

GOR-Dissertationspreis 2012

Duell an der Weiche

THOMAS SCHLECHTE, BERLIN

Europäische Eisenbahnverkehrsunternehmen sehen sich gewaltigen Herausforderungen gegenüber im Übergang von nationalen Staatsbahnen zu global agierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen. Im Fall der Eisenbahninfrastrukturunternehmen ist vor allem die Zuteilung der Trassen und die Erstellung des Jahresfahrplans eine Kernaufgabe. Neben langfristigen Kapazitätserweiterungen der Eisenbahninfrastruktur ist es möglich, den Prozess der Trassenzuteilung durch mathematische Optimierung zu unterstützen, um die steigende Nachfrage im gegebenen Netz zu bewältigen. Allein im Jahr 2012 stieg die Anzahl der Trassenanmeldungen um rund 6,6 Prozent gegenüber dem Vorjahr und erreichte ein neues Rekordhoch mit knapp 60.000 Bestellungen, die zur Konstruktion des Netzfahrplans 2013 berücksichtigt werden mussten. Mathematische Verfahren zur Trassenallokation ist das Thema meiner Promotion, die ich am Zuse Institut Berlin (ZIB) im Bereich Verkehrsoptimierung bei Prof. Martin Grötschel 2004 begann.

Es waren Prof. Jürgen Ewers von der Technischen Universität Berlin und Dr. Gottfried Ilgmann, die das ambitionierte Forschungsvorhaben »Trassenbörse« im Jahr 2002 initiierten und die Förderung durch das Ministerium für Forschung und später durch das Ministerium für Wirtschaft und Technologie erhielten. Der Impuls kam dabei aus der Verkehrspolitik. Richtlinien der Europäischen Union schreiben seit 1991 ihren Mitgliedsstaaten die Öffnung des Eisenbahnmarktes vor – ein sehr langwieriges Unterfangen, das nur Zug um Zug zu bewältigen ist. Im Zentrum steht dabei die Idee, das Monopol der einst staatlichen Bahnen in Europa durch die Trennung von Netz und Betrieb aufzulösen. Bei der Trennung »sollten die Verkehrsunternehmen eigentumsrechtlich privatisiert werden und die Infrastrukturunternehmen zunächst in Staatshand verbleiben«. Seit Anfang 2007 besitzen immerhin die Güterverkehrsunternehmen ein Recht auf beliebige grenzüberschreitende Verbindungen. Die berechtigte Hoffnung ist, dass Wettbewerb die Leistungsfähigkeit des Systems Eisenbahn zu unser aller Nutzen in Europa steigern wird. Echter Wettbewerb und Konkurrenzdruck auf der Schiene sollen und werden zweifellos die Verkehrsunternehmen veranlassen, die Servicequalität in Form von Kundenfreundlichkeit, Pünktlichkeit, Energieeffizienz und einer transparenten Informationspolitik dauerhaft zu steigern.

Dabei stellt sich aber die Kernfrage: »Marktwirtschaft auf der Schiene? Wie soll das überhaupt funktionieren?« Beauftragt mit der Suche nach Antworten fand sich ein Team aus Wissenschaftlern aus den Bereichen Verkehrswesen, Bahnbetrieb, Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik und zu guter Letzt mit

uns Mathematikern. Meine Promotion innerhalb dieses interdisziplinären Projektumfeldes war dementsprechend ein spannender Auftrag und erlaubte mir Einblicke weit über die Welt der Mathematik hinaus. Ökonomischer Wettbewerb verlangt eine neue Vermarktung von Schienennetzen – zum Beispiel die Vermarktung von Fahrrechten, sogenannten »Trassen«. Eine Trasse ist gewissermaßen das Recht einen physischen Gleisabschnitt für einen Zeitraum von zum Beispiel 8 bis 9 Uhr mit einem Zug – genauer gesagt ein Zug eines bestimmten Typs – zu befahren. Auftretende Konflikte zwischen den Trassenwünschen der verschiedenen Transportunternehmen über Versteigerungen zu lösen und mit Hilfe von computergestützter Erzeugung von Fahrplänen, die Trassen optimal zu vergeben – das war unsere Herausforderung. In dem Artikel »Trassen unter dem Hammer« der Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung vom 29. Januar 2006 beleuchtete der Journalist Klemens Polatschek unser ambitioniertes Forschungsprojekt. Mittlerweile gibt es einen Präzedenzfall im Land mit dem dichtesten Eisenbahnnetz der Welt. Die unabhängige Trassenvergabestelle der Schweiz – die Trasse Schweiz AG – haben ein solches Auktionsverfahren bei der Erstellung des Fahrplans 2012 für einen kleinen Engpassbereich – den Simplon-Tunnel durch die Alpen – erfolgreich eingesetzt und so unsere Vision langsam Realität werden lassen.

Doch erst einmal einen Schritt zurück, und zwar zum Herz der Eisenbahn – dem Fahrplan. Man muss unterscheiden zwischen dem Fahrplan, den wir alle als Passagiere an den üblichen Aushängen sehen und dem betrieblichen Fahrplan aus Sicht des Netzunternehmens. Ein Fahrplan im Schienenverkehr legt den kompletten Fahrtverlauf eines Zuges fest, d.h. die Ankunfts-, Abfahrts- und Durchfahrtszeiten an allen Orten und Gleisabschnitten. Das Netzunternehmen muss nun aber alle Züge, die im Netz verkehren, sowohl Personenzüge des Regional- und Fernverkehrs als auch unterschiedlichste Güterzüge, gleichzeitig koordinieren und steht so vor einem gewaltigen Fahrplanrätsel. Sicherungssysteme im Schienenverkehr beruhen überall auf der Welt auf demselben Prinzip. Ein Zug muss Gleisabschnitte für eine gewisse Zeit für die Durchfahrt reservieren – sogenannte Blöcke. Das gleichzeitige Belegen eines Blocks durch zwei Züge wird Blockkonflikt genannt und ist dementsprechend in der Konstruktion des Fahrplans verboten. In Abbildung 1 ist ein möglicher Fahrplan für eine gegebene Trassennachfrage in 3d zu sehen. Traditionell erstellen die Betreiber von Eisenbahnnetzen ihre Fahrpläne immer noch von Hand, wenn auch mittlerweile an unzähligen Bildschirmen und mit Hilfe von gigantischen Datenbanken in gewaltigen Rechenzentren. Der neue Fahrplan orientiert sich jedoch meist

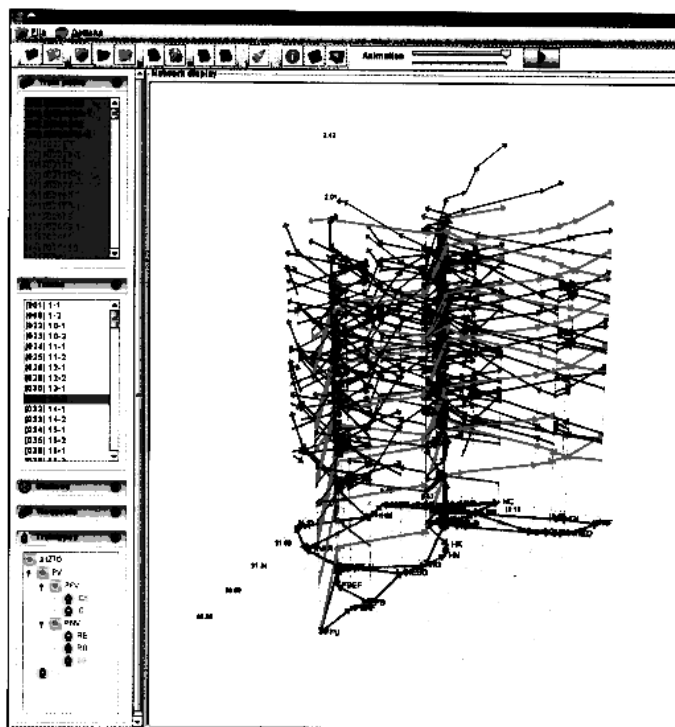


Abb. 1: 3d-Visualisierung eines Fahrplans mit 198 Zügen im Netzausschnitt Hannover-Kassel-Fulda mit TraVis.

an seinem Vorgänger. Die Komplexität der Bahnwelt zu beherrschen ist schier unmöglich für den Einzelnen. Bereits scheinbar überschaubare Fragestellungen können nicht schlüssig und stichhaltig beantwortet werden. Das umstrittene Projekt Stuttgart 21 ist hierfür ein Paradebeispiel. Im öffentlichen Schlussbericht zur Betriebsqualitätsüberprüfung des beauftragten Unternehmens (SMA und Partner AG) kann man entnehmen, dass es sich eigentlich um einen winzigen deutschen Netzausschnitt handelt, jedoch umfasst dieser bereits 360 Stationen, 2500 Weichen und Kreuzungen, 5400 Signale und 7700 Blockabschnitte. Im Betrachtungszeitraum von 4 bis 13 Uhr wurde ein Fahrplan mit 760 Zügen aus 20 unterschiedlichen Typen, wie er mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in Zukunft zu erwarten ist, 100-mal simuliert. Eine abschließende überzeugende Aussage hinsichtlich des Projektnutzens kann aber ein einziger simulierter Fahrplan jedoch nicht glaubhaft liefern. Erstrebenswert und mit mathematischen Methoden und der heutigen Rechenpower ist eine deutlich umfangreichere Untersuchung verschiedener zukünftiger Szenarien mit zahlreichen variierenden Modellannahmen durchaus möglich. Einen Fahrplan zu kreieren – also konfliktfreie Trassen der Züge zu planen – ist letztendlich ein klassisches Optimierungsproblem. Die Trassen sind die Objekte, die wir auswählen müssen, und das Schienennetz mit Milliarden von Blöcken in Ort und Zeit beschreibt die beschränkte Ressource. Nehmen wir an für den Gleisabschnitt von A nach B wird zuerst die Anfrage eines Regionalverkehrsunternehmens für Trassen auf diesem

Abschnitt von 8-10 Uhr, von 12-14 Uhr und von 16-18 Uhr angenommen. Erst danach meldet sich ein Fernverkehrsanbieter, der Trassen von 8-9 und 16-17 Uhr benötigt. Diese Anfrage kann natürlich vom Netzbetreiber nicht mehr akzeptiert werden, da jeweils immer ein Blockkonflikt zwischen den Trassen vorliegt, genauer gesagt für den Block von 9-10 Uhr und für den Block von 13-14 Uhr. Nehmen wir jetzt an zwei weitere Unternehmen wollen Güterzüge von 9-12 und 13-16 Uhr fahren lassen, dann wird es schon deutlich komplizierter. Anstelle der drei zu Beginn zugeteilten Trassen liefert mathematische Optimierung, unter der Annahme, dass alle die gleichen Trassenpreise für ein Stunde zahlen müssen, eine Lösung mit vier Trassen und mit einer Nutzung der Strecke von 8 Stunden anstelle von lediglich 6 Stunden.

Im Szenario einer Trassenbörse würde dieser Konfliktfall gelöst, indem alle Beteiligten Gebote abgeben dürfen und somit diejenigen den Zuschlag bekommen, deren Zahlungsbereitschaften insgesamt am höchsten sind. Das Regionalverkehrsunternehmen müsste demzufolge mehr bieten als alle anderen Beteiligten zusammen, um seine Wunschtrassen zu bekommen. Nur so könnte es den Wettstreit um die Nutzung der beschränkten und kostbaren Infrastruktur gewinnen. Die Kernidee einer Trassenbörse ist deshalb eine mathematische Computertechnik und Rechenverfahren entwickeln sich gewaltig und sind heute leistungsfähig genug, um Fahrpläne für Schienennetze bezüglich einer vorher gewählten Zielfunktion zu optimieren und die Planungsabteilung der Netzbetreiber bei der Bewältigung ihrer großen Herausforderung zu unterstützen. Optimierung bedeutet, aus der Menge aller Fahrpläne einen auszuwählen, der im Fall einer Trassenbörse die Erlöse maximiert, oder beispielsweise die Kundenzufriedenheit maximiert, die Betriebskosten minimiert oder einen geeigneten Kompromiss verschiedener Ziele insgesamt optimiert. Das Prinzip ist eine Modellwelt zu konstruieren und die Trassen optimal auszuwählen. Ralf Borndörfer und ich haben deswegen neuartige mathematische Modelle und innovative Lösungstechniken entwickelt, die zu beweisbaren Optimallösungen führen. Diese Modellwelten bilden alle Elemente der Eisenbahninfrastruktur, d.h. Weichen, Signale, Neigungen und Kurvenwinkel, vollständig und genau ab, ebenso das Beschleunigungs- und Bremsverhalten der verschiedenen Züge und bieten die Möglichkeit das System Schiene exakt zu simulieren. Ein so feiner Detaillierungsgrad ist allerdings nicht überall erforderlich. Große Teile des Netzes lassen sich ohne Informationsverlust zusammenfassen. Der Trick besteht darin, aus dem riesigen Datenberg ein geeignetes grobes Netz zu konstruieren, in diesem die Planung durchzuführen und das Ergebnis wieder in den Mikrokosmos der Bahnwelt zurückzurechnen. Die Reduktion auf das Wesentliche ist einer der Schlüssel der Mathematik, um derart komplexe und gigantische Probleme überschaubar und lösen zu können. Das Wesentliche bei der Trassenplanung ist die Betrachtung der Kapazität. Wir haben deshalb einen neuartigen Ansatz entwickelt, der Kapazität konfliktabhängig definiert. In unseren Modellen wird die Infrastruktur nur dort, wo tatsächlich Blockkonflikte zwischen den angeforderten Trassen entstehen können genau unter die Lupe genom-

men. In den Gleisabschnitten und Netzbereichen, wo problemlos alle angefragten Züge verkehren können, bleibt das Modell grob. Das neuartige unseres Ansatzes ist hierbei die Beschreibung der Konflikte. Während klassische Modelle immer eine »äußere« Beschreibung nutzen und so unzulässige Lösungen abschneiden, wird in unserem Konfigurationsmodell die Menge der zulässigen Lösungen durch Hilfsvariablen aufgespannt. Diese Art der Modellierung bezeichnet man in der Literatur mit »extended formulation« – einer inneren Beschreibung des Optimierungsproblems. Ein weiterer Schlüssel zum Lösen dieser gigantischen Probleme ist der Einsatz von leistungsfähigen Algorithmen, wie z.B. die Bündelmethode und die Rapid Branching Heuristik für derart große Modelle.

Diese Methodik haben wir 2009 im Rahmen einer Studie zur Berechnung der theoretischen Kapazität der Simplonstrecke in der Schweiz entwickelt und eingesetzt. Untersucht wurden verschiedene Betriebskonzepte mit unterschiedlichen Pufferzeiten und variierenden Ausprägungen der Infrastruktur zwischen Brig und Domodossola. Die errechneten optimierten Fahrpläne wurden simuliert und auf ihre technische Umsetz-

barkeit hin erfolgreich überprüft. Unter Annahme der günstigsten realistischen Bedingungen ergänzt unser Plan in optimaler Weise 63 voreingelegte Fahrtrassen des Personenverkehrs durch 137 neu berechnete Güterverkehrstrassen. Damit konnte erstmals eine theoretische Kapazität von 200 Zügen pro Tag nachgewiesen werden.

Dieser Erfolg demonstriert, dass unser Ansatz praxistauglich ist und moderne Mathematik Netzbetreiber bei zahlreichen Planungsaufgaben zukünftig unterstützen kann. Fairer Wettbewerb und die Nutzung innovativer Optimierungsverfahren mit dem Ziel einer effizienten Trassenplanung im Eisenbahnbereich kommt uns letztlich allen zugute – schließlich sollte nur die beste Nutzung gut genug sein für unser Eisenbahnnetz.



GOR – Vorstand ab dem 1.1.2013

Gesellschaft für Operations Research e. V.

Vorstandsbereich
»Vorsitz«

Prof. Dr. Stefan Nickel
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Operations Research
Geb. 11.40
76128 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-43951
Fax: 0721 608-46874
E-Mail: vorstand_vorsitz@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Arbeitsgruppen«

Prof. Dr. Leena Suhl
Universität Paderborn
Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
Warburger Str. 100
33098 Paderborn
Tel.: 05251 60-5245
Fax: 05251 60-3542
E-Mail: vorstand_arbeitsgruppen@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Finanzen«

Dr. Ralph Grothmann
Siemens AG, Corporate Technology
Research and Technology Center
(CT RTC BAM ORD-DE)
Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München
Tel.: 089 636-42287
Fax: 089 636-49767
E-Mail: vorstand_finanzen@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Tagungen«

Prof. Dr. Alf Kimms
Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl für BWL, insb. Logistik und OR
Mercator School of Management
Lotharstr. 65, 47057 Duisburg
Tel.: 0203 379-3492
Fax: 0203 379-5451
E-Mail: vorstand_tagungen@gor-ev.de

Vorstandsassistentz: Dipl.-Math. Brita Rohrbeck, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Operations Research,
Geb. 11.40, 76128 Karlsruhe, Tel.: 0721 608-46815, Fax: 0721 608-46874, E-Mail: vorstand_assistent@gor-ev.de

GOR – Vorstand bis zum 31.12.2012

Gesellschaft für Operations Research e. V.

Vorstandsbereich
»Vorsitz«

Prof. Dr. Brigitte Werners
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum
Tel.: 0234 32-28311
Fax: 0234 32-14267
E-Mail: vorstand_vorsitz@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Arbeitsgruppen«

Prof. Dr. Leena Suhl
Universität Paderborn
Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
Warburger Str. 100
33098 Paderborn
Tel.: 05251 60-5245
Fax: 05251 60-3542
E-Mail: vorstand_arbeitsgruppen@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Finanzen«

Dr. Ralph Grothmann
Siemens AG, Corporate Technology
Research and Technology Center
(CT RTC BAM ORD-DE)
Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München
Tel.: 089 636-42287
Fax: 089 636-49767
E-Mail: vorstand_finanzen@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Tagungen«

Prof. Dr. Stefan Nickel
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Operations Research
Geb. 11.40
76128 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-43951
Fax: 0721 608-46874
E-Mail: vorstand_tagungen@gor-ev.de

Vorstandsassistentz: Dipl.-Ök. Urs Pietschmann, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre,
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum, Tel.: 0234 32-25317, Fax: 0234 32-05317, E-Mail: vorstand_assistent@gor-ev.de