

DISS ETH NO. 19046

Investigation of space-time structures in public transport networks and their optimization

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

BERNHARD CORNELIUS ALT

Diplom-Maschinenbauingenieur, Universität Siegen

born 11th January, 1975

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ulrich Weidmann, examiner

Prof. Dr. Markus Friedrich, co-examiner

2010

Abstract

A method for public transport (PT) network optimization was developed that considers the entire PT chain from door-to-door. The relatively small number of network evaluations of the approach enables the use of comparable realistic transport models. Consequently, PT systems can be evaluated more realistically than in current approaches without significantly increasing computing times.

The approach optimizes different speed levels, e.g., bus and tram, regional train, etc., sequentially, starting with the fastest service. To reduce computing times, each speed level for the geographic area under consideration is divided into several planning areas. If computing times for planning areas are short enough, computing times for network design in entire areas can be handled as well since they are only linearly dependent on the total size of the area based on the suggested approach. For each planning area, the approach uses a network reduction process (also called guided stochastic search heuristic) that requires comparatively few network evaluations. The network reduction process starts with a network of the shortest lines. Then, lines are deleted, merged or shortened sequentially using the ant colony optimization algorithm. A genetic algorithm simultaneously optimizes service frequencies and vehicle sizes. During the network reduction process, total operating and travel time costs are minimized. For network evaluations, a headway-based stochastic multiple route assignment is used.

The reduction approach was compared to existing approaches by applying it to Mandl's Swiss benchmark problem. Based on the comparison, it can be stated that the approach developed shows promising results in terms of optimized fleet size and user costs.

The multiple area approach and the reduction process were tested together in a larger case study in the city of Winterthur, Switzerland. The radial PT network was updated in 2007 using a planner's experience. Mainly, four radial lines were merged into through lines. The reduction process was able to additionally reduce total costs by around 3%.

To ensure that such small changes can bring sound improvements, the accuracy of the OD matrix and the assignment model has to be sufficient. The relative error of passenger flows at maximum load sections of PT lines should not be higher than 5% for each speed level. In the future, data available from electronic ticketing systems will make it possible to validate and improve assignment models and achieve such a higher level of assignment quality.

While keeping total costs at one level, the variability of time costs (ca. 7%) and of operating costs (ca. 20%) could be used by politics to decide how the different costs of PT are covered and by whom. Hereby, the effects on modal split should be considered.

The nearly shortest PT lines are suited to high-demand relations. For lower demand relations, circuitous PT lines with still acceptable headway are advantageous. It turned out that a third class of PT lines should be considered: connecting important *transfer nodes* with each other. This class of PT lines shows forms similar to the magnetic streamlines of a field that connects several magnetic poles.

The multiple area approach was tested by optimizing the slowest speed level (bus level). Several speed levels could not be optimized due to the long computing times for network evaluations. Results from optimizing one single planning area are only slightly better than from just sequentially optimizing the same area in two steps (two planning areas). Furthermore, it could be shown that it is helpful to have a kind of “ideal infrastructure network” to compare and evaluate PT networks on given infrastructures.

For future research, it can be stated that schedule optimization is an important part of PT network design and should be fully integrated. In this case, the integration of stop placement can show its full effects. In placing stops, travel times can be adjusted. The integration of schedule optimization allows using schedule-based assignments to model passenger behavior. First, the assignment becomes more accurate. Second, travel times can be reduced while offering coordinated transfers, especially for less loaded lines with longer headways. Schedule-based assignment allows the consideration of more frequent service close to the most loaded section of a line. One important condition for realistic schedule-based assignments is that delay distributions should be considered, at least on an average level.

Numerous PT network and schedule design studies have been conducted to date. Due to the complexity of PT network design and the variety of approaches to be performed, it is difficult to define benchmark problem sets and standard transport models that allow different solutions to be compared. However, simplifications in network design methods and in the transport models used during network design require the application of benchmark problems in order to compare the results of different network design methods. Therefore, the basis for all benchmark problems should be an accurate transport model. Benchmark problem sets and standard transport models should be simple enough to keep the amount of required data low, but complex enough to allow a comparison of PT network design methods under realistic conditions. For the future, the development of new benchmark problems will be of great interest. In particular, larger benchmark problems and benchmark problems that cover the entire PT chain from door-to-door should be considered.

To summarize, the reduction approach in combination with the ant colony optimization is promising, as can be seen from the results for Mandl's benchmark problem, as well as the solutions for the more realistic study in Winterthur. However, in the case of Winterthur, network evaluations were about a factor 10 too slow to be able to get satisfying results. In combination with the accuracy of the transport model, this still prevented being able to answer questions concerning, for example, optimal parameters for a given demand pattern such as the number of speed levels, the line distances and the *transfer node* distances.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zum Design öffentlicher Verkehrs- (ÖV-) netze entwickelt, das die komplette Reisekette von Tür zu Tür berücksichtigt. Die relativ geringe Anzahl an Netzbewertungen ermöglicht es, realistischere Verkehrsmodelle als in derzeit vorhandenen Ansätzen in Kombination mit flexiblen Linienführungen zu verwenden. Folglich können Systeme des ÖV realitätsnäher bewertet werden ohne die Rechenzeiten bedeutend zu verlängern.

In dem vorgestellten Ansatz werden, beginnend mit dem schnellsten Verkehrsangebot, die unterschiedlichen Geschwindigkeitsebenen nacheinander optimiert. Die einzelnen Geschwindigkeitsebenen werden in Untergebiete gegliedert, um weitere Rechenzeit einzusparen. Wenn die Rechenzeiten für einzelne Untergebiete ausreichend kurz sind, können grössere Gebiete gleichfalls optimiert werden, da der Aufwand Dank der sequenziellen Optimierung der Untergebiete nur noch linear mit der Gebietsgrösse ansteigt. Auf jedes Untergebiet wird ein Netzreduktions-Ansatz angewandt, der mit vergleichsweise wenigen Netzbewertungen auskommt. Der Netzreduktions-Prozess beginnt mit einem Netz kürzester Linien. Als schlecht bewertete Linien werden mit Hilfe des Ameisenalgorithmus nacheinander gelöscht, mit anderen Linien verbunden oder gekürzt. Ein genetischer Algorithmus optimiert gleichzeitig die Takte und die Fahrzeuggrössen. Während des Netzreduktions-Prozesses werden die Gesamtbetriebs- und die Reisezeitkosten minimiert. Zur Netzbewertung wird eine Takt- und Wahrscheinlichkeitsbasierte Umlegung von PTV VISUM [PTV07] angewandt.

Der Netzreduktions-Prozess wurde durch einen Test an Mandls Benchmarkproblem mit anderen Ansätzen verglichen. Bezüglich der Anzahl an Fahrzeugen und der Nutzerkosten wurden viel versprechende Ergebnisse erzielt.

Der Mehrgebiets-Ansatz und der Netzreduktions-Prozess wurden an einer grösseren Fallstudie der Stadt Winterthur im Kanton Zürich getestet. Das radiale ÖV-Netz wurde in 2007 mit Hilfe planerischer Erfahrung angepasst. Hauptsächlich wurden 4 Radiallinien zu zwei Durchmesserlinien verknüpft. Mit dem Netzreduktions-Prozess konnten die Gesamtkosten des Netzes um weitere 3% reduziert werden.

Um sicher zu gehen, dass solch kleine Verbesserungen in der Tat Verbesserungen darstellen, muss die Genauigkeit der Quell-Ziel-Matrix und die des Umlegungsmodells hoch genug sein. Die Fahrgastflüsse an den maximal belasteten Querschnitten sollten für jede Geschwindigkeitsebene einen durchschnittlichen relativen Fehler von unter 5% aufweisen. In

Zukunft werden solche Genauigkeiten der Verkehrsmodelle dank elektronischer Ticketsysteme erreichbar sein.

Solange die Gesamtkosten auf einem ähnlichen Niveau gehalten werden, steht die Variabilität der Zeitkosten (ca. 7%) und die der Betriebskosten (ca. 20%) als Entscheidungsspielraum der Politik zur Verfügung. Diese kann entscheiden, wie die Kosten des ÖV verteilt werden und wer sie trägt. Allerdings sollten hierbei die Effekte auf den Modal-Splitt Berücksichtigung finden.

Nahezu kürzeste Linien im ÖV sind passend für stark nachgefragte Relationen. Für schwächer nachgefragte Relationen sind weniger direkte Linien mit einem akzeptablen Takt geeignet. Es hat sich gezeigt, dass eine dritte Klasse von Linien Berücksichtigung beim Netzdesign finden sollte, die wichtige Umsteigeknoten miteinander verbindet. Diese Klasse weist ähnliche Formen auf, wie sie bei den Feldlinien in Magnetfeldern zwischen mehreren Polen auftreten.

Der Mehrgebiets-Ansatz wurde bei der Optimierung der langsamsten Geschwindigkeitsebene (Busebene) getestet. Mehrere Geschwindigkeitsebenen konnten wegen der langen Rechenzeiten für die Netzbewertungen nicht getestet werden. Die Ergebnisse bei der Optimierung eines Untergebiets waren nur geringfügig besser als die sequenzielle Optimierung desselben Untergebiets in zwei Schritten. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass es hilfreich ist, eine art „ideales Infrastrukturnetz“ zu verwenden, mit dem ÖV-Netze auf existierenden Infrastrukturen miteinander verglichen werden können.

Für zukünftige Forschungsarbeiten kann gesagt werden, dass die Fahrplanoptimierung ein wichtiger Teil des Designs von ÖV-Netzen ist und voll integriert werden sollte. In diesem Fall kann auch die Haltestellen-Platzierung ihren vollen Effekt durch Anpassung der Fahrzeiten entfalten. Eine volle Integration der Fahrplanoptimierung ermöglicht gleichzeitig eine Benützung der fahrplanbasierten Umlegung, um das Fahrgastverhalten zu modellieren. Erstens wird die Umlegung genauer und zweitens können die Reisezeiten durch koordinierte Anschlüsse verkürzt werden, insbesondere für schwach ausgelastete Linien mit langen Takten. Fahrplanbasierte Umlegung ermöglicht es auch, in der Nähe des maximal belasteten Abschnitts einer Linie kürzere Takte anzubieten. Eine fahrplanbasierte Umlegung setzt allerdings die Berücksichtigung einer Verspätungsverteilung voraus, zumindest, auf einem durchschnittlichen Niveau.

Bis heute wurde bereits eine Vielzahl an Studien zum Design von ÖV-Netzen unternommen. Aufgrund der Komplexität des Designs von ÖV-Netzen und der Vielfalt an möglichen Design-Ansätzen ist es schwierig, Benchmarkprobleme und Standardverkehrsmodelle zu entwickeln mit denen die Lösungen der verschiedenen Ansätze miteinander verglichen werden können.

Vereinfachungen in den Netzdesignmethoden und in den für das Netzdesign benutzten Verkehrsmodellen erfordern jedoch die Verwendung von Benchmarkproblemen zum Vergleich der Lösungen verschiedener Ansätze. Ein genaues Verkehrsmodell sollte dabei die Basis der verwendeten Benchmarkprobleme bilden. Benchmarkprobleme und Standardverkehrsmodelle sollten einfach genug sein, um den erforderlichen Datenaufwand gering zu halten, aber komplex genug, um Methoden zum Design von ÖV-Netzen unter realistischen Bedingungen miteinander zu vergleichen. In Zukunft wird die Entwicklung von Benchmarkproblemen von grossem Interesse sein, insbesondere von grösseren Problemen und solchen, die die gesamte Reisekette von Tür zu Tür berücksichtigen.

Zusammengefasst zeigt der Reduktionsprozess in Kombination mit dem Ameisenalgorithmus viel versprechende Ergebnisse, wie aus den Lösungen für Mandls Benchmarkproblem als auch aus denjenigen für die realitätsnähere Studie der Stadt Winterthur hervorgeht. Leider waren im Falle Winterthurs die Netzbewertungen mindestens um einen Faktor 10 zu langsam um zufrieden stellende Ergebnisse zu erhalten. Die Rechengeschwindigkeit des Verfahrens und die Genauigkeit des Verkehrsmodells verhinderte noch immer eine Beantwortung von Fragen nach optimalen Parametern für bestimmte Regionen, wie der Anzahl an Geschwindigkeitsebenen, den Geschwindigkeiten der jeweiligen Geschwindigkeitsebenen, den Abständen von Linien und den Abständen von Umsteigeknoten.