren in seiner Lösungsqualität zu verbessern, wurden unterschiedliche Problemfelder wie Unterscheidung zwischen einem Tag und mehreren Tagen, Diskretisierung der Zeit oder Zuordnung von Ladegefäßen zu Eingangstoren untersucht. Die Tests zeigten, dass für die Sendungsdaten europaweit tätiger KEP-Dienstleister in einer geringen Rechenzeit (wenigen Sekunden bis wenigen Minuten) Servicegrade von größer als 95% erreicht werden können.

Die auf das erste Teilproblem aufbauende Problemstellung Bündelung der Ladegefäße zu Fahrzeugladungen konnten mit CPLEX in geringer Rechenzeit (Rechenzeit für alle linearen Zuordnungsprobleme aufsummiert ≤ 1 Minute) optimal gelöst werden.

Mit Blick auf Erfahrungen aus der Praxis, wo mit einem Planungstool für eine Standortplanung inklusive Linienverkehrsplanung unterschiedliche Szenarien untersucht werden, sind die erzielten Rechenzeiten alleine für die Linienverkehrsplanung sehr gut. Somit wird dem Planer die Möglichkeit gegeben, in kurzer Zeit unterschiedliche Szenarien zu erproben.

6.2. Ausblick

In der Zukunft kann aufbauend auf den in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse das vierte Teilproblem der Linienverkehrsplanung, die Bestimmung der genauen Touren der Fahrzeuge mit Identifizierung von geschlossenen Umläufen, Begegnungsverkehren, One-Way-Fahrten und Mehrtagesumläufen, angegangen werden. Unter Einhaltung der für die Ladegefäße ermittelten Abfahrtszeitpunkte sind unter Berücksichtigung der Fahrereinsatzplanung so wenig wie möglich Fahrzeuge einzuplanen, damit die Kosten des Verkehrsplanes gering bleiben.

Ein weiteres interessantes Lösungsverfahren ist die Dekomposition der Problemstellung nach den zwei Entscheidungsvariablen: Bestimmung der Routen für die Relationen und die Bewegung der Fahrzeuge. Hier liegt eine Iteration zwischen der Auswahl der Fahrzeugrouten und der Verlauf der Relationen. Dadurch beeinflusst die Lösung des einen Problems die Lösung des anderen Problems. Weiterhin wird durch dieses iterative Vorgehen die Problemgröße Schritt für Schritt reduziert (siehe Abschnitt 3.4). Die hierfür in der Literatur anzutreffenden Lösungsstrategien konnten jedoch vor allem wegen der benötigten Rechenzeit nicht überzeugen. Schließlich fand keine Berücksichtigung der Konsolidierung der Mengen auf Basis von Ladegefäßen statt. Trotzdem sollten auch hierfür Anstrengungen unternommen werden, diesen Lösungsweg für die hier besprochene Problemstellung der KEP-Dienste zu untersuchen.

Die in dieser Arbeit behandelte Problemstellung ist eine deterministische Formulierung,

d.h., sie setzt das Wissen über wichtige Parameter für eine komplette Planungszeit voraus, z.B. für eine zukünftige Periode, für die die Planung jetzt durchgeführt wird (Planungshorizont). Im Gegensatz dazu untersuchen Lium et al. (2009) die durch Berücksichtigung von stochastischen Elementen verursachten Auswirkungen auf die Planung von allgemeinen SND-Problemen. Hierbei wird die Nachfrage von Gütern im Empfangsdepot stochastisch ermittelt, d.h., die Nachfrage unterliegt einer Unsicherheit und wird somit durch Zufallsvariablen mit bekannter Zufallsverteilung ermittelt. Die Auswirkungen stochastischer Elemente in der Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste bietet ein interessantes Feld für neue Forschungsarbeiten.

Schließlich können in der Zukunft einerseits Verfahrensverbesserungen hinsichtlich weiterer Steigerungen untersucht werden (etwa durch Anwendung von Metaheuristiken). Andererseits können in einer erweiterten Problemmodellierung den Möglichkeiten der Praxis noch besser Rechnung getragen werden (etwa hinsichtlich einer Flexibilisierung von Zeitfenstern).

7. Literaturverzeichnis

Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). *Network Flows.* Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

Armacost, A. P., Barnhart, C., & Ware, K. A. (2002). Composite variable formulations for express shipment service network design. *Transportation Science*, 36 (1): 1 – 20.

Armacost, A. P., Barnhart, C., & Ware, K. A. (2004). UPS optimizes its air network. *Interfaces*, 34 (1): 15 – 25.

Arnold, D. (2004). Außerbetriebliche Logistik. In Arnold et al. (2004), (pp. C3 – 1 – C3 – 11).

Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., & Tempelmeier, H. (Eds.). (2004). *Handbuch Logistik* (2. ed.)., Berlin. Springer.

Ballou, R. H. (2004). *Business Logistics/Supply Chain Management. Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain.* New Jersey: Prentice Hall.

Barnhart, C. & Kim, D. (1999). Transportation service network design: Models and algorithms. In Wilson, N. H. (Ed.), *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, (pp. 471: 259 – 283)., Berlin. Springer.

Barnhart, C., Krishnan, N., Kim, D., & Ware, K. (2002). Network design for express shipment delivery. *Computational Optimization and Applications*, 21 (3): 239 – 262.

Barnhart, C. & Schneur, R. R. (1996). Air network design for express shipment service. *Operations Research*, 44 (6): 852 – 863.

Barnhart, C. & Shen, S. (2005). Logistics service network design for time-critical delivery. *Lecture Notes in Computer Science*, 3616: 86 – 105.

Büdenbender, K., Grünert, T., & Sebastian, H.-J. (2000). A hybrid tabu search/branch-and-bound algorithm for the direct flight network design problem. *Transportation Science*, 34 (4): 364 – 380.

Beumer, C. (2004). Sortier- und Verteilsysteme. In Arnold et al. (2004), (pp. C2 – 78 – C2 – 88).

Blochmann, F. O. (1994). *Internationale Kurier- und Expreßdienste.* Landsberg/Lech: Moderne Industrie.

Blum, C. & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35 (3): 268 – 208.

Bock, S. (2004). *Echtzeitfähige Steuerung von Speditionsnetzwerken*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Bretzke, W.-R. (1997). Logistiknetzwerke. In Bloech, J. & Ihde, G. B. (Eds.), *Vahlens Großes Logistiklexikon*, (pp. 626 – 627)., München. Vahlen.

Bretzke, W.-R. (2008). *Logistische Netzwerke*. Berlin: Springer.

Buchholz, J., Clausen, U., & Vastag, A. (1998). *Handbuch der Verkehrslogistik*. Berlin: Springer.

Cardeneo, A. (2004). Straßengüterverkehr, Speditionen, Logistikdienstleistungen. In Arnold et al. (2004), (pp. C3 – 1 – C3 – 11).

Ceselli, A., Gatto, M., Lübbecke, M. E., Nunkesser, M., & Schilling, H. (2008). Optimizing the cargo express service of swiss federal railways. *Transportation Science*, 42 (4): 450 – 465.

Cheung, R. K. & Muralidharan, B. (2000). Dynamic routing for priority shipments in LTL service networks. *Transportation Science*, 34 (1): 86 – 98.

Chmielewski, A. (2007). *Entwicklung optimaler Torbelegungspläne in Stückgutspeditionsanlagen*. Dortmund: Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Dissertation.

Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). Maritime transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14: 189 – 284.

Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004). Ship routing and scheduling: status and perspectives. *Transportation Science*, 38 (1): 1 – 18.

Clausen, U., Bernsmann, A., & Heinrichmeyer, H. (2005). Entwicklungen und Erfolgsfaktoren für KEP-Dienste in Europa. In *Jahrbuch der Logistik 2005*, (pp. 28 – 30). Fraunhofer Publica.

Clausen, U., Goerke, M., & Heimann, B. (2004). Nur gemeinsam überzeugend - inner- und außerbetriebliche Anforderungen einer Umschlaganlage. *Deutsche Hebe- und Fördertechnik, Anniversary Edition*, 6: 158 – 160.

Cordeau, J.-F., Toth, P., & Vigo, D. (1998). A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*, 32 (4): 380 – 404.

Crainic, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122: 272 – 288.

Crainic, T. G. (2003). Long-haul freight transportation. In Hall, R. W. (Ed.), *Handbook of Transportation Science*, (pp. 56: 451 – 516)., New York. Springer, 2. Auflage.

Crainic, T. G. & Kim, K. H. (2007). Intermodal transportation. In Barnhart, C. & Laporte, G. (Eds.), *Transportation*, Handbooks in Operations Research and Management, (pp. 14: 467 – 537). North-Holland, Amsterdam.

Crainic, T. G. & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97 (3): 409 – 438.

Dantzig, G. B. & Wolfe, P. (1960). The decomposition principle for linear programs. *Operations Research*, 8 (1): 101 – 111.

Degraeve, Z., Gochet, W., & Jans, R. (2002). Alternative formulations for a layout problem in the fashion industry. *European Journal of Operational Research*, 143 (1): 80 – 93.

Ditsch, W. (Ed.). (1987). *Transportmärkte: Kurier-, Express- und Paketdienste*, Hamburg. Spiegel.

Domschke, W. & Drexl, A. (2007). *Einführung in Operations Research* (7. ed.). Berlin: Springer.

Eisenkopf, A. (2004). Externe Kosten des Verkehrs. In Arnold et al. (2004), (pp. D4 – 11 – D4 – 24).

Farvolden, J. M. & Powell, W. B. (1994). Subgradient methods for the service network design problem. *Transportation Science*, 28 (3): 256 – 272.

Farvolden, J. M., Powell, W. B., & Lustig, I. J. (1993). A primal partitioning solution for the arc-chain formulation of a multicommodity network flow problem. *Operations Research*, 41 (4): 669 – 693.

Fink, A. (2000). *Software-Wiederverwendung bei der Lösung von Planungsproblemen mittels Meta-Heuristiken.* Aachen: Shaker-Verlag.

Fink, A., Schneidereit, G., & Voß, S. (2005). *Grundlagen der Wirtschaftsinformatik.* Heidelberg: Physica-Verlag, 2. Auflage.

Fleischmann, B. (1998). Design of freight traffic networks. In Fleischmann, B., van Nunen, J. A. E. E., Speranza, M. G., & Stähly, P. (Eds.), *Advances in Distribution Logistics* (1. ed.)., (pp. 55 – 83). Springer, Berlin.

Fleischmann, B. (2004a). Begriffliche Grundlagen. In Arnold et al. (2004), (pp. A1 – 3 – A1 – 12).

Fleischmann, B. (2004b). Systeme der Transportlogistik. In Arnold et al. (2004), (pp. A1 – 13 – A1 – 19).

Flender, H., Trippner, K., & Schulze, I. (2006). Strategien zum Aufbau integrierter Transportdienstleistungen in China. *Logistik für Unternehmen*, 7/8: 42 – 45.

Garey, M. R. & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness.* New York: Freeman.

Gast, O. & Pintsch, S. (2000). Globale Seeverkehrslogistik. In Klaus & Krieger (2000), (pp. 167 – 175).

Golden, B., Raghavan, S., & Wasil, E. (Eds.). (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges.* Washington, DC: Springer.

Gudehus, T. (2005). *Logistik : Grundlagen, Strategien, Anwendungen* (3 ed.). Berlin: Springer.

Gutthal, S. (1999). *Chancen und Risiken des Expressgutmarktes.* Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Haas, H.-D. & Neumair, S.-M. (2005). *Internationale Wirtschaft.* München: Oldenbourg.

Hector, B. (1987). Aus der Entstehungsgeschichte der Kurier-, Paket- und Expreßdienste. In Ditsch (1987), (pp. 8 – 21).

Helmke, C. (2006). *Der Markt für Paket- und Expressdienste.* Kassel: Universität Kassel KOBRA, Dissertation.

Höppner, J. (2000). Logistik in Europa. In Klaus & Krieger (2000), (pp. 133 – 138).

Ihde, G. B. (2001). *Transport, Verkehr, Logistik* (3 ed.). München: Franz Vahlen.

ILOG (2006). ILOG CPLEX 10.0 parameters.

ILOG (2007). Market-leading optimization technology. `http://www.ilog.com/download/docs/DS-CPLEX.pdf` zuletzt besucht am 26.03.2009.

ILOG (2009a). Corporate profile. `http://www.ilog.com/corporate/` zuletzt besucht am 26.03.2009.

ILOG (2009b). ILOG CPLEX performance tuning for linear programs. `http://www.ilog.com/products/optimization/info/lpperformance.cfm` zuletzt besucht am 01.04.2009.

ILOG (2009c). The world's leading mathematical programming optimizers. `http://www.ilog.com/products/cplex/index.cfm` zuletzt besucht 26.03.2009.

Irnich, S. (2002). *Netzwerk-Design für zweistufige Transportsysteme und ein Branch-and-Price-Verfahren für das gemischte Direkt- und Hubflugproblem.* Aachen: RWTH Aachen, Dissertation.

Isermann, H. (2004). Märkte des Straßengüterverkehrs. In Arnold et al. (2004), (pp. D2 – 8 – D2 – 10).

Jain, V. & Grossman, I. E. (2001). Algorithms for hybrid MILP/CP models for a class of optimization problems. *Journal on Computing*, 13 (4): 258 – 276.

Jans, R. (2006). Solving lotsizing problems on parallel identical machines using symmetry breaking constraints. *Erasmus Research Institute of Management, Rotterdam, Netherlands*, Working paper.

Jarrah, A. I., Johnson, E., & Neubert, L. C. (2009). Large-scale, less-than-truckload service network design. *Operations Research*, 57 (3): 609 – 625.

Kühnel, A. & Leibbrandt, S. (2009). *Visual Basic 2008: Das umfassende Handbuch* (4 ed.). Bonn: Galileo Press.

Kim, D., Barnhart, C., Ware, K., & Reinhardt, G. (1999). Multimodal express package delivery: A service network design application. *Transportation Science*, 33 (4): 391 – 407.

Klaus, P. & Krieger, W. (Eds.). (2000). *Gabler Lexikon Logistik*. Gabler, Wiesbaden.

Kleeberg, L. (2000). *Management von Transportnetzwerken : ein modellgestützter Führungsansatz zur Planung und Steuerung zukunftsorientierter Gütertransportsysteme für Stück- und Kleinguttransporte im kombinierten Straßen-/Schienengüterverkehr*. Göttingen: Duehrkohp & Radicke.

Lehmann, A. P. (1989). *Dienstleistungsmanagement zwischen industriell - orientierter Produktion und zwischenmenschlicher Interaktion : Reflexe in der Versicherung*. IVW-Schriftenreihe (23).

Lium, A.-G., Crainic, T. G., & Wallace, S. W. (2009). A study of demand stochasticity in service network design. *Transportation Science*, 43 (2): 144 – 157.

Läpple, D. (1993). *Güterverkehr, Logistik und Umwelt*. Berlin: Edition Sigma.

Magnanti, T. L. & Wong, R. T. (1984). Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation Science*, 18 (1): 1 – 55.

Manner-Romberg, H. (1995). *KEP-Markt : Kurier, Express, Paket; Wegweiser und Marktübersicht für den schnellen Versand*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.

Mayer, G. (2001). *Strategische Logistikplanung von Hub & Spoke-Systemen*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

o.V. (09.06.2007a). Der Güterverkehr wird sich bis 2050 verdoppeln. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, Nr. 131: S. 12.

o.V. (11.11.2008a). Die Post gibt sich UPS und Fedex geschlagen. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, Nr. 264: S. 15.

o.V. (2001a). Schematische Darstellung des KEP-Marktes ab 1998. `http://www.m-r-u.de/` zuletzt besucht am 07.11.2008.

o.V. (2001b). Schematische Darstellung des KEP-Marktes bis 1998. `http://www.m-r-u.de/` zuletzt besucht 07.11.2008.

o.V. (2007b). *Verkehr in Zahlen 2007/2008*. Hamburg: Bundesministerium für Verkehr, DVV Media Group GmbH.

o.V. (2007c). Wachstumstrend im europäischen KEP-Markt hält an. `http://www.schenker.de` zuletzt besucht am 16.01.2008.

o.V. (2008b). Packages over 70 lbs. `http://www.ups.com` zuletzt besucht am 21.01.2008.

Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008a). A survey on pickup and delivery problems, Part I: Transportation between customers and depot . *Journal für Betriebswirtschaft*, 58 (1): 21 – 51.

Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008b). A survey on pickup and delivery problems, Part II: Transportation between pickup and delivery locations. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58 (2): 81 – 117.

Pedersen, M. B., Crainic, T. G., & Madsen, O. B. G. (2009). Models and tabu search metaheuristics for service network design with asset-balance requirements. *Transportation Science*, 43 (2): 158 – 177.

Pfohl, H. C. (2004a). *Logistikmanagement* (2 ed.). Berlin: Springer.

Pfohl, H. C. (2004b). *Logistiksysteme* (7 ed.). Berlin: Springer.

Powell, W. B. & Sheffi, Y. (1983). The load-planning problem of motor carriers: problem description and a proposed solution approach. *Transportation Research A: Policy and Practice*, 17 (6): 471 – 480.

Prologos (2009). Prodisi CEP. `http://www.prologos.de/` zuletzt besucht am 06.04.2009.

Rumpf, C. (1997). *Qualitätsmanagement speditioneller Dienstleistungen*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.

Schieck, A. (2008). *Internationale Logistik*. München: Oldenbourg.

Schönershoven, T. (2008). Ein Blick über die Grenzen. *Verkehrsrundschau Spezial KEP*, 2: 29 – 31.

Scholl, A. (2004). Grundlagen der modellgestützten Planung. In Arnold et al. (2004), (pp. A2 – 1 – A2 – 9).

Schumacher, W. (1987). Reaktionen der Speditionen auf veränderte Marktstrukturen im Express- und Paketbereich - neue Dienstleistungsformen im Kleinguttransport. In Ditsch (1987), (pp. 82 – 91).

Sherali, H. D. & Smith, J. C. (2001). Improving discrete model representations via symmetry considerations. *Management Science*, 47 (10): 1396 – 1407.

Stadtler, H. (2004). Hierarchische Systeme der Produktionsplanung und -steuerung. In Arnold et al. (2004), (pp. A4 – 14 – A4 – 32).

Stumpf, P. (1998). *Tourenplanung im speditionellen Güterfernverkehr.* Nürnberg: Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik.

Thomas, F. (2004). Kurier-, Express- und Paketdienste. In Arnold et al. (2004), (pp. C3 – 70 – C3 – 76).

Ullmer-Schulz, E. & Böttger, C.-U. (1997). *Verkehrslehre des Außenhandels.* Hamburg: Feldhaus.

Vahrenkamp, R. & Siepermann, C. (2005). *Logistik. Management und Strategien* (5 ed.). München: Oldenbourg.

Walter, S. (2003). *Logistik in Dienstleistungsunternehmen.* Wiesbaden: Gabler.

Wieberneit, N. (2008a). *Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen.* Augsburg: OPUS Augsburg, Dissertation.

Wieberneit, N. (2008b). Service network design for freight transportation: A review. *OR Spectrum*, 30 (1): 77 – 112.

Wlček, H. (1998). *Gestaltung der Güterverkehrsnetze von Sammelgutspeditionen.* Nürnberg: Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik.

Woitek, R. (1987). Internationale Kurierdienste - Bedeutung und Marktverhältnisse. In Ditsch (1987), (pp. 22 – 41).

Woitschützke, C. P. (2006). *Verkehrsgeographie* (7 ed.). Troisdorf: Stam.

Wolf, D. (2001). *Gestaltung eines Produktionsplanungs- und steuerungssystems für Sammelgutspeditionen: ein modellbasierter Gestaltungsansatz.* Frankfurt am Main: Lang.

Wood, D. F., Barone, A., Murphy, P., & Wardlow, D. L. (2002). *International Logistics* (2 ed.). New York: Mcgraw-Hill Professional.

Worbs, J., Yu, K. W., & Schulze, L. (2004). Ressourcen. In Arnold et al. (2004), (pp. B3 – 41 – B3 – 57).

A. Anhang

α	**nur α** **SG; RZ [s]**	**α und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**	α	**nur α** **SG; RZ [s]**	**α und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**
0	0,922; 9,39	0,931; 12,78	0,5	0,952; 10,12	0,969; 13,68
0,01	0,945; 9,69	0,956; 13,70	0,51	0,952; 10,19	0,969; 13,56
0,02	0,950; 9,74	0,963; 13,81	0,52	0,952; 10,23	0,969; 13,60
0,03	0,952; 9,70	0,966; 13,88	0,53	0,952; 10,30	0,969; 13,57
0,04	0,954; 9,50	0,968; 13,84	0,54	0,952; 10,22	0,969; 13,48
0,05	0,954; 9,49	0,968; 13,74	0,55	0,952; 10,23	0,969; 13,54
0,06	0,955; 9,52	0,969; 13,65	0,56	0,952; 10,27	0,969; 13,53
0,07	0,956; 9,56	0,968; 13,60	0,57	0,952; 10,28	0,969; 13,57
0,08	0,955; 9,53	0,969; 13,62	0,58	0,952; 10,27	0,969; 13,60
0,09	0,955; 9,56	0,968; 13,56	0,59	0,952; 10,39	0,969; 13,59
0,1	0,955; 9,61	0,969; 13,59	0,6	0,952; 10,27	0,969; 13,76
0,11	0,955; 9,69	0,969; 13,78	0,61	0,952; 10,33	0,969; 13,56
0,12	0,954; 9,70	0,969; 13,62	0,62	0,952; 10,34	0,969; 13,54
0,13	0,955; 13,78	0,969; 13,59	0,63	0,952; 10,34	0,969; 13,56
0,14	0,955; 9,69	0,969; 13,62	0,64	0,952; 10,34	0,969; 13,54
0,15	0,955; 9,67	0,969; 13,60	0,65	0,952; 10,33	0,969; 13,54
0,16	0,954; 9,67	0,969; 13,60	0,66	0,952; 10,34	0,969; 13,57
0,17	0,954; 9,70	0,969; 13,57	0,67	0,952; 10,39	0,969; 13,49
0,18	0,954; 9,73	0,969; 13,57	0,68	0,952; 10,36	0,969; 13,56
0,19	0,954; 9,78	0,969; 13,46	0,69	0,951; 10,33	0,969; 13,57
0,2	0,954; 9,73	0,969; 13,57	0,7	0,951; 10,34	0,969; 13,68
0,21	0,954; 9,84	0,969; 13,74	0,71	0,951; 10,41	0,969; 13,56
0,22	0,953; 9,78	0,969; 13,57	0,72	0,951; 10,45	0,969; 13,54
0,23	0,953; 9,78	0,969; 13,54	0,73	0,951; 10,44	0,969; 13,56
0,24	0,953; 9,80	0,969; 13,51	0,74	0,951; 10,42	0,969; 13,54
0,25	0,953; 9,81	0,969; 13,46	0,75	0,951; 10,47	0,969; 13,51
0,26	0,953; 9,87	0,969; 13,59	0,76	0,951; 10,48	0,969; 13,70
0,27	0,953; 9,83	0,969; 13,54	0,77	0,951; 10,47	0,969; 13,57
0,28	0,953; 9,91	0,969; 13,53	0,78	0,951; 10,52	0,969; 13,60
0,29	0,953; 9,86	0,969; 13,59	0,79	0,951; 10,53	0,969; 13,54
0,3	0,953; 9,92	0,969; 13,56	0,8	0,951; 10,45	0,969; 13,74

Weiter auf der nächsten Seite

α	**nur α** **SG; RZ [s]**	**α und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**	α	**nur α** **SG; RZ [s]**	**α und Maximierung der Auslastung SG; RZ [s]**
0,31	0,953; 9,88	0,969; 13,68	0,81	0,951; 10,50	0,969; 13,54
0,32	0,953; 9,89	0,969; 13,57	0,82	0,951; 10,56	0,969; 13,54
0,33	0,953; 9,91	0,969; 13,51	0,83	0,951; 10,58	0,969; 13,59
0,34	0,954; 9,94	0,969; 13,56	0,84	0,951; 10,56	0,969; 13,74
0,35	0,954; 9,95	0,969; 13,57	0,85	0,951; 10,59	0,969; 13,54
0,36	0,953; 9,89	0,969; 13,54	0,86	0,951; 10,59	0,969; 13,51
0,37	0,953; 9,95	0,969; 13,56	0,87	0,951; 10,62	0,969; 13,73
0,38	0,953; 9,95	0,969; 13,56	0,88	0,951; 10,59	0,969; 13,59
0,39	0,953; 10,00	0,969; 13,51	0,89	0,951; 10,61	0,969; 13,56
0,4	0,952; 10,00	0,969; 13,57	0,9	0,951; 10,66	0,969; 13,57
0,41	0,952; 10,00	0,969; 13,68	0,91	0,951; 10,62	0,969; 13,53
0,42	0,952; 10,08	0,969; 13,59	0,92	0,950; 10,64	0,969; 13,57
0,43	0,952; 10,08	0,969; 13,56	0,93	0,950; 10,69	0,969; 13,57
0,44	0,952; 10,17	0,969; 13,53	0,94	0,950; 10,69	0,969; 13,53
0,45	0,952; 10,14	0,969; 13,59	0,95	0,950; 10,69	0,969; 13,60
0,46	0,952; 10,14	0,969; 13,54	0,96	0,950; 10,70	0,969; 13,59
0,47	0,952; 10,17	0,969; 13,56	0,97	0,950; 10,72	0,969; 13,56
0,48	0,952; 10,14	0,969; 13,56	0,98	0,950; 10,70	0,969; 13,70
0,49	0,952; 10,17	0,969; 13,65	0,99	0,950; 10,67	0,969; 13,48
0,5	0,952; 10,22	0,969; 13,57	1	0,950; 10,72	0,969; 13,68

Tabelle A.1.: Zahlenwerte für die in den Abbildungen 5.9 und 5.10 (Identifizierung von ungeeigneten Mengen) dargestellten Werte (SG: Servicegrad, RZ: Rechenzeit, Zahlenwerte für nur Maximierung der Auslastung: 0,968 als SG und 28,46 s als RZ)

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,01	1	0	0,887; 299,39	0,01	1	5	0,887; 299,78
0,02	1	0	0,891; 328,50	0,02	1	5	0,891; 303,55
0,03	1	0	0,891; 304,73	0,03	1	5	0,891; 308,03
0,04	1	0	0,889; 305,78	0,04	1	5	0,889; 305,92
0,05	1	0	0,890; 306,00	0,05	1	5	0,890; 305,27
0,06	1	0	0,888; 308,66	0,06	1	5	0,888; 314,45
0,07	1	0	0,888; 310,55	0,07	1	5	0,887; 323,11
0,08	1	0	0,886; 310,66	0,08	1	5	0,886; 326,14
0,09	1	0	0,885; 309,50	0,09	1	5	0,885; 316,56
0,10	1	0	0,882; 311,47	0,10	1	5	0,882; 312,41
0,11	1	0	0,883; 309,14	0,11	1	5	0,883; 312,25

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,12	1	0	0,883; 310,47	0,12	1	5	0,883; 326,95
0,13	1	0	0,883; 308,92	0,13	1	5	0,883; 327,05
0,14	1	0	0,882; 308,61	0,14	1	5	0,882; 327,11
0,15	1	0	0,882; 314,28	0,15	1	5	0,882; 324,42
0,16	1	0	0,882; 313,27	0,16	1	5	0,882; 324,06
0,17	1	0	0,881; 312,02	0,17	1	5	0,881; 326,59
0,18	1	0	0,881; 313,19	0,18	1	5	0,881; 325,64
0,19	1	0	0,881; 314,31	0,19	1	5	0,881; 324,67
0,20	1	0	0,881; 314,42	0,20	1	5	0,881; 315,70
0,21	1	0	0,881; 319,16	0,21	1	5	0,881; 311,98
0,22	1	0	0,881; 313,59	0,22	1	5	0,881; 315,33
0,23	1	0	0,882; 310,27	0,23	1	5	0,882; 318,94
0,24	1	0	0,881; 311,64	0,24	1	5	0,881; 317,80
0,25	1	0	0,881; 318,36	0,25	1	5	0,881; 318,97
0,26	1	0	0,881; 322,09	0,26	1	5	0,881; 319,36
0,27	1	0	0,879; 318,98	0,27	1	5	0,879; 319,44
0,28	1	0	0,879; 313,47	0,28	1	5	0,879; 318,78
0,29	1	0	0,882; 314,55	0,29	1	5	0,881; 315,80
0,30	1	0	0,881; 314,78	0,30	1	5	0,881; 315,77
0,31	1	0	0,881; 317,25	0,31	1	5	0,881; 326,36
0,32	1	0	0,881; 314,23	0,32	1	5	0,881; 331,20
0,33	1	0	0,881; 314,98	0,33	1	5	0,881; 328,17
0,34	1	0	0,880; 315,17	0,34	1	5	0,880; 318,70
0,35	1	0	0,880; 312,30	0,35	1	5	0,880; 317,41
0,36	1	0	0,882; 312,20	0,36	1	5	0,882; 319,42
0,37	1	0	0,881; 314,38	0,37	1	5	0,880; 318,06
0,38	1	0	0,880; 314,89	0,38	1	5	0,880; 317,22
0,39	1	0	0,880; 311,17	0,39	1	5	0,879; 318,36
0,40	1	0	0,880; 317,64	0,40	1	5	0,880; 317,83
0,01	1	10	0,887; 309,09	0,01	10	0	0,925; 376,30
0,02	1	10	0,891; 311,33	0,02	10	0	0,929; 406,52
0,03	1	10	0,891; 314,95	0,03	10	0	0,935; 397,23
0,04	1	10	0,889; 310,56	0,04	10	0	0,932; 405,94
0,05	1	10	0,890; 310,03	0,05	10	0	0,932; 406,33
0,06	1	10	0,888; 314,41	0,06	10	0	0,930; 405,77
0,07	1	10	0,887; 330,00	0,07	10	0	0,932; 423,41
0,08	1	10	0,886; 329,69	0,08	10	0	0,929; 416,34
0,09	1	10	0,885; 329,86	0,09	10	0	0,930; 415,34
0,10	1	10	0,882; 324,13	0,10	10	0	0,928; 413,78
0,11	1	10	0,883; 322,94	0,11	10	0	0,926; 400,13
0,12	1	10	0,883; 322,53	0,12	10	0	0,927; 401,72

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,13	1	10	0,883; 317,58	0,13	10	0	0,928; 403,61
0,14	1	10	0,882; 319,72	0,14	10	0	0,927; 408,83
0,15	1	10	0,882; 328,56	0,15	10	0	0,925; 405,44
0,16	1	10	0,882; 326,34	0,16	10	0	0,926; 403,73
0,17	1	10	0,881; 333,03	0,17	10	0	0,927; 399,33
0,18	1	10	0,881; 322,09	0,18	10	0	0,928; 400,33
0,19	1	10	0,881; 320,55	0,19	10	0	0,927; 398,94
0,20	1	10	0,881; 318,24	0,20	10	0	0,927; 398,59
0,21	1	10	0,881; 314,06	0,21	10	0	0,928; 399,39
0,22	1	10	0,881; 316,13	0,22	10	0	0,927; 398,03
0,23	1	10	0,882; 318,64	0,23	10	0	0,928; 400,39
0,24	1	10	0,881; 319,22	0,24	10	0	0,926; 401,27
0,25	1	10	0,881; 316,47	0,25	10	0	0,926; 401,34
0,26	1	10	0,879; 319,75	0,26	10	0	0,926; 400,36
0,27	1	10	0,879; 320,50	0,27	10	0	0,926; 401,30
0,28	1	10	0,881; 326,06	0,28	10	0	0,925; 401,66
0,29	1	10	0,881; 318,97	0,29	10	0	0,926; 401,67
0,30	1	10	0,881; 325,81	0,30	10	0	0,926; 401,66
0,31	1	10	0,881; 328,52	0,31	10	0	0,927; 400,99
0,32	1	10	0,881; 327,91	0,32	10	0	0,927; 402,45
0,33	1	10	0,881; 324,77	0,33	10	0	0,928; 402,44
0,34	1	10	0,881; 323,14	0,34	10	0	0,928; 403,11
0,35	1	10	0,880; 318,95	0,35	10	0	0,927; 403,22
0,36	1	10	0,882; 320,31	0,36	10	0	0,929; 403,13
0,37	1	10	0,880; 318,73	0,37	10	0	0,928; 411,99
0,38	1	10	0,880; 317,99	0,38	10	0	0,927; 414,16
0,39	1	10	0,880; 325,17	0,39	10	0	0,927; 412,80
0,40	1	10	0,880; 321,97	0,40	10	0	0,927; 412,30
0,01	10	5	0,926; 389,03	0,01	10	10	0,925; 401,05
0,02	10	5	0,931; 414,67	0,02	10	10	0,931; 426,47
0,03	10	5	0,935; 415,88	0,03	10	10	0,935; 429,30
0,04	10	5	0,932; 425,77	0,04	10	10	0,932; 437,17
0,05	10	5	0,932; 426,09	0,05	10	10	0,932; 441,09
0,06	10	5	0,931; 427,61	0,06	10	10	0,931; 441,31
0,07	10	5	0,932; 435,00	0,07	10	10	0,932; 442,06
0,08	10	5	0,928; 435,72	0,08	10	10	0,928; 442,86
0,09	10	5	0,930; 430,23	0,09	10	10	0,930; 442,52
0,10	10	5	0,928; 432,13	0,10	10	10	0,928; 443,77
0,11	10	5	0,926; 422,66	0,11	10	10	0,926; 433,64
0,12	10	5	0,926; 422,20	0,12	10	10	0,926; 433,88
0,13	10	5	0,928; 420,92	0,13	10	10	0,928; 432,58

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,14	10	5	0,927; 421,42	0,14	10	10	0,927; 433,45
0,15	10	5	0,927; 423,16	0,15	10	10	0,927; 435,08
0,16	10	5	0,927; 421,25	0,16	10	10	0,927; 435,78
0,17	10	5	0,927; 423,58	0,17	10	10	0,927; 435,97
0,18	10	5	0,928; 423,86	0,18	10	10	0,928; 435,17
0,19	10	5	0,927; 422,88	0,19	10	10	0,927; 435,50
0,20	10	5	0,927; 421,38	0,20	10	10	0,927; 435,66
0,21	10	5	0,928; 420,78	0,21	10	10	0,928; 434,50
0,22	10	5	0,927; 423,09	0,22	10	10	0,927; 436,25
0,23	10	5	0,928; 424,39	0,23	10	10	0,928; 435,75
0,24	10	5	0,926; 422,95	0,24	10	10	0,926; 438,36
0,25	10	5	0,926; 424,94	0,25	10	10	0,926; 434,86
0,26	10	5	0,926; 425,58	0,26	10	10	0,926; 438,25
0,27	10	5	0,926; 425,27	0,27	10	10	0,926; 437,25
0,28	10	5	0,925; 424,64	0,28	10	10	0,925; 439,27
0,29	10	5	0,926; 426,63	0,29	10	10	0,926; 438,52
0,30	10	5	0,926; 424,14	0,30	10	10	0,926; 438,47
0,31	10	5	0,927; 426,72	0,31	10	10	0,927; 437,59
0,32	10	5	0,927; 425,63	0,32	10	10	0,927; 438,98
0,33	10	5	0,928; 425,08	0,33	10	10	0,927; 437,45
0,34	10	5	0,928; 426,36	0,34	10	10	0,928; 436,72
0,35	10	5	0,927; 425,56	0,35	10	10	0,927; 437,69
0,36	10	5	0,927; 425,48	0,36	10	10	0,927; 437,09
0,37	10	5	0,928; 437,16	0,37	10	10	0,928; 448,78
0,38	10	5	0,928; 438,00	0,38	10	10	0,928; 447,78
0,39	10	5	0,927; 436,50	0,39	10	10	0,927; 447,28
0,40	10	5	0,928; 438,20	0,40	10	10	0,927; 448,70
0,01	100	0	0,950; 628,38	0,01	100	5	0,950; 1078,66
0,02	100	0	0,953; 765,47	0,02	100	5	0,953; 1365,69
0,03	100	0	0,954; 773,77	0,03	100	5	0,954; 1361,17
0,04	100	0	0,955; 766,22	0,04	100	5	0,955; 1360,03
0,05	100	0	0,955; 757,55	0,05	100	5	0,955; 1357,11
0,06	100	0	0,955; 759,08	0,06	100	5	0,955; 1360,72
0,07	100	0	0,955; 761,25	0,07	100	5	0,956; 1347,44
0,08	100	0	0,956; 764,58	0,08	100	5	0,956; 1358,19
0,09	100	0	0,956; 770,20	0,09	100	5	0,956; 1299,66
0,10	100	0	0,956; 785,72	0,10	100	5	0,955; 1302,86
0,11	100	0	0,955; 767,41	0,11	100	5	0,955; 1297,80
0,12	100	0	0,955; 778,47	0,12	100	5	0,955; 1296,14
0,13	100	0	0,955; 774,95	0,13	100	5	0,955; 1297,03
0,14	100	0	0,955; 776,86	0,14	100	5	0,955; 1293,06

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,15	100	0	0,955; 769,52	0,15	100	5	0,955; 1303,61
0,16	100	0	0,955; 774,28	0,16	100	5	0,955; 1301,97
0,17	100	0	0,955; 777,69	0,17	100	5	0,955; 1294,84
0,18	100	0	0,955; 782,11	0,18	100	5	0,955; 1302,42
0,19	100	0	0,955; 779,36	0,19	100	5	0,955; 1314,84
0,20	100	0	0,955; 778,52	0,20	100	5	0,955; 1297,20
0,21	100	0	0,955; 767,30	0,21	100	5	0,954; 1308,98
0,22	100	0	0,955; 766,64	0,22	100	5	0,955; 1300,80
0,23	100	0	0,955; 759,14	0,23	100	5	0,955; 1304,31
0,24	100	0	0,954; 767,88	0,24	100	5	0,955; 1305,27
0,25	100	0	0,954; 784,03	0,25	100	5	0,954; 1299,91
0,26	100	0	0,954; 785,72	0,26	100	5	0,955; 1297,97
0,27	100	0	0,954; 779,19	0,27	100	5	0,955; 1308,17
0,28	100	0	0,954; 772,61	0,28	100	5	0,954; 1315,58
0,29	100	0	0,954; 773,05	0,29	100	5	0,955; 1300,56
0,30	100	0	0,954; 773,34	0,30	100	5	0,955; 1303,61
0,31	100	0	0,954; 762,64	0,31	100	5	0,954; 1301,92
0,32	100	0	0,954; 765,69	0,32	100	5	0,955; 1315,31
0,33	100	0	0,954; 767,44	0,33	100	5	0,955; 1304,64
0,34	100	0	0,954; 767,55	0,34	100	5	0,955; 1301,89
0,35	100	0	0,954; 765,98	0,35	100	5	0,954; 1304,67
0,36	100	0	0,954; 758,61	0,36	100	5	0,954; 1301,02
0,37	100	0	0,954; 764,92	0,37	100	5	0,954; 1297,45
0,38	100	0	0,954; 766,72	0,38	100	5	0,954; 1309,22
0,39	100	0	0,954; 769,31	0,39	100	5	0,954; 1292,69
0,40	100	0	0,954; 766,24	0,40	100	5	0,954; 1297,34
0,01	100	10	0,950; 1192,75	0,01	1000	0	0,950; 617,52
0,02	100	10	0,953; 1476,53	0,02	1000	0	0,953; 748,83
0,03	100	10	0,954; 1487,19	0,03	1000	0	0,954; 750,98
0,04	100	10	0,955; 1486,47	0,04	1000	0	0,955; 750,58
0,05	100	10	0,955; 1485,73	0,05	1000	0	0,955; 740,73
0,06	100	10	0,955; 1478,41	0,06	1000	0	0,955; 742,63
0,07	100	10	0,956; 1481,67	0,07	1000	0	0,955; 747,38
0,08	100	10	0,956; 1497,63	0,08	1000	0	0,956; 747,00
0,09	100	10	0,956; 1406,91	0,09	1000	0	0,956; 756,19
0,10	100	10	0,955; 1388,09	0,10	1000	0	0,956; 768,83
0,11	100	10	0,955; 1379,20	0,11	1000	0	0,955; 755,41
0,12	100	10	0,955; 1386,17	0,12	1000	0	0,955; 761,81
0,13	100	10	0,955; 1378,95	0,13	1000	0	0,955; 760,17
0,14	100	10	0,955; 1390,70	0,14	1000	0	0,955; 759,63
0,15	100	10	0,955; 1391,27	0,15	1000	0	0,955; 759,08

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,16	100	10	0,955; 1388,36	0,16	1000	0	0,955; 754,83
0,17	100	10	0,955; 1378,06	0,17	1000	0	0,955; 764,53
0,18	100	10	0,955; 1381,67	0,18	1000	0	0,955; 778,31
0,19	100	10	0,955; 1381,41	0,19	1000	0	0,955; 764,47
0,20	100	10	0,955; 1372,67	0,20	1000	0	0,955; 782,92
0,21	100	10	0,955; 1380,08	0,21	1000	0	0,955; 752,77
0,22	100	10	0,955; 1374,53	0,22	1000	0	0,955; 748,56
0,23	100	10	0,955; 1380,09	0,23	1000	0	0,955; 746,28
0,24	100	10	0,955; 1377,91	0,24	1000	0	0,954; 782,06
0,25	100	10	0,955; 1372,99	0,25	1000	0	0,954; 785,88
0,26	100	10	0,955; 1377,80	0,26	1000	0	0,954; 794,34
0,27	100	10	0,954; 1386,91	0,27	1000	0	0,954; 786,81
0,28	100	10	0,955; 1378,02	0,28	1000	0	0,954; 771,16
0,29	100	10	0,954; 1379,03	0,29	1000	0	0,954; 782,59
0,30	100	10	0,954; 1384,44	0,30	1000	0	0,954; 783,31
0,31	100	10	0,954; 1377,34	0,31	1000	0	0,954; 770,36
0,32	100	10	0,955; 1372,86	0,32	1000	0	0,954; 785,14
0,33	100	10	0,955; 1385,64	0,33	1000	0	0,955; 769,89
0,34	100	10	0,954; 1380,00	0,34	1000	0	0,955; 767,28
0,35	100	10	0,954; 1373,92	0,35	1000	0	0,954; 779,94
0,36	100	10	0,954; 1377,00	0,36	1000	0	0,954; 747,72
0,37	100	10	0,954; 1384,06	0,37	1000	0	0,954; 759,72
0,38	100	10	0,954; 1381,91	0,38	1000	0	0,954; 759,03
0,39	100	10	0,954; 1380,20	0,39	1000	0	0,954; 770,39
0,40	100	10	0,954; 1379,30	0,40	1000	0	0,954; 767,11
0,01	1000	5	0,950; 2087,17	0,01	1000	10	0,950; 3707,05
0,02	1000	5	0,953; 2745,95	0,02	1000	10	0,953; 5103,06
0,03	1000	5	0,954; 2694,19	0,03	1000	10	0,954; 5120,91
0,04	1000	5	0,955; 2769,89	0,04	1000	10	0,954; 5061,09
0,05	1000	5	0,955; 2703,16	0,05	1000	10	0,955; 5077,08
0,06	1000	5	0,956; 2663,17	0,06	1000	10	0,955; 5089,20
0,07	1000	5	0,956; 2683,77	0,07	1000	10	0,956; 5026,58
0,08	1000	5	0,956; 2816,09	0,08	1000	10	0,956; 5134,52
0,09	1000	5	0,956; 2602,08	0,09	1000	10	0,956; 4886,86
0,10	1000	5	0,956; 2665,89	0,10	1000	10	0,955; 4947,58
0,11	1000	5	0,955; 2598,70	0,11	1000	10	0,956; 4938,50
0,12	1000	5	0,955; 2549,44	0,12	1000	10	0,955; 4891,88
0,13	1000	5	0,955; 2605,56	0,13	1000	10	0,955; 4883,88
0,14	1000	5	0,955; 2613,48	0,14	1000	10	0,955; 5026,94
0,15	1000	5	0,955; 2617,84	0,15	1000	10	0,955; 4917,36
0,16	1000	5	0,955; 2600,02	0,16	1000	10	0,955; 4874,72

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,17	1000	5	0,955; 2577,52	0,17	1000	10	0,955; 4899,28
0,18	1000	5	0,955; 2550,48	0,18	1000	10	0,955; 4893,67
0,19	1000	5	0,955; 2619,53	0,19	1000	10	0,955; 4976,63
0,20	1000	5	0,955; 2632,78	0,20	1000	10	0,955; 4858,92
0,21	1000	5	0,954; 2585,80	0,21	1000	10	0,955; 4981,16
0,22	1000	5	0,955; 2619,80	0,22	1000	10	0,955; 4912,31
0,23	1000	5	0,954; 2566,64	0,23	1000	10	0,955; 4848,05
0,24	1000	5	0,955; 2575,97	0,24	1000	10	0,955; 4881,91
0,25	1000	5	0,955; 2570,19	0,25	1000	10	0,955; 4853,25
0,26	1000	5	0,955; 2591,83	0,26	1000	10	0,955; 4865,89
0,27	1000	5	0,954; 2538,38	0,27	1000	10	0,955; 4780,80
0,28	1000	5	0,955; 2553,73	0,28	1000	10	0,954; 4873,75
0,29	1000	5	0,954; 2606,45	0,29	1000	10	0,955; 4908,58
0,30	1000	5	0,955; 2640,50	0,30	1000	10	0,955; 4803,77
0,31	1000	5	0,954; 2610,23	0,31	1000	10	0,954; 4940,34
0,32	1000	5	0,955; 2657,69	0,32	1000	10	0,955; 4948,22
0,33	1000	5	0,955; 2591,59	0,33	1000	10	0,955; 4893,13
0,34	1000	5	0,955; 2622,84	0,34	1000	10	0,954; 4952,38
0,35	1000	5	0,954; 2581,34	0,35	1000	10	0,954; 4856,16
0,36	1000	5	0,954; 2613,22	0,36	1000	10	0,954; 4788,72
0,37	1000	5	0,954; 2653,30	0,37	1000	10	0,954; 4770,34
0,38	1000	5	0,954; 2580,55	0,38	1000	10	0,954; 4797,61
0,39	1000	5	0,954; 2566,11	0,39	1000	10	0,954; 4856,97
0,40	1000	5	0,954; 2561,31	0,40	1000	10	0,954; 4793,34
0,01	3600	0	0,953; 750,27	0,01	3600	5	0,950; 1957,64
0,02	3600	0	0,954; 750,13	0,02	3600	5	0,953; 2672,28
0,03	3600	0	0,955; 748,41	0,03	3600	5	0,954; 2632,94
0,04	3600	0	0,955; 740,72	0,04	3600	5	0,955; 2687,83
0,05	3600	0	0,955; 741,80	0,05	3600	5	0,955; 2638,30
0,06	3600	0	0,955; 749,11	0,06	3600	5	0,955; 2602,17
0,07	3600	0	0,956; 753,25	0,07	3600	5	0,956; 2673,69
0,08	3600	0	0,956; 755,59	0,08	3600	5	0,956; 2618,45
0,09	3600	0	0,956; 767,64	0,09	3600	5	0,956; 2578,84
0,10	3600	0	0,955; 757,30	0,10	3600	5	0,955; 2641,00
0,11	3600	0	0,955; 764,39	0,11	3600	5	0,955; 2593,91
0,12	3600	0	0,955; 759,99	0,12	3600	5	0,955; 2657,66
0,13	3600	0	0,955; 762,31	0,13	3600	5	0,955; 2599,78
0,14	3600	0	0,955; 755,97	0,14	3600	5	0,955; 2630,47
0,15	3600	0	0,955; 783,13	0,15	3600	5	0,955; 2588,27
0,16	3600	0	0,955; 762,80	0,16	3600	5	0,955; 2575,64
0,17	3600	0	0,955; 767,89	0,17	3600	5	0,955; 2586,17

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,18	3600	0	0,955; 766,47	0,18	3600	5	0,955; 2625,73
0,19	3600	0	0,955; 763,75	0,19	3600	5	0,954; 2598,99
0,20	3600	0	0,955; 752,09	0,20	3600	5	0,955; 2627,44
0,21	3600	0	0,955; 749,56	0,21	3600	5	0,955; 2588,30
0,22	3600	0	0,955; 750,48	0,22	3600	5	0,955; 2563,16
0,23	3600	0	0,954; 756,48	0,23	3600	5	0,955; 2581,94
0,24	3600	0	0,954; 770,78	0,24	3600	5	0,955; 2556,95
0,25	3600	0	0,954; 770,27	0,25	3600	5	0,955; 2581,72
0,26	3600	0	0,954; 771,42	0,26	3600	5	0,955; 2603,64
0,27	3600	0	0,954; 759,36	0,27	3600	5	0,954; 2618,00
0,28	3600	0	0,954; 758,63	0,28	3600	5	0,954; 2569,64
0,29	3600	0	0,954; 760,59	0,29	3600	5	0,955; 2596,34
0,30	3600	0	0,954; 755,64	0,30	3600	5	0,954; 2573,58
0,31	3600	0	0,954; 757,80	0,31	3600	5	0,955; 2572,36
0,32	3600	0	0,955; 758,80	0,32	3600	5	0,954; 2581,02
0,33	3600	0	0,955; 762,34	0,33	3600	5	0,954; 2592,56
0,34	3600	0	0,954; 757,58	0,34	3600	5	0,955; 2688,25
0,35	3600	0	0,954; 747,30	0,35	3600	5	0,954; 2631,63
0,36	3600	0	0,954; 749,47	0,36	3600	5	0,954; 2531,38
0,37	3600	0	0,954; 751,16	0,37	3600	5	0,954; 2591,88
0,38	3600	0	0,954; 752,38	0,38	3600	5	0,954; 2581,33
0,39	3600	0	0,954; 753,29	0,39	3600	5	0,954; 2593,06
0,40	3600	0	0,954; 754,81	0,40	3600	5	0,954; 2609,77
0,01	3600	10	0,950; 3691,64	0,21	3600	10	0,954; 4869,64
0,02	3600	10	0,953; 5165,77	0,22	3600	10	0,955; 4847,03
0,03	3600	10	0,954; 5193,72	0,23	3600	10	0,955; 4808,02
0,04	3600	10	0,954; 5094,28	0,24	3600	10	0,955; 4757,25
0,05	3600	10	0,955; 5009,86	0,25	3600	10	0,954; 4830,38
0,06	3600	10	0,955; 5003,41	0,26	3600	10	0,955; 4941,36
0,07	3600	10	0,955; 5011,13	0,27	3600	10	0,954; 4828,16
0,08	3600	10	0,956; 5087,09	0,28	3600	10	0,955; 4923,88
0,09	3600	10	0,956; 4884,80	0,29	3600	10	0,954; 4840,63
0,10	3600	10	0,956; 5040,63	0,30	3600	10	0,955; 4858,47
0,11	3600	10	0,955; 4985,20	0,31	3600	10	0,954; 4851,33
0,12	3600	10	0,955; 4860,81	0,32	3600	10	0,955; 4836,95
0,13	3600	10	0,955; 4888,75	0,33	3600	10	0,955; 4853,78
0,14	3600	10	0,955; 4870,53	0,34	3600	10	0,955; 4875,19
0,15	3600	10	0,955; 5006,95	0,35	3600	10	0,955; 4867,06
0,16	3600	10	0,955; 4913,11	0,36	3600	10	0,954; 4797,81
0,17	3600	10	0,955; 5071,06	0,37	3600	10	0,954; 4771,91
0,18	3600	10	0,955; 5109,09	0,38	3600	10	0,954; 4822,75

Weiter auf der nächsten Seite

α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]	α	**max-Zeit**	**max-Permut**	SG; RZ [s]
0,19	3600	10	0,955; 4994,08	0,39	3600	10	0,954; 4938,80
0,20	3600	10	0,955; 4899,44	0,40	3600	10	0,953; 4868,86

Tabelle A.2.: Zahlenwerte für die in den Abbildungen 5.22 und 5.23 dargestellten Werte (Datensatz Europa, SG: Servicegrad, RZ: Rechenzeit)

Lösung	**anzFT**	**SG**	**Lösung**	**anzFT**	**SG**	**Lösung**	**anzFT**	**SG**
Frankreich								
1	870	0,969	128	850	0,966	255	863	0,968
2	845	0,946	129	850	0,966	256	863	0,968
3	843	0,945	130	850	0,966	257	863	0,968
4	842	0,945	131	850	0,966	258	863	0,968
5	840	0,946	132	850	0,966	259	863	0,968
6	839	0,947	133	850	0,966	260	863	0,968
7	837	0,947	134	850	0,966	261	863	0,968
8	836	0,948	135	850	0,966	262	863	0,968
9	834	0,949	136	850	0,966	263	863	0,968
10	834	0,949	137	850	0,966	264	863	0,968
11	834	0,948	138	850	0,966	265	863	0,968
12	834	0,948	139	850	0,966	266	863	0,968
13	834	0,948	140	850	0,966	267	863	0,968
14	834	0,948	141	850	0,966	268	863	0,968
15	834	0,95	142	850	0,966	269	863	0,968
16	834	0,95	143	850	0,966	270	863	0,968
17	834	0,95	144	850	0,966	271	863	0,968
18	834	0,95	145	850	0,966	272	863	0,968
19	834	0,95	146	850	0,966	273	863	0,968
20	833	0,95	147	850	0,966	274	863	0,968
21	833	0,948	148	850	0,966	275	863	0,968
22	833	0,948	149	850	0,966	276	863	0,968
23	833	0,948	150	850	0,966	277	863	0,968
24	833	0,948	151	850	0,966	278	863	0,968
25	833	0,948	152	850	0,966	279	863	0,968
26	833	0,947	153	850	0,966	280	863	0,968
27	833	0,947	154	850	0,966	281	863	0,968
28	833	0,947	155	850	0,966	282	863	0,968
29	833	0,947	156	850	0,966	283	863	0,968
30	833	0,948	157	850	0,966	284	863	0,968
31	833	0,948	158	850	0,966	285	850	0,966
32	833	0,948	159	850	0,966	286	870	0,968

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
33	833	0,948	160	850	0,966	287	870	0,969
34	833	0,948	161	850	0,966	288	869	0,968
35	833	0,948	162	850	0,966	289	868	0,969
36	833	0,948	163	850	0,966	290	868	0,969
37	833	0,948	164	850	0,966	291	868	0,969
38	833	0,948	165	850	0,966	292	867	0,969
39	833	0,948	166	850	0,966	293	867	0,969
40	833	0,948	167	850	0,966	294	867	0,969
41	833	0,948	168	850	0,966	295	867	0,969
42	833	0,948	169	850	0,966	296	867	0,969
43	833	0,948	170	850	0,966	297	867	0,969
44	833	0,948	171	850	0,966	298	867	0,969
45	833	0,948	172	850	0,966	299	867	0,969
46	833	0,948	173	850	0,966	300	867	0,969
47	832	0,948	174	850	0,966	301	867	0,969
48	832	0,948	175	850	0,966	302	867	0,969
49	832	0,948	176	850	0,966	303	867	0,969
50	832	0,948	177	850	0,966	304	867	0,969
51	832	0,948	178	850	0,966	305	867	0,969
52	832	0,948	179	850	0,966	306	867	0,969
53	832	0,948	180	850	0,966	307	867	0,969
54	832	0,948	181	850	0,966	308	867	0,969
55	832	0,948	182	850	0,966	309	867	0,969
56	832	0,948	183	850	0,966	310	867	0,969
57	832	0,948	184	850	0,966	311	867	0,969
58	832	0,948	185	850	0,966	312	867	0,969
59	832	0,948	186	850	0,966	313	867	0,969
60	832	0,948	187	850	0,966	314	867	0,969
61	832	0,948	188	850	0,966	315	867	0,969
62	832	0,948	189	850	0,966	316	867	0,969
63	832	0,948	190	832	0,948	317	867	0,969
64	832	0,948	191	868	0,967	318	867	0,969
65	832	0,948	192	867	0,967	319	867	0,969
66	832	0,948	193	867	0,968	320	867	0,969
67	832	0,948	194	866	0,967	321	867	0,969
68	832	0,948	195	865	0,968	322	867	0,969
69	832	0,948	196	865	0,968	323	867	0,969
70	832	0,948	197	864	0,968	324	867	0,969
71	832	0,948	198	863	0,968	325	867	0,969
72	832	0,948	199	863	0,968	326	867	0,969
73	832	0,948	200	863	0,968	327	867	0,969
74	832	0,948	201	863	0,968	328	867	0,969

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
75	832	0,948	202	863	0,968	329	867	0,969
76	832	0,948	203	863	0,968	330	867	0,969
77	832	0,948	204	863	0,968	331	867	0,969
78	832	0,948	205	863	0,968	332	867	0,969
79	832	0,948	206	863	0,968	333	867	0,969
80	832	0,948	207	863	0,968	334	867	0,969
81	832	0,948	208	863	0,968	335	867	0,969
82	832	0,948	209	863	0,968	336	867	0,969
83	832	0,948	210	863	0,968	337	867	0,969
84	832	0,948	211	863	0,968	338	867	0,969
85	832	0,948	212	863	0,968	339	867	0,969
86	832	0,948	213	863	0,968	340	867	0,969
87	832	0,948	214	863	0,968	341	867	0,969
88	832	0,948	215	863	0,968	342	867	0,969
89	832	0,948	216	863	0,968	343	867	0,969
90	832	0,948	217	863	0,968	344	867	0,969
91	832	0,948	218	863	0,968	345	867	0,969
92	832	0,948	219	863	0,968	346	867	0,969
93	832	0,948	220	863	0,968	347	867	0,969
94	832	0,948	221	863	0,968	348	867	0,969
95	832	0,948	222	863	0,968	349	867	0,969
96	860	0,965	223	863	0,968	350	867	0,969
97	860	0,966	224	863	0,968	351	867	0,969
98	859	0,966	225	863	0,968	352	867	0,969
99	857	0,966	226	863	0,968	353	867	0,969
100	856	0,966	227	863	0,968	354	867	0,969
101	856	0,966	228	863	0,968	355	867	0,969
102	855	0,967	229	863	0,968	356	867	0,969
103	851	0,967	230	863	0,968	357	867	0,969
104	851	0,967	231	863	0,968	358	867	0,969
105	851	0,967	232	863	0,968	359	867	0,969
106	850	0,967	233	863	0,968	360	867	0,969
107	850	0,967	234	863	0,968	361	867	0,969
108	850	0,967	235	863	0,968	362	867	0,969
109	850	0,967	236	863	0,968	363	867	0,969
110	850	0,967	237	863	0,968	364	867	0,969
111	850	0,967	238	863	0,968	365	867	0,969
112	850	0,967	239	863	0,968	366	867	0,969
113	850	0,967	240	863	0,968	367	867	0,969
114	850	0,967	241	863	0,968	368	867	0,969
115	850	0,967	242	863	0,968	369	867	0,969
116	850	0,967	243	863	0,968	370	867	0,969

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
117	850	0,967	244	863	0,968	371	867	0,969
118	850	0,967	245	863	0,968	372	867	0,969
119	850	0,967	246	863	0,968	373	867	0,969
120	850	0,967	247	863	0,968	374	867	0,969
121	850	0,967	248	863	0,968	375	867	0,969
122	850	0,967	249	863	0,968	376	867	0,969
123	850	0,967	250	863	0,968	377	867	0,969
124	850	0,966	251	863	0,968	378	867	0,969
125	850	0,966	252	863	0,968	379	863	0,968
126	850	0,966	253	863	0,968	380	867	0,969
127	850	0,966	254	863	0,968			
Europa								
1	2832	0,887	201	2881	0,925	401	2912	0,95
2	2837	0,891	202	2881	0,931	402	2927	0,953
3	2838	0,891	203	2875	0,935	403	2926	0,954
4	2832	0,889	204	2886	0,932	404	2920	0,955
5	2830	0,89	205	2878	0,932	405	2922	0,955
6	2834	0,888	206	2875	0,931	406	2929	0,956
7	2836	0,888	207	2879	0,932	407	2926	0,956
8	2821	0,886	208	2868	0,928	408	2922	0,956
9	2825	0,885	209	2881	0,93	409	2916	0,956
10	2821	0,882	210	2868	0,928	410	2922	0,956
11	2830	0,883	211	2864	0,926	411	2917	0,955
12	2827	0,883	212	2863	0,926	412	2920	0,955
13	2830	0,883	213	2869	0,928	413	2923	0,955
14	2826	0,882	214	2867	0,927	414	2920	0,955
15	2829	0,882	215	2868	0,927	415	2921	0,955
16	2829	0,882	216	2870	0,927	416	2929	0,955
17	2834	0,881	217	2871	0,927	417	2921	0,955
18	2829	0,881	218	2872	0,928	418	2912	0,955
19	2820	0,881	219	2870	0,927	419	2904	0,955
20	2825	0,881	220	2872	0,927	420	2908	0,955
21	2825	0,881	221	2867	0,928	421	2915	0,954
22	2827	0,881	222	2860	0,927	422	2909	0,955
23	2825	0,882	223	2866	0,928	423	2903	0,954
24	2823	0,881	224	2860	0,926	424	2915	0,955
25	2819	0,881	225	2860	0,926	425	2909	0,955
26	2822	0,881	226	2862	0,926	426	2921	0,955
27	2824	0,879	227	2860	0,926	427	2921	0,954
28	2824	0,879	228	2860	0,925	428	2914	0,955
29	2818	0,882	229	2859	0,926	429	2915	0,954
30	2820	0,881	230	2856	0,926	430	2914	0,955

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
31	2820	0,881	231	2859	0,927	431	2909	0,954
32	2820	0,881	232	2859	0,927	432	2917	0,955
33	2816	0,881	233	2868	0,927	433	2915	0,955
34	2818	0,88	234	2865	0,928	434	2918	0,955
35	2816	0,88	235	2865	0,927	435	2913	0,954
36	2820	0,882	236	2866	0,927	436	2909	0,954
37	2819	0,881	237	2866	0,928	437	2915	0,954
38	2819	0,88	238	2867	0,928	438	2916	0,954
39	2819	0,88	239	2867	0,927	439	2915	0,954
40	2818	0,88	240	2866	0,927	440	2907	0,954
41	2833	0,887	241	2910	0,95	441	2908	0,95
42	2838	0,891	242	2918	0,953	442	2929	0,953
43	2839	0,891	243	2917	0,954	443	2925	0,954
44	2831	0,889	244	2917	0,955	444	2922	0,954
45	2832	0,89	245	2915	0,955	445	2917	0,955
46	2837	0,888	246	2917	0,955	446	2920	0,955
47	2840	0,887	247	2918	0,955	447	2925	0,956
48	2827	0,886	248	2914	0,956	448	2923	0,956
49	2825	0,885	249	2919	0,956	449	2928	0,956
50	2822	0,882	250	2916	0,956	450	2920	0,955
51	2832	0,883	251	2907	0,955	451	2919	0,956
52	2830	0,883	252	2909	0,955	452	2917	0,955
53	2831	0,883	253	2919	0,955	453	2914	0,955
54	2831	0,882	254	2922	0,955	454	2916	0,955
55	2833	0,882	255	2915	0,955	455	2920	0,955
56	2835	0,882	256	2912	0,955	456	2914	0,955
57	2832	0,881	257	2915	0,955	457	2919	0,955
58	2830	0,881	258	2905	0,955	458	2910	0,955
59	2818	0,881	259	2913	0,955	459	2910	0,955
60	2826	0,881	260	2914	0,955	460	2924	0,955
61	2827	0,881	261	2907	0,955	461	2913	0,955
62	2825	0,881	262	2904	0,955	462	2910	0,955
63	2825	0,882	263	2902	0,955	463	2911	0,955
64	2825	0,881	264	2901	0,954	464	2917	0,955
65	2822	0,881	265	2906	0,954	465	2915	0,955
66	2824	0,881	266	2910	0,954	466	2908	0,955
67	2828	0,879	267	2912	0,954	467	2919	0,955
68	2827	0,879	268	2907	0,954	468	2905	0,954
69	2822	0,881	269	2903	0,954	469	2914	0,955
70	2823	0,881	270	2903	0,954	470	2920	0,955
71	2818	0,881	271	2906	0,954	471	2916	0,954
72	2818	0,881	272	2906	0,954	472	2913	0,955

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
73	2820	0,881	273	2910	0,954	473	2911	0,955
74	2820	0,88	274	2911	0,954	474	2913	0,954
75	2819	0,88	275	2911	0,954	475	2916	0,954
76	2820	0,882	276	2905	0,954	476	2907	0,954
77	2822	0,88	277	2909	0,954	477	2917	0,954
78	2819	0,88	278	2909	0,954	478	2910	0,954
79	2821	0,879	279	2910	0,954	479	2921	0,954
80	2823	0,88	280	2910	0,954	480	2910	0,954
81	2834	0,887	281	2917	0,95	481	2910	0,95
82	2839	0,891	282	2925	0,953	482	2918	0,953
83	2841	0,891	283	2923	0,954	483	2919	0,954
84	2834	0,889	284	2923	0,955	484	2917	0,955
85	2833	0,89	285	2922	0,955	485	2915	0,955
86	2833	0,888	286	2923	0,955	486	2917	0,955
87	2839	0,887	287	2925	0,956	487	2918	0,955
88	2825	0,886	288	2925	0,956	488	2914	0,956
89	2827	0,885	289	2921	0,956	489	2919	0,956
90	2825	0,882	290	2928	0,955	490	2916	0,956
91	2834	0,883	291	2912	0,955	491	2907	0,955
92	2830	0,883	292	2910	0,955	492	2909	0,955
93	2833	0,883	293	2924	0,955	493	2919	0,955
94	2829	0,882	294	2923	0,955	494	2922	0,955
95	2832	0,882	295	2917	0,955	495	2915	0,955
96	2834	0,882	296	2914	0,955	496	2912	0,955
97	2833	0,881	297	2920	0,955	497	2915	0,955
98	2827	0,881	298	2911	0,955	498	2908	0,955
99	2817	0,881	299	2913	0,955	499	2913	0,955
100	2828	0,881	300	2918	0,955	500	2914	0,955
101	2828	0,881	301	2917	0,954	501	2907	0,955
102	2829	0,881	302	2912	0,955	502	2904	0,955
103	2827	0,882	303	2907	0,955	503	2902	0,955
104	2826	0,881	304	2902	0,955	504	2901	0,954
105	2822	0,881	305	2909	0,954	505	2906	0,954
106	2822	0,881	306	2915	0,955	506	2910	0,954
107	2827	0,879	307	2909	0,955	507	2912	0,954
108	2825	0,879	308	2913	0,954	508	2907	0,954
109	2818	0,881	309	2912	0,955	509	2903	0,954
110	2821	0,881	310	2917	0,955	510	2903	0,954
111	2820	0,881	311	2919	0,954	511	2906	0,954
112	2820	0,881	312	2908	0,955	512	2906	0,954
113	2818	0,881	313	2911	0,955	513	2911	0,955
114	2816	0,881	314	2914	0,955	514	2911	0,955

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
115	2821	0,88	315	2913	0,954	515	2911	0,954
116	2820	0,882	316	2918	0,954	516	2905	0,954
117	2820	0,88	317	2913	0,954	517	2909	0,954
118	2821	0,88	318	2915	0,954	518	2909	0,954
119	2821	0,88	319	2913	0,954	519	2910	0,954
120	2822	0,88	320	2912	0,954	520	2910	0,954
121	2875	0,925	321	2916	0,95	521	2909	0,95
122	2876	0,929	322	2930	0,953	522	2929	0,953
123	2874	0,935	323	2923	0,954	523	2924	0,954
124	2882	0,932	324	2924	0,955	524	2919	0,955
125	2878	0,932	325	2917	0,955	525	2920	0,955
126	2871	0,93	326	2922	0,955	526	2924	0,955
127	2879	0,932	327	2927	0,956	527	2921	0,956
128	2869	0,929	328	2919	0,956	528	2911	0,956
129	2878	0,93	329	2918	0,956	529	2916	0,956
130	2867	0,928	330	2923	0,955	530	2920	0,955
131	2865	0,926	331	2910	0,955	531	2919	0,955
132	2859	0,927	332	2914	0,955	532	2916	0,955
133	2867	0,928	333	2919	0,955	533	2920	0,955
134	2860	0,927	334	2927	0,955	534	2919	0,955
135	2860	0,925	335	2921	0,955	535	2918	0,955
136	2864	0,926	336	2925	0,955	536	2925	0,955
137	2870	0,927	337	2923	0,955	537	2919	0,955
138	2868	0,928	338	2906	0,955	538	2917	0,955
139	2868	0,927	339	2916	0,955	539	2910	0,954
140	2868	0,927	340	2913	0,955	540	2917	0,955
141	2865	0,928	341	2922	0,955	541	2915	0,955
142	2863	0,927	342	2903	0,955	542	2919	0,955
143	2863	0,928	343	2906	0,955	543	2906	0,955
144	2860	0,926	344	2907	0,955	544	2910	0,955
145	2859	0,926	345	2914	0,955	545	2908	0,955
146	2863	0,926	346	2910	0,955	546	2914	0,955
147	2861	0,926	347	2913	0,954	547	2914	0,954
148	2859	0,925	348	2915	0,955	548	2914	0,954
149	2856	0,926	349	2908	0,954	549	2915	0,955
150	2856	0,926	350	2913	0,954	550	2915	0,954
151	2859	0,927	351	2914	0,954	551	2909	0,955
152	2859	0,927	352	2912	0,955	552	2909	0,954
153	2863	0,928	353	2916	0,955	553	2909	0,954
154	2863	0,928	354	2913	0,954	554	2900	0,955
155	2863	0,927	355	2915	0,954	555	2916	0,954
156	2864	0,929	356	2914	0,954	556	2905	0,954

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG	Lösung	anzFT	SG
157	2866	0,928	357	2917	0,954	557	2913	0,954
158	2866	0,927	358	2916	0,954	558	2915	0,954
159	2866	0,927	359	2919	0,954	559	2911	0,954
160	2866	0,927	360	2912	0,954	560	2912	0,954
161	2882	0,926	361	2910	0,95	561	2908	0,95
162	2877	0,931	362	2918	0,953	562	2919	0,953
163	2877	0,935	363	2919	0,954	563	2924	0,954
164	2883	0,932	364	2917	0,955	564	2917	0,954
165	2878	0,932	365	2915	0,955	565	2919	0,955
166	2876	0,931	366	2917	0,955	566	2917	0,955
167	2880	0,932	367	2918	0,955	567	2924	0,955
168	2867	0,928	368	2914	0,956	568	2925	0,956
169	2885	0,93	369	2919	0,956	569	2912	0,956
170	2865	0,928	370	2916	0,956	570	2923	0,956
171	2859	0,926	371	2907	0,955	571	2911	0,955
172	2861	0,926	372	2909	0,955	572	2916	0,955
173	2870	0,928	373	2919	0,955	573	2918	0,955
174	2863	0,927	374	2922	0,955	574	2923	0,955
175	2865	0,927	375	2915	0,955	575	2916	0,955
176	2870	0,927	376	2912	0,955	576	2926	0,955
177	2870	0,927	377	2915	0,955	577	2925	0,955
178	2871	0,928	378	2908	0,955	578	2909	0,955
179	2872	0,927	379	2913	0,955	579	2913	0,955
180	2871	0,927	380	2914	0,955	580	2919	0,955
181	2867	0,928	381	2907	0,955	581	2911	0,954
182	2863	0,927	382	2904	0,955	582	2912	0,955
183	2864	0,928	383	2902	0,955	583	2906	0,955
184	2863	0,926	384	2901	0,954	584	2916	0,955
185	2860	0,926	385	2906	0,954	585	2909	0,954
186	2864	0,926	386	2910	0,954	586	2913	0,955
187	2863	0,926	387	2912	0,954	587	2913	0,954
188	2857	0,925	388	2907	0,954	588	2915	0,955
189	2858	0,926	389	2903	0,954	589	2915	0,954
190	2858	0,926	390	2903	0,954	590	2918	0,955
191	2860	0,927	391	2906	0,954	591	2905	0,954
192	2863	0,927	392	2906	0,954	592	2913	0,955
193	2866	0,928	393	2911	0,955	593	2918	0,955
194	2866	0,928	394	2911	0,955	594	2909	0,955
195	2865	0,927	395	2911	0,954	595	2919	0,955
196	2868	0,927	396	2905	0,954	596	2907	0,954
197	2870	0,928	397	2909	0,954	597	2910	0,954
198	2868	0,928	398	2909	0,954	598	2914	0,954

Weiter auf der nächsten Seite

Lösung	**anzFT**	**SG**	**Lösung**	**anzFT**	**SG**	**Lösung**	**anzFT**	**SG**
199	2867	0,927	399	2910	0,954	599	2918	0,954
200	2866	0,928	400	2910	0,954	600	2911	0,953

Tabelle A.3.: Zahlenwerte für die in der Abbildung 5.24 (Vergleich von Anzahl Fahrzeugtransporte und Servicegrad) dargestellten Werte (anzFT: Anzahl Fahrzeugtransporte, SG: Servicegrad)

B. Hilfsmittel

Im Folgenden sind die für diese Arbeit verwendeten Hilfsmittel aufgelistet:

- Adobe Illustrator
- CPLEX 10.100
- Excel 2007
- Latex
- Standard-PC: Pentium D (dual core) 3 GHz Intel Prozessor, 4 GB Arbeitsspeicher
- Visio 2003
- Visual Studio 2008