

Robustes fahrplanbasiertes Netzwerkdesign

Die Eisenbahninfrastruktur wird zukünftig vermehrt fahrplanbasiert geplant. Um den aufwändigen Prozess zu beschleunigen, können mathematische Optimierungsverfahren zur Unterstützung eingesetzt werden. Die RWTH Aachen und die TU Dresden forschen gemeinsam an einem linearen Optimierungsmodell, mit dem robuste Netzwerke für eine Menge von Fahrplänen ermittelt werden können.



1. Einleitung

In Mitteleuropa setzt sich mittlerweile häufig das Prinzip der fahrplanbasierten Infrastrukturplanung durch; prominente Beispiele sind das Projekt „Bahn 2000“ der SBB [1] oder der jüngst veröffentlichte Deutschlandtakt [2]. Das Prinzip erscheint einfach: Anstatt durch eine Neu- oder Ausbaustrecke nur die Reisezeit einer bestimmten Relation zu verkürzen, wird ein netzweiter Zielfahrplan entwickelt, in dem Anschlüsse optimiert und auf diese Weise Reisezeiten im gesamten Netz verkürzt werden. Anschließend werden die zur Umsetzung dieses Zielfahrplans notwendigen Infrastrukturmaßnahmen abgeleitet [3]. Diese decken dabei ein breites Spektrum ab: Von beispielsweise zusätzlichen Weichenverbindungen in Bahnhöfen über niveaufreie Aus- und Einfädelungen bis hin zu kompletten Neubaustrecken. Die Ableitung dieser Infrastrukturmaßnahmen ist jedoch ein komplizierter und langwieriger Prozess. Um diesen durch moderne mathematische Optimierungsverfahren zu unterstützen, läuft am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen und der Professur

für Verkehrsströmungslehre der TU Dresden ein gemeinsames, von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördertes, Forschungsprojekt mit dem Titel „Robuste Eisenbahninfrastruktur“.

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines Optimierungsmodells, welches auf Basis eines oder mehrerer Fahrplankonzepte ein Netzwerk mit möglichst geringen Kosten entwirft, das robust gegenüber Unsicherheiten der Zielfahrpläne ist.

Im folgenden Beitrag werden die Grundlagen, wie das verwendete Infrastrukturmodell und die Modellierung der Eingangsdaten, vorgestellt. Anschließend werden die Prinzipien und Funktionsweisen zweier Ansätze für das lineare Optimierungsmodell erläutert, bevor abschließend erste Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf weitere Forschung gegeben wird.

2. Modellierung von Infrastruktur und Fahrplänen

2.1. Abbildung der Eisenbahninfrastruktur im Modell

Die Eisenbahninfrastruktur wird in einem makroskopischen Modell als Graph mit Knoten und Kanten abgebildet. Die Knoten repräsentieren dabei Bahnhöfe oder Abzweigstellen, die den Übergang von einer Kante auf eine andere ermöglichen. Jedem Knoten werden maximale Haltezeiten für Personen- beziehungsweise Güterzüge zugeordnet. Falls in einem Knoten keine passenden Halteplätze zur Verfügung stehen, wird die maximale Haltezeit auf null Minuten gesetzt und damit ein Halteverbot umgesetzt. Außerdem werden die möglichen



Dipl.-Ing. Tim Sander
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Professur für Verkehrsströmungslehre der TU Dresden
tim.sander@tu-dresden.de



Nadine Friesen, M. Sc.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
friesen@via.rwth-aachen.de



Prof. Dr. rer. nat. Karl Nachtigall
Lehrstuhlinhaber
Professur für Verkehrsströmungslehre der TU Dresden
karl.nachtigall@tu-dresden.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Institutsleiter
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
niessen@via.rwth-aachen.de

Verknüpfungen zwischen zwei Kanten in einem Knoten einzeln untersucht und bei Bedarf während der Optimierung aktiviert. Die Knotenkapazitäten werden als unbeschränkt angenommen.

Die Eisenbahnstrecken werden durch Kanten repräsentiert, die die Knoten miteinander verbinden. Jede Kante symbolisiert

Die Optimierung errechnet ein kostenoptimales Netzwerk, auf dem ein vorgegebener Anteil der Fahrplanszenarien umgesetzt werden kann.



ein Streckengleis; eine zweigleisige Strecke wird also durch zwei parallele Kanten abgebildet. Auch die Modellierung eingleisiger Strecken, bei denen eine Kante in beide Richtungen befahren wird, ist möglich. Jeder Kante sind zuggattungsabhängige Fahrzeiten sowie eine individuelle Matrix von Mindestzugfolgezeiten zugeordnet. Diese werden verwendet, um die Kapazität der Strecke realistisch abzubilden. Außerdem werden für jede Kante obere Schranken für das Reduktionspotenzial für Zugfolge- und Fahrzeiten definiert, welche während der Optimierung nach Bedarf angepasst werden. Das Optimierungsmodell entscheidet über folgende Netzwerkeigenschaften:

- Anzahl der Kanten pro Strecke
- Existenz von Verbindungen innerhalb eines Knotens
- Reduktion von Zugfolge- und Fahrzeiten im Rahmen des Reduktionspotenzials

2.2. Modellierung des Zielfahrplans

Der Zielfahrplan, auf dessen Basis das Netzwerk optimiert wird, besteht aus mehreren Bestandteilen. Zunächst beinhaltet er eine Liste aller Züge dieses Fahrplans. Jeder Zug wird durch einen Startbahnhof, einen Zielbahnhof, eine früheste Abfahrtszeit im Startbahnhof, eine späteste Ankunftszeit im Zielbahnhof und eine Zuggattung beschrieben. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, Via-Punkte mit Mindesthaltezeiten zu definieren und auf diese Weise die Route des Zuges durch das Netzwerk genauer zu bestimmen. Alle weiteren Abfahrts- und Ankunftszeiten an den Unterwegsbahnhöfen sowie die genaue Route des Zuges durch das Netzwerk werden im Laufe der Optimierung durch das Modell festgelegt.

Neben den einzelnen Zügen können auch zeitliche Verknüpfungen zwischen zwei Zügen definiert werden. Dabei wird zwischen Taktzeit- und Anschlussverknüpfungen unterschieden. Taktzeitverknüpfungen stellen sicher, dass die Zeit zwischen zwei Abfahrts- oder Ankunftsereignissen innerhalb eines vorgegebenen Intervalls liegt bzw. einen bestimmten Wert annimmt. Auf diese Weise lässt sich beispielsweise sicherstellen, dass zwei Züge einer Linie in einem bestimmten Takt verkehren. Anschlussverknüpfungen sorgen dafür, dass die Zeit zwischen der Ankunft eines Zuges und der Abfahrt eines anderen Zuges innerhalb eines gegebenen Intervalls, das die gewünschte Übergangszeit

Minimiere Infrastruktur- und Fahrtkosten,

so dass:

- Der vorgegebene Anteil der Fahrplanszenarien umgesetzt wird
- Alle Basisfahrten der aktiven Szenarien durchgeführt werden
- Optionale Züge kostenneutral hinzugefügt werden
- Zeitliche Vorgaben für jeden Zug eingehalten werden
- Taktzeiten und Anschlüsse eingehalten werden
- Mindestzugfolgezeiten für jeden Fahrplan eingehalten werden

1: Infobox zum Optimierungsmodell

Quelle: Sander

angibt, liegt. Wird eine solche Verknüpfung definiert, wird die entsprechende Betriebsstelle automatisch auch als Via-Punkt für beide Züge erfasst und damit im Routing berücksichtigt. Die Vorgabe der zeitlichen Verknüpfungen stellt sicher, dass die Struktur des Zielfahrplans im Modell abgebildet wird und in der Optimierung erhalten bleibt.

2.3. Modellierung der Fahrplanunsicherheiten

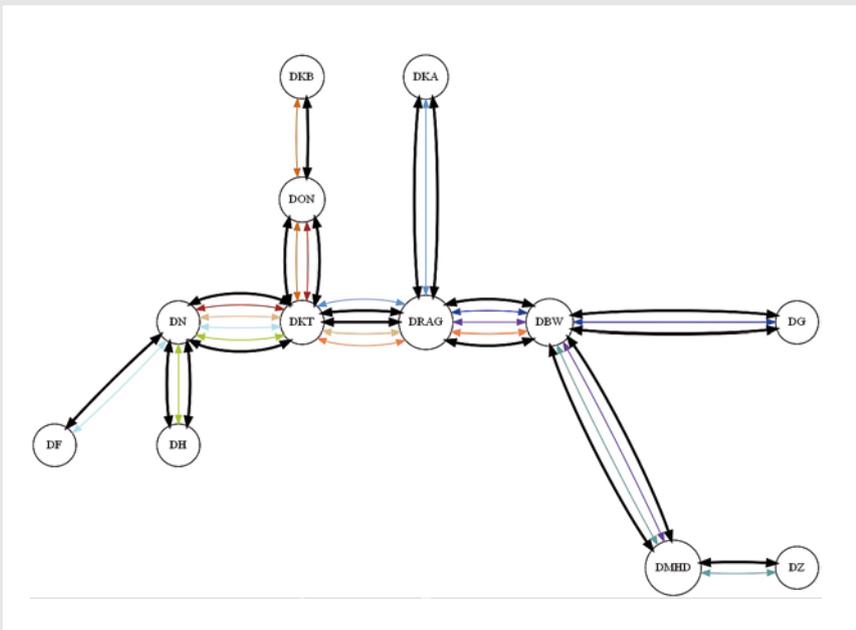
Die Langfristfahrplanung und die darauf basierende Infrastrukturkonzeption erfolgt mit sehr langen Planungsvorläufen von teilweise mehr als 15 Jahren. Dementsprechend schwer ist es, die genauen Fahrplandaten und damit die Anforderungen an die Infrastruktur vorherzusagen. Unvorhergesehene Änderungen an den Zielfahrplänen können jedoch umfangreiche und kostenintensive Infrastrukturanpassungen zur Folge haben.

Um diese so weit wie möglich zu vermeiden, sollen die mit dem hier vorgestellten Optimierungsmodell berechneten Netzwerke robust gegenüber Fahrplanänderungen sein. Dazu werden sogenannte Fahrplanfamilien definiert. Eine Fahrplanfamilie bezeichnet eine Gruppe von Fahrplänen mit ähnlicher Grundstruktur, die sich jedoch in ihren Zugzahlen, den vorgegebenen frühesten Abfahrts- und spätesten Ankunftszeiten sowie den einzuhaltenden Anschlüssen unterscheiden dürfen. Wei-

terhin sind optionale Züge abbildbar, bei denen abgewogen wird, ob der nötige Infrastrukturausbau oder die Nichtdurchführung dieser Fahrt wirtschaftlicher ist. Die Optimierung errechnet dann ein Netzwerk, auf dem die Fahrpläne der Fahrplanfamilie umgesetzt werden können. Der Abdeckungsgrad der Fahrplanfamilie, also der Anteil der durchführbaren Fahrpläne, kann dabei frei gewählt werden.

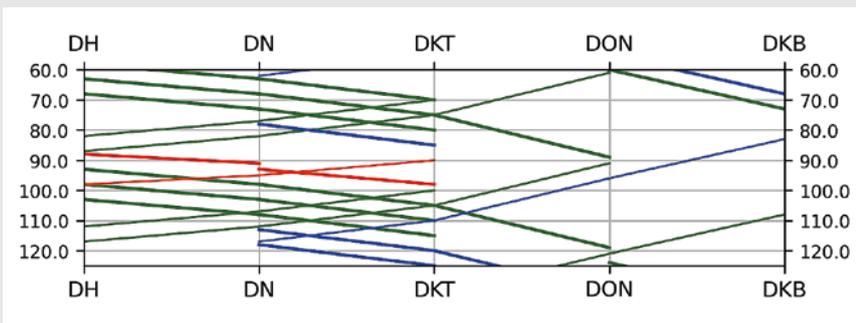
3. Eigenschaften des Optimierungsmodells

Ziel des Optimierungsmodells ist es, ein Netzwerk zu erstellen, mit dem die durch den Fahrplan vorgegebene Nachfrage kostenminimal befriedigt werden kann. Für die Modellierung werden zwei verschiedene Ansätze gewählt, die beide auf dem Netzwerk-Design-Problem [4], [5] basieren. Dieses wählt aus einer vorgegebenen Auswahl möglicher Kanten diejenigen aus, die die durch die Nachfrage angeforderten Zugfahrten (in der Mathematik als Flüsse bezeichnet) im Netzwerk am günstigsten ermöglichen. Die beiden Optimierungsansätze unterscheiden sich hauptsächlich in der Integration der zeitlichen Komponente und werden sowohl auf ihre Eignung für die Problemstellung als auch auf ihre Rechenzeit und Güte der Lösungen untersucht und miteinander verglichen. Ein Ansatz verwendet den Ansatz des Time-Expanded-Network, bei dem das Netzwerk der Bahnhöfe und Strecken für jeden Zeit-



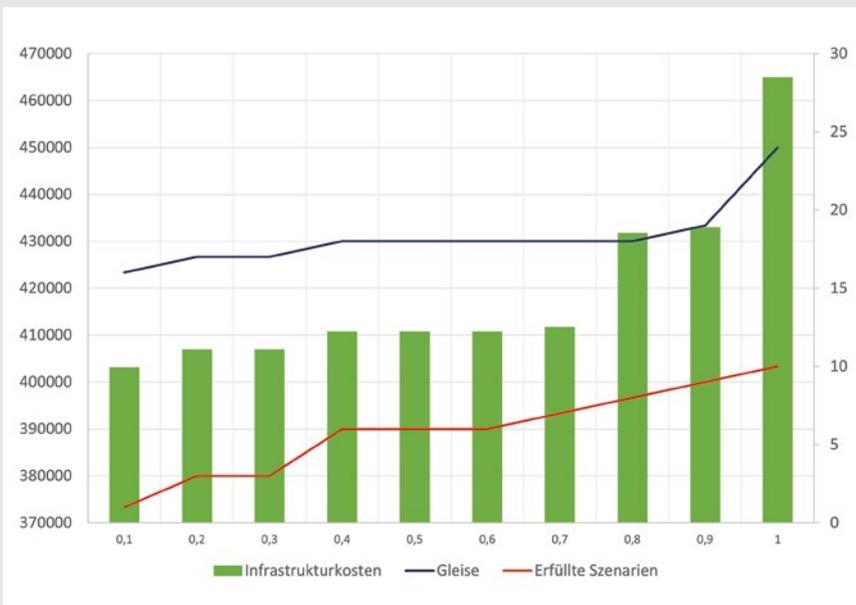
2: Netzwerk mit Knoten und Kanten nach der Optimierung

Quelle: Sander



3: Ausschnitt aus dem während der Optimierung konkretisierten Fahrplan

Quelle: Sander



4: Netzwerkentwicklung für Testfälle mit zehn Szenarien und steigendem Erfüllungsgrad

Quelle: Sander

schritt vervielfältigt und die Zeitplanung über eine Wegfindung in dem daraus resultierenden Graphen durchgeführt wird. Der andere Ansatz modelliert die Zeitpunkte als Variablen. Die hier vorgestellten Grundprinzipien gelten für beide Modellierungsvarianten.

Die Zielfunktion des Modells minimiert die Infrastrukturkosten und die Beförderungszeiten der Züge. Während der Optimierung werden die benötigten Kanten und Verbindungen in den Knoten ausgewählt und der Fahrplan konkretisiert, in dem für jeden Zug und jede befahrene Kante Abfahrts- und Ankunftszeiten festgelegt werden. Dabei werden die vorgegebenen zeitlichen Schranken für die Abfahrt im Start- sowie die Ankunft im Zielbahnhof ebenso berücksichtigt wie die vorgegebenen, zuggattungsabhängigen Fahrzeiten auf jeder Kante. Darüber hinaus wird sichergestellt, dass ein Zug einen Bahnhof erst verlässt, nachdem er dort angekommen ist und dass die definierten Anschlussbedingungen eingehalten werden.

Die Streckenkapazitäten werden durch die Verwendung von Mindestzugfolgezeiten berücksichtigt. Diese sind abhängig von der Kante selbst, der Reihenfolge und Fahrrichtung sowie den Zuggattungen zweier aufeinander folgender Züge. Das Optimierungsmodell wird in der Infobox noch einmal zusammengefasst.

4. Testfälle und Ergebnisse

Um das Modell zu validieren, wurden verschiedene Testfälle durchgeführt. Basierend auf den Fahrplänen des Deutschlandtaktes wurden ein Beispielnetzwerk im Raum Mittel- und Ostachsen sowie verschiedene Fahrplanauszüge erstellt. Diese unterscheiden sich sowohl in der Anzahl und dem Typ der Züge als auch in der Zahl der definierten Anschlüsse und Verknüpfungen. Für diese Testfälle wurden dann wiederum unterschiedliche Szenarien definiert. Die Fahrpläne umfassen dabei in der Regel alle Abfahrten innerhalb einer Zeitscheibe von zwei bis vier Stunden und sind damit so ausgelegt, dass sie nach erfolgter Optimierung über den ganzen Tag ausgerollt werden können.

Beide Modelle wurden in Matlab bzw. Python implementiert und mithilfe des kommerziellen Solvers Gurobi optimiert. Dabei zeigten sich beide als grundsätzlich geeignet für die Aufgabenstellung. Jedoch wurde auch deutlich, dass die Optimierung mit vielen Nebenbedingungen aufwendig

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden, RWTH Aachen / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Durch die Erfüllung mehrerer Fahrplanszenarien sind die ermittelten Netzwerke robust gegenüber Änderungen an zukünftigen Zielfahrplänen.



ist und die Rechenzeiten auch bei kleinen Fahrplänen (ca. 40 Züge) unter Umständen schon groß werden.

Ein beispielhaftes Netzwerk ist in Bild 2 dargestellt. Es zeigt die notwendige Infrastruktur, um neun Fahrplanszenarien zwischen Dresden (DH), Königsbrück (DKB), Kamenz (DKA), Görlitz (DG) und Zittau (DZ) umzusetzen. Die fett gedruckten, schwarzen Kanten repräsentieren die benötigten Streckengleise, die jeweils paarweise auftretenden farbigen Kanten zeigen die in den Knoten benötigten Verknüpfungen.

Beispielsweise bedeuten die violetten Pfeile zwischen den Knoten DN, DKT und DON, dass im Knoten DKT eine Verbindung zwischen den Kanten (DN,DKT) und (DKT,DON) vorgesehen ist. Bild 3 zeigt einen Fahrplanausschnitt aus einem der Szenarien, der die Einhaltung der Mindestzugfolgezeiten und damit die realistische Kapazitätsabschätzung illustriert. Die Entwicklung der Infrastrukturkosten und der Gleisanzahl im Netzwerk in Abhängigkeit von unterschiedlichen geforderten Szenarioerfüllungsgraden wird in Bild 4 dargestellt. Gut zu beobachten ist hier die Aktivierung weiterer Szenarien über den Erfüllungsgrad hinaus, sofern dies ohne zusätzliche Infrastrukturkosten möglich ist. So sind bei einem geforderten Erfüllungsgrad von 40% bereits sechs von zehn Szenarien aktiviert.

5. Diskussion und Ausblick

Die Optimierungsmodelle sind grundsätzlich geeignet für eine makroskopische,

netzweite Infrastrukturentwicklung. Das Ergebnis der Optimierung umfasst ein Netzwerk bestehend aus verschiedenen Ausbaumaßnahmen wie neuen Kanten, neuen Verbindungen in Knoten oder Reduzierungen von Fahr- und Zugfolgezeiten, auf dem ein vorab festgelegter Anteil an Fahrplanszenarien fahrbar ist. Für jedes erfüllte Fahrplanszenario wird außerdem ein makroskopischer Fahrplan ausgegeben, der ein Routing für alle Züge und Abfahrts- und Ankunftszeiten für jede befahrene Kante enthält. Der Fokus der Netzwerkoptimierung liegt dabei auf den Streckenkapazitäten, da die Knoten im Modell ohne Kapazitätsrestriktionen angenommen werden. Die Knoten werden durch die Berücksichtigung von Halteverbots und die Analyse von Abzweigverbindungen ebenfalls ausdetailliert. Eine Kapazitätsuntersuchung innerhalb der Knoten würde die Aussagekraft des Modells noch deutlich steigern. Allerdings ist für eine solche Kapazitätsanalyse eine mikroskopische Betrachtung vonnöten, welche sich daher nur mit

Mit uns können Sie nicht nur rechnen ...

Sie können auch auf uns zählen!



Alle reden von Digitalisierung – wir setzen sie um.

Zur Fahrplankonzeption, Fahrplanerstellung und Fahrplanmodifikation entwickeln wir anspruchsvolle, innovative Simulationssoftware sowie Tools für die Disposition und Trassenplanung für Eisenbahnunternehmen.

Wir setzen dabei auf langfristige Kundenbeziehungen – denn erfolgreich sind wir nur gemeinsam.

www.bvu.de

deutlich vergrößertem Rechenaufwand in das Modell integrieren ließe.

Mit der Modellierung von Infrastruktur und Fahrplan sowie dem Aufstellen und Lösen des Optimierungsproblems sind wesentliche Arbeitspakete des Forschungsprojektes abgeschlossen. Die weitere Forschung wird sich zunächst auf die Reduktion der Rechenzeit der Optimierung des Modells konzentrieren, wobei verschiedene Dekompositions- und Aggregationsalgorithmen untersucht werden sollen. Abgerundet wird das Projekt durch eine

nachgelagerte Analyse der Restkapazität auf dem errechneten Netzwerk sowie eine Untersuchung der Sensitivität gegenüber Änderungen an den Kostenwerten sowie an den Fahrplandaten.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Projekt ID 432300662

Literatur

[1] Das Schweizer Parlament: Bericht über das Konzept BAHN 2000, 1985.
 [2] SMA und Partner AG: Abschlussbericht zum Zielfahrplan Deutschlandtakt Grundlagen, Konzeptionierung und wirtschaftliche Bewertung.
 [3] Weigand, W.: Langfristfahrplan und Kapazitätsuntersuchungen. Deine Bahn (5), S. 28-31, 2012.
 [4] Magnati, T.L. & Wong, R.T. Network design and transportation planning: Models and algorithms. Transportation Science, 18(1), S. 1-55, 1984.
 [5] Crainic, T.G., Gendreau, M., Gendron, B.: Network Design with Applications to Transportation and Logistics, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021.

Summary

Robust schedule-based network design

The long-term, schedule-based planning of railway networks is to be supported by using linear optimization models. The aim is to calculate cost-optimized networks which are based on a macroscopic infrastructure, cost-optimal networks that are robust against uncertainties in the target timetable. The article describes the modelling of the infrastructure, target timetables and timetable uncertainties, the properties of the optimization model as well as test cases and further research foci.

DIGITALE FACHMEDIEN KOSTENLOS FÜR STUDENTEN

**Unverzichtbar
im Studium**

**In wenigen Schritten zur
erstklassigen Fachliteratur:**

- ▶ **1. Probeabonnement bestellen**
- ▶ **2. Studienbescheinigung vorlegen**
- ▶ **3. Sechs Monate vollumfänglich nutzen.
Das Abonnement endet automatisch.**

Jetzt kostenlos anfordern:

www.eurailpress.de/studentenangebot

25. Jahresfachtagung der

Eisenbahn-Sachverständigen

09. & 10. Februar 2023

Fulda, Kongress- und Kulturzentrum, Hotel Esperanto

**SAVE
THE DATE**



Weitere Informationen unter:

www.eurailpress.de/events

Veranstalter:



In Zusammenarbeit mit:



Eisenbahn-Bundesamt

