

Diss. ETH No. 16398

Stability of Timetables and Train Routings through Station Regions

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
THOMAS MICHAEL HERRMANN
Dipl. Math. ETH

born 31st July 1975
citizen of Rohrbach (BE)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Hans-Jakob Lüthi, examiner
Prof. Dr. Ulrich Weidmann, co-examiner
Prof. Dr. Kay Axhausen, co-examiner

2006

Abstract

During the last few years, railway traffic has increased considerably; moreover, it is expected that railroad transportation will further grow for both passenger and freight transportation. These developments create needs to optimize both the utilization of the existing infrastructure and the coordination tasks inside the railroad company. Thanks to developments in computer science, optimization techniques, and intelligent resource management, railway schedules with increased frequencies can be generated nowadays. Railway operators expect the capacity bottlenecks of the railway system especially near main stations, since main train lines are intersecting there. Tight timetables, however, are exposed to train delays to a greater extent than less dense schedules.

The thesis at hand describes stability measures of timetables and the highly related topic of the search for train routings within station regions. As the quality of service should not suffer when introducing new train services, the question of the stability of a timetable is of crucial interest while designing denser timetables. Unforeseen events may require partial modifications of the plans in real-time and therefore re-scheduling procedures should be already taken into account when designing a new timetable. Moreover, re-scheduling procedures should be as easy to implement as possible. Fundamentally, the timetable's ability to absorb some disturbances trades off against full exploitation of available capacity. With the help of evaluation functions, timetables can be examined regarding their likelihood to fail, their sensitivity against disruptions of the schedule, or their efficiency to recover from deviations.

Separating the problem of train routings in exact topologies from the saturation of the available capacity and the generation of a timetable in an aggregated topology results in a two level approach. On the upper level a timetable for an intended train

service is generated using an aggregated topology. The task on this level is to develop a timetable whose periodicity is as small as possible in order to use the network to full capacity while respecting safety restrictions and the intention of the train service. On the lower level, exact topologies are used in order to decide feasibility of the previously generated, tentative timetables and to analyze the derived schedules. As this thesis mainly deals with stability of timetables, it is consistently assumed that a timetable for the aggregated topology is available.

By examining the routing alternatives, which are tremendously high in station regions, the feasibility problem is modeled as an independent set problem. The node set corresponds to all possible routes of the trains and two nodes are connected by an edge, if their corresponding routes are mutually exclusive. The independent set problem is then solved by applying a fixed point heuristic.

The probability that the routes of two different trains are incompatible can be calculated by assuming certain delay patterns for arriving and departing trains. The previous graph model is then extended by the introduction of additional edges whose weights are set to the probability that the corresponding routes are incompatible. Stability measures are then expressed as certain properties of the extended graph. Moreover, a stability measure that is independent of any delay distributions is also introduced. In a second step, these stability measure functions are used to state different optimization problems that are then solved by a random restart local search heuristic.

In order to test the methodology, the Bern station region has been used. Depending on the applied optimization problem and the underlying delay patterns, the trains are scheduled to travel on different routes through the network. Results show that the tighter the timetable becomes the more important is the design of the railway system and the coordination of suitable track topologies, meaningful train service intentions, the dense schedules, elaborate routings, and actively managed train delays.

Zusammenfassung

Die Beförderung von Personen und Gütern auf der Schiene hat in den letzten Jahren stark zugenommen; gemeinhin wird erwartet, dass dieser Trend in den nächsten Jahren anhält. Diese Entwicklung führt dazu, dass nicht nur die Auslastung der bestehenden Infrastruktur erhöht werden muss, sondern dass auch die Betriebsabläufe innerhalb eines Bahnunternehmens optimiert werden müssen. Dank den Fortschritten in der Computertechnologie, den Optimierungsmethoden und dem Management von Ressourcen können heute schon Fahrpläne mit erhöhten Zugfrequenzen generiert werden. Die Bahnunternehmen erwarten deshalb auf Grund der vielen Zugfahrten, dass insbesondere in der Nähe von Hauptbahnhöfen und Knotenpunkten die vorhandene Kapazität zu einem Engpass werden wird. Darüber hinaus sind dichtere Fahrpläne auch einem grösseren Risiko bezüglich Verspätungen ausgesetzt.

In dieser Arbeit werden Stabilitätsmassen für Fahrpläne eingeführt und das eng verwandte Thema der Routenplanung innerhalb von Bahnhofsregionen untersucht. Durch die Einführung von neuen Zugverbindungen soll die Qualität gegenüber den Passagieren nicht leiden. Deshalb ist die Stabilität eines Fahrplanes bei der Konstruktion von neuen und dichteren Fahrplänen von besonderem Interesse. Da unvorhersehbare Ereignisse die erarbeiteten Pläne stören können, müssen Umplanungsmassnahmen soweit wie möglich bereits bei der Erstellung der Pläne berücksichtigt werden und zusätzlich einfach zu implementieren sein. Die Fähigkeit eines Fahrplanes gewisse Störungen zu absorbieren, muss gegen die volle Auslastung der vorhandenen Kapazität abgewogen werden. Mit Hilfe von Bewertungsfunktionen können nun Fahrpläne auf ihre Eigenschaften analysiert werden. Von besonderem Interesse sind dabei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrplan neu errechnet werden muss, die Sensitivität gegenüber Verspätungen und die Effizienz beim Beheben von Störungen.

Es wird ein zweistufiges Modell eingeführt, in welchem die Berechnung eines Fahrplans und die Saturierung der vorhandenen Kapazität in einer aggregierten Topologie von der exakten Routenplanung für die Züge getrennt ist. In der oberen Stufe wird eine aggregierte Topologie verwendet, um für eine gegebene Leistungsabsicht Fahrpläne mit möglichst hoher Auslastung des Netzwerks zu berechnen. Deshalb wird unter Berücksichtigung von Sicherheitsmargen ein Fahrplan mit möglichst kleiner Periodizität entworfen. Auf der unteren Stufe hingegen werden lokale exakte Topologien verwendet, um zu entscheiden, ob ein provisorischer Fahrplan gültig ist, und um den Fahrplanablauf zu analysieren. Da das Hauptthema dieser Arbeit die Stabilität von Fahrplänen ist, wird durchweg angenommen, dass ein Fahrplan für die aggregierte Topologie zur Verfügung steht.

Im Zentrum der Routenplanung steht die Untersuchung der verschiedenen Planungsalternativen, die in Bahnhofsregionen typischerweise sehr zahlreich sind. Das entsprechende Entscheidungsproblem wird auf das Problem des Auffindens unabhängiger Mengen zurückgeführt. Dabei besteht die Knotenmenge aus der Menge aller möglicher Routen der Züge und zwei Knoten werden miteinander verbunden, falls sich die entsprechenden Routen gegenseitig ausschließen. Dieses Problem der unabhängigen Menge wird mit Hilfe einer Fixpunktiterations-Heuristik gelöst.

Falls zusätzlich Verteilungen der Verspätungen von ankommenden und abfahrenden Zügen verfügbar sind, so kann die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Routen inkompatibel werden, berechnet werden. Das vorherige Graphenmodell wird erweitert, indem zusätzliche Kanten eingeführt werden, deren Gewichte den Wahrscheinlichkeiten inkompatibler Routen entsprechen. Stabilitätsmassen können dann mit Hilfe von Eigenschaften des erweiterten Graphen ausgedrückt werden. Zusätzlich wird auch ein Stabilitätsmass eingeführt, das unabhängig von Verspätungswahrscheinlichkeiten ist. In einem zweiten Schritt werden diese Stabilitätsmassen als Zielfunktionen in verschiedene Optimierungsprobleme eingeführt, die wiederum mit Hilfe einer Heuristik (randomisierte Nachbarschaftssuche) gelöst werden.

An Hand der Bahnhofsregion Bern wird diese Methodik getestet. Je nach verwendetem Optimierungskriterium und verwendeten Verspätungsmustern verkehren die Züge auf verschiedenen Routen. Die Resultate zeigen: Je dichter ein Fahrplan ist, desto wichtiger sind Design und Koordination von angemessener Infrastruktur, sinnvollen Angebotsszenarien, dichten Fahrplänen, durchdachten Routenplanungen und dem aktiven Bewirtschaften von Zugsverspätungen.