

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Dissertation entstand am Institut für Transportlogistik der Fakultät Maschinenbau an der Technischen Universität Dortmund aus einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekt mit dem Titel: *Exakte und heuristische Verfahren für unsichere und zeitabhängige Hub-Location-Probleme mittels quadratischer Optimierung*¹. Neben dem Institut für Transportlogistik war auch der Lehrstuhl für Diskrete Optimierung der Fakultät Mathematik der Technischen Universität Dortmund am Projekt beteiligt.

1.1 Einführung in die Problemstellung

Eine zentrale Aufgabenstellung der Transportlogistik ist, Frachtgut kosteneffizient zwischen Quellen und Senken zu befördern. In vielen transportlogistischen Anwendungsfällen sind die Sendungsmengen auf einer Quelle-Senke-Verbindung zu gering, um einen Direktverkehr eines Fahrzeuges zu rechtfertigen. Verkehre werden daher in logistischen Umschlagpunkten aufgebrochen mit dem Ziel, durch Konsolidierung mit anderen Quelle-Senke-Verbindungen eine bessere Auslastung der Fahrzeuge zu erreichen. Die Gesamtheit der erforderlichen Ortsveränderungen wird in einem logistischen Netzwerk modelliert. Neben den Quellen und Senken bilden Umschlagpunkte die Knotenmenge. Zwei Knoten werden durch eine Kante verbunden, falls die direkte Transportverbindung zwischen diesen Knoten genutzt wird. Bestimmende Faktoren für die Struktur eines transportlogistischen Netzes sind somit die Standortwahl der Umschlagpunkte sowie die Entscheidung über die Verwendung von Transportverbindungen. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Entscheidungen bei der strategischen Planung von Transportnetzen bietet sich der Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren an.

Eine Einflussgröße bei der Optimierung von strategischen Transportnetzplanungsproblemen ist insbesondere das Transportaufkommen zwischen den Quellen und Senken. Je nach Struktur der Sendungsmatrix ergeben sich unterschiedliche Netzstrukturen. Bei wenigen Quellen entspricht die Planungsaufgabe einem Tourenplanungsproblem: Die Sendungen werden startend an den

¹Förderkennzeichen: CL 318/14, BU 2313/2

Quellen in Rundtouren verteilt. Analog gilt dieses Prinzip bei wenigen Senken: Die Sendungen werden in Touren an den Quellen gesammelt.

Bei einer dichten Sendungsmatrix, d. h. mit fast nur Nichtnulleinträgen, versendet (fast) jede Quelle zu (fast) jeder Senke, so dass sich allein aus zeitlichen Anforderungen eine andere Ausgangslage ergibt. Aufgrund der hohen Anzahl an Verbindungen wird das resultierende Transportnetz als flächendeckend bezeichnet. Ein Direktverkehr zwischen allen Nachfragepunkten ist eine Möglichkeit, die Quellen und Senken miteinander zu verbinden. Solche Netze weisen zwar kurze Transportzeiten auf, sind jedoch aufgrund der quadratischen Anzahl an Verbindungen kostspielig. Der Grund hierfür ist, dass durch den Skaleneffekt im Verkehrswesen eine große Menge an Transporten mit kleinem Sendungsaufkommen deutlich teurer ist als eine kleine Menge an Transporten mit großem Sendungsaufkommen.

Dieser Grundgedanke – Skaleneffekte durch Transportbündelung verschiedener Sendungen zu erzielen – führt zur Einführung von Hub-and-Spoke-Netzen: An Knoten im logistischen Netzwerk werden Umschlaganlagen errichtet. Die Knoten mit dieser Umschlagfunktion werden als Hub bezeichnet und sind jeweils paarweise direkt verbunden. Die Spokes sind die restlichen Knoten im Netzwerk. Sie sind mindestens einem Hubknoten zugeordnet, so dass stets eine Transportverbindung zwischen jeder Quelle und jeder Senke verfügbar ist: Von der Quelle wird die Sendung zu einem ihr zugeordneten Hub geschickt. Der weiterführende Transport zum Ziel erfolgt über den Hubknoten, der mit der Senke verknüpft ist. Jede Sendung wird folglich zweimal, bei Zuordnung der Quelle und der Senke zu demselben Hubknoten einmal, innerhalb des Netzwerkes umgeschlagen. Abbildung 1.1 zeigt schematisch ein Hub-and-Spoke-Netzwerk. Das klassische Einsatzgebiet sind Transportnetze mit Teilladungsverkehren. Im Bereich der Transportlogistik trifft dies insbesondere bei Luft- (Jaillet et al., 1996) und Seefracht (Gelareh & Pisinger, 2011), im Einzelwagenverkehr (Sender & Clausen, 2013) sowie in Stückgut- (Cunha & Silva, 2007), Post- und Paketnetzen (Ernst & Krishnamoorthy, 1996) zu. Darüber hinaus finden sich Anwendungsfälle bei der Planung von Netzen des öffentlichen Verkehrs (Nickel et al., 2001) sowie in der Telekommunikation (Kliniewicz, 1998).

Für den Betrieb von Hub-and-Spoke-Netzen werden logistische Umschlaganlagen an den Hubknoten benötigt. Aufgrund der hohen Investitionskosten und der erforderlichen Zeitspanne zur Errichtung ist die Standortwahl von Hubs eine strategische Planungsentscheidung. Entscheidend für die Wahl von Hubstandorten sind Kenntnisse über die Sendungsströme im Netzwerk. Diese sind jedoch aufgrund des langen Planungsvorlaufs nicht bekannt und können daher nur geschätzt werden. Eine weitere Herausforderung bei der strategischen Planung von Hub-and-Spoke-Netzen ist, dass die Sendungsmengen auf einer Transportverbindung zwischen Quelle und Senke von der Kundennachfrage abhängig sind. Üblicherweise lassen sich in vielen transportlogistischen Anwendungsfällen deutliche Schwankungen in Sendungsnachfrage beobachten. Diese äußern sich oft in wochentags- oder saisonabhängigen Mustern. Transportdienstleister können die auftretenden Nachfrageschwankungen nur in einem stark begrenzten Rahmen steuern, so dass es bereits in der

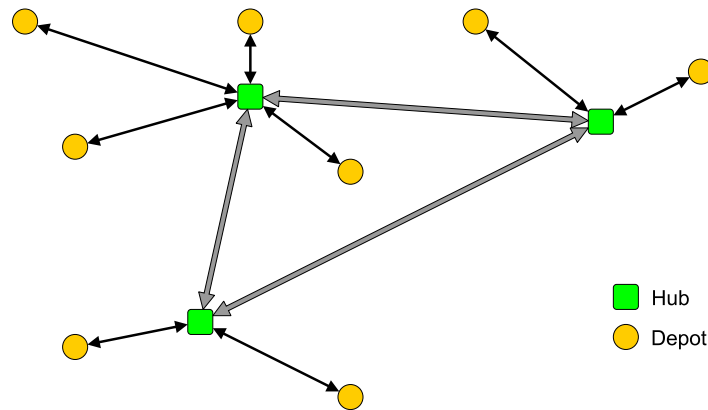


Abbildung 1.1: Hub-and-Spoke-Netz

strategischen Planungsphase vorteilhaft ist, verschiedene Nachfrageszenarien zu berücksichtigen, anstatt die externen Einflüsse für eine deterministische Modellierung zu mitteln.

Trotz dieser starken Bedeutung von Unsicherheiten für die strategische Planung von Hub-and-Spoke-Netzen nehmen Nachfrageschwankungen in über 30 Jahren Forschung zu Hub-Location-Problemen insbesondere im Vergleich zu der deterministischen Formulierung nur eine untergeordnete Rolle ein (vgl. Alumur & Kara, 2008; Campbell & O’Kelly, 2012). Die hierzu in der Literatur vorgestellten Verfahren gehen zumeist nicht auf die mathematische Struktur der Unsicherheiten ein, so dass nur kleine bis mittlere Instanzen erfolgreich gelöst werden (vgl. Alumur et al., 2012; Contreras, Cordeau et al., 2011b; Qin & Gao, 2017). Weiterhin erfolgt in allen Veröffentlichungen zu Nachfrageschwankungen in Hub-and-Spoke-Netzen die Modellierung der Transportkosten stets als lineare Funktion des Transportvolumens. Diese proportionale Abhängigkeit stellt in der Praxis eine stark vereinfachende Annahme dar, weil die Auslastungen der Fahrzeuge bei der Berechnung der Transportkosten unberücksichtigt bleiben (vgl. Meier & Clausen, 2014a). Zu Nachfrageschwankungen in einem Hub-Location-Modell mit fahrzeugabhängigen Transportkosten wurden allerdings bisher keine Veröffentlichungen publiziert. Gerade hier ist die Betrachtung von Schwankungen in den Sendungsvolumina besonders wichtig, denn bei fahrzeugabhängigen Kosten tendieren Optimierungsalgorithmen dazu, die Ladeeinheiten bestmöglich auszulasten. Wird vereinfachend von durchschnittlichen Sendungsvolumina ausgegangen, können bereits geringe Abweichungen in den Transportmengen einen Mehrbedarf an Fahrzeugen induzieren. Dieser wirkt sich bei Modellierungen mit fahrzeugabhängigen Transportkosten dann auch direkt auf das Planungsergebnis aus.

Um effiziente Optimierungsverfahren für Hub-Location-Probleme unter Nachfrageschwankungen zu entwickeln, lohnt ein Blick auf die mathematische Struktur der Nebenbedingungen. Bei genauerer Betrachtung ist bei Hub-Location-Modellen eine hierarchische Struktur in zwei Stufen zu erkennen. Die Erststufenentscheidung ist die Festlegung der Hubstandorte. Aufgrund des langen Planungshorizonts und der hohen Investitionskosten werden die Entscheidungen einmalig über

alle Nachfrageszenarien getroffen. Basierend auf dieser Standortwahl werden dann in der zweiten Stufe die Transportwege im Netzwerk geplant. Hier können für jedes einzelne Nachfrageszenario unterschiedliche Entscheidungen getroffen werden. In vielen Fällen ist das Problem auf der zweiten Stufe isoliert deutlich einfacher zu lösen, so dass sich Dekompositionsverfahren zur strategischen Netzplanung anbieten. Die Herausforderung besteht noch darin, die Informationen aus der zweiten Stufe dem übergeordneten erststufigen Optimierungsproblem mitzuteilen. Als eine Möglichkeit hierfür bieten sich Schnittebenen an, da diese für eine gegebene Standortwahl durch die Lösung des Problems auf der zweiten Stufe die Transportkosten dem Optimierungsverfahren mitteilen.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung mathematischer Verfahren zur strategischen Planung von Hub-and-Spoke-Netzen unter Nachfrageschwankungen. Im Fokus steht dabei, eine Lösung mit optimalem Zielfunktionswert für Instanzen realistischer Größe zu berechnen. Durch die Auswertung der errechneten Lösungen verbessert die vorliegende Arbeit das Verständnis der Auswirkungen von Nachfrageschwankungen in flächendeckenden Transportnetzen.

Die wesentlichen Beiträge hierfür werden im Folgenden beschrieben:

- Die Einführung des Konzepts der *variablen Zuordnung* ermöglicht durch eine veränderte Zuordnung der Depot- zu den Hubknoten auf unterschiedliche Nachfrageszenarien zu reagieren. Die Analyse der Optimierungsergebnisse weist auf einen Einsparvorteil gegenüber konventionellen Zuordnungskonzepten hin.
- Die Betrachtung von *fahrzeugabhängigen Kosten* bereits bei der strategischen Planung unter Unsicherheiten führt zu einer realitätsnäheren Abbildung der anfallenden Transportkosten. Hierdurch kann ein genaueres Planungsergebnis als bei Verwendung einer klassischen Transportkostenfunktion erzielt werden.
- Durch die Nutzung eines *Dekompositionsverfahrens* wird das Optimierungsmodell in Teilprobleme unterteilt. Die Verwendung von Schnittebenen führt diese wieder in einer Formulierung zusammen. Dieses Verfahren berechnet rechnergestützt schneller Lösungen für die untersuchten Optimierungsprobleme als bei Verwendung von Standardsolvern.
- Eine Möglichkeit der *effizienten Berechnung der Schnittebenen* in polynomialer Zeit wird aufgezeigt. In dieser Arbeit wird bewiesen, dass die im Dekompositionsverfahren notwendigen Schnittebenen kombinatorisch ohne die Nutzung von kommerzieller Optimierungssoftware berechnet werden können. Diese Beschleunigung der Lösungsverfahren ermöglicht es, noch größere Instanzen bis zum Optimalwert zu lösen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit erfolgt nach der in Projekten zur Optimierung von logistischen Problemstellungen üblichen Vorgehensweise, wie in Clausen und Geiger (2013, S. 330) beschrieben und in Abbildung 1.2 schematisch dargestellt. Die vier Stufen sind hierbei die formale Systembeschreibung des Problems, die mathematische Modellierung, die Entwicklung von Optimierungsverfahren sowie die Analyse der erzielten Optimierungsergebnisse.

Im Anschluss an die Einführung in die Problemdarstellung dient Kapitel 2 „Planung von Transportnetzen“ zur Systembeschreibung des Untersuchungsgegenstands. Die Transportnetze werden hinsichtlich ihrer Struktur kategorisiert sowie die anfallenden Planungsaufgaben in Planungsebenen eingeordnet. Anschließend erfolgt eine Klassifikation der verschiedenen Problemformulierungen für Hub-and-Spoke-Netze. Das Kapitel schließt mit einem Literaturüberblick zur strategischen Planung dieser Netze mit einem Fokus auf die betrachteten Transportkostenfunktionen sowie die untersuchten Unsicherheiten.

Zum Verständnis der nachfolgenden Kapitel werden in Kapitel 3 „Grundlagen der mathematischen Optimierung“ die benötigten Grundkenntnisse der linearen, der diskreten und der stochastischen Optimierung eingeführt. Ein Schwerpunkt wird hierbei auf die Konzeption von Dekompositionsverfahren gelegt.

Mathematische Optimierungsmodelle zur strategischen Planung von Hub-and-Spoke-Netzen werden in Kapitel 4 „Modellierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit einfacher Zuordnung“ formuliert. Dabei werden für verschiedene Problemvarianten binäre quadratische Formulierungen eingeführt. Anschließend werden zur Reformulierung in gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle

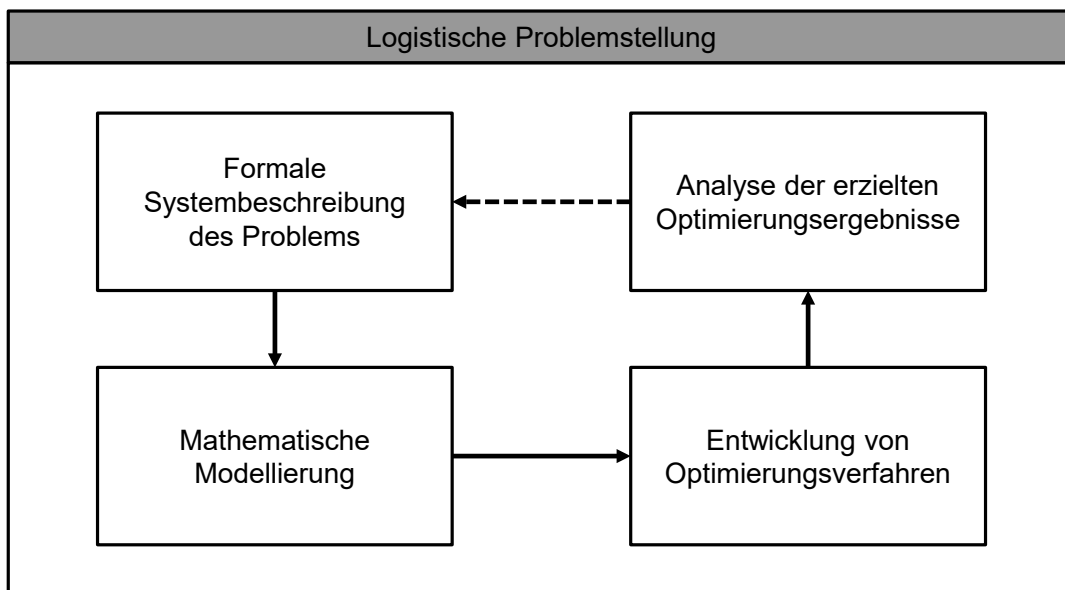


Abbildung 1.2: Vorgehen in Optimierungsprojekten (vgl. Clausen und Geiger (2013, S. 330))

unterschiedliche aus der Literatur bekannte Linearisierungsstrategien vorgestellt. Aufgrund der strukturellen Unterschiede in der Transportkostenstruktur werden die Modellierungen unter Verwendung klassischer bzw. fahrzeugabhängiger Transportkostenfunktionen getrennt beschrieben.

In Kapitel 5 „Nachfrageschwankungen in Hub-and-Spoke-Netzen mit einfacher Zuordnung“ werden die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Optimierungsmodelle durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Nachfragewerten erweitert. Das Konzept der variablen Zuordnung wird an dieser Stelle sowohl für klassische als auch für fahrzeugabhängige Transportkostenfunktionen eingeführt.

Kapitel 6 „Dekompositionsverfahren für Hub-Location-Probleme mit einfacher Zuordnung“ dient der Entwicklung eines Optimierungsverfahrens zur strategischen Planung von Hub-and-Spoke-Netzen. Dabei werden die Dekomposition des Optimierungsmodells in Teilprobleme und die Berechnung der Schnittebenen beschrieben. Die unterschiedlichen Formulierungen erfordern je nach vorliegender Transportkostenfunktion verschiedene Schnittebenenverfahren. Daher werden diese getrennt voneinander beschrieben.

Die vorgestellten Optimierungsverfahren werden in Kapitel 7 „Analyse der Optimierungsergebnisse“ numerischen Tests unterzogen. Nach Beschreibung der verwendeten Instanzen auf Basis von Praxisdaten erfolgt eine rechnergestützte Auswertung. Hierbei werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schnittebenenverfahren mit dem Lösungsverhalten kommerzieller Optimierungssoftware verglichen. Weiterhin werden unterschiedliche Zuordnungskonzepte bei Hub-and-Spoke-Netzen unter Nachfrageschwankungen einer Analyse unterzogen.

Abschließend fasst Kapitel 8 die dargestellten Inhalte zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen zur strategischen Planung von Hub-and-Spoke-Netzen unter Nachfrageschwankungen.