

# Kurzzusammenfassung

Die strategische Planung von Hub-and-Spoke-Netzen ist ein transportlogistisches Optimierungsproblem: Eine Menge an Depots soll untereinander Sendungen austauschen. Direktverbindungen von jedem Depot zu jedem anderen Depot sind in vielen Anwendungsfällen zu kostspielig. Stattdessen werden einige wenige Hubstandorte zur Konsolidierung der Sendungsströme errichtet. Die Sendungen werden auf ihrem Weg vom Start- zum Zieldepot über bis zu zwei Hubknoten geroutet. Dieses Vorgehen lohnt sich, falls die Skaleneffekte durch Transportbündelung die erforderlichen Kosten zur Errichtung und zum Betrieb der Hubstandorte übersteigen.

Eine Herausforderung bei der strategischen Planung von Transportnetzen ist aufgrund schwankender Transportmengen auf den einzelnen Quelle-Senke-Verbindungen die Integration von verschiedenen Nachfrageszenarios. Die Hubstandortwahl ist klarerweise aufgrund der hohen Investitionskosten über den gesamten Planungszeitraum festgelegt. Die Zuordnungen von den Depot zu den Hubknoten können hingegen auch dynamisch an aktuelle Nachfrageszenarien angepasst werden. Für dieses Konzept der variablen Zuordnung konnten durch die entwickelten Optimierungsverfahren auf den untersuchten Praxisdaten Verbesserungen des Zielfunktionswertes um bis zu 8,7% im Vergleich zu einer festen Zuordnung über alle Nachfrageszenarien erzielt werden.

Ein wesentlicher Kritikpunkt bei der klassischen Modellierung des Skaleneffektes durch Transportbündelung ist die lineare Abhängigkeit zwischen Transportmenge und -kosten. In Transportnetzen dominieren jedoch die Kosten der eingesetzten Fahrzeuge, so dass eine Formulierung mit fahrzeugabhängigen Transportkosten realitätsnäher ist. Ein entscheidendes Detail bei der Modellbildung ist die Abhängigkeit der Transportmenge im Hauptlauf von den Zuordnungen sowohl im Vor- als auch im Nachlauf. Durch die Konjunktion der entsprechenden Entscheidungsvariablen resultieren quadratische Terme in den mathematischen Optimierungsmodellen für die klassische und fahrzeugabhängige Transportkostenfunktion.

Zur Lösung von größeren Instanzen des Optimierungsproblems wurden Dekompositionsverfahren entwickelt. Durch Zerlegung in eine zweistufige Formulierung werden die Entscheidungsvariablen sowohl auf verschiedenen Planungsebenen als auch zwischen den unterschiedlichen Nachfrageszenarien entkoppelt. Ein Vorteil hierbei ist, dass in der Formulierung mit klassischen Transportkosten die quadratischen Terme aufgelöst werden. Es konnte ebenso gezeigt werden, dass die durch die Dekomposition entstehenden Teilprobleme in polynomieller Laufzeit lösbar sind. Die Auswertung der numerischen Experimente legt dar, dass durch die vorgeschlagenen Dekompositions-

verfahren optimale Lösungen um ein Vielfaches schneller als unter Verwendung von klassischer Optimierungssoftware gefunden werden. Es ist somit möglich, selbst unter Berücksichtigung von Nachfrageschwankungen Instanzen mit bis zu 200 Knoten bei klassischer und mit zu 100 Knoten bei fahrzeugabhängiger Transportkostenfunktion bis zum Optimalwert zu lösen.

# Abstract

The strategic planning of hub-and-spoke networks is a well-known optimization problem in transport logistics: A large number of depots are supposed to exchange shipments mutually. Direct links from each depot to every other depot are too costly in most cases. Instead, a few hub locations are established to consolidate the flow of shipments. The shipments are routed from the start depot to the destination depot via up to two hub nodes. This approach is worthwhile if the economies of scale resulting from transport bundling exceeds the costs required to establish and to operate the hub locations.

One challenge in strategic planning of transport networks is the integration of different demand scenarios due to fluctuating transport volumes on the individual source-sink connections. The choice of hub location is clearly determined for the entire planning period due to the high investment costs. However, the assignments from the depot to the hub nodes can also be adjusted more dynamically to current demand scenarios. For this concept of variable allocation, the developed optimization procedures improved the objective function value by up to 8.7% compared to a fixed allocation on the testbed.

A major point of criticism in the classical modeling of the economies of scale due to transport bundling is the linear dependence between transport volume and costs. However, the costs of used vehicles dominate in transportation networks. Therefore, a formulation with vehicle-dependent transport costs is more realistic. A crucial detail in the modeling of hub-and-spoke-networks is that the transport volume on hub-to-hub-links depend simultaneously on the allocations in the pre-carriage and onward-carriage. By conjunction of the corresponding decision variables, quadratic terms result in the mathematical optimization models for the classical and vehicle-dependent transport cost function.

Decomposition methods are developed to solve larger instances of the optimization problems. By decomposition into a two-stage formulation, the decision variables are decoupled both on different planning levels and on different demand scenarios. This is in particular advantageous for the formulation with classical transport costs as the quadratic terms are resolved. The author of the thesis also shows that the subproblems resulting from decomposition can be solved in polynomial time. The evaluation of the numerical experiments shows that the proposed decomposition methods provide optimal solutions much faster than classical optimization software. Thus, instances with up to 200 nodes can be solved to an optimum value in the case of the classical transport

cost function, even taking demand fluctuations into account. For the vehicle-dependent transport cost function, instances with up to 100 nodes are solved to an optimum value.