Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

RALF BORNDÖRFER MARTIN GRÖTSCHEL ULRICH JAEGER

Planung von öffentlichem Personenverkehr

Dieser Artikel ist erschienen in M. Grötschel, K. Lucas und V. Mehrmann, *PRODUKTIONSFAKTOR MATHEMATIK – Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt*, acatech DISKUTIERT, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Springer, 2008, S. 127–153.

ZIB-Report 08-20 (July 2008)

Planungsprobleme im öffentlichen Verkehr[*]

Ralf Borndörfer[‡**] Martin Grötschel[**] Ulrich Jaeger[‡‡]

30. July 2008

1 Executive Summary

Millionen von Menschen werden allein in Deutschland täglich von Bussen, Bahnen und Flugzeugen transportiert. Der *öffentliche Personenverkehr* (ÖV) ist von großer Bedeutung für die Lebensqualität einzelner aber auch für die Leistungsfähigkeit ganzer Regionen. Qualität und Effizienz von ÖV-Systemen hängen ab von politischen *Rahmenbedingungen* (staatlich geplant, wettbewerblich organisiert) und der Eignung der *Infrastruktur* (Schienensysteme, Flughafenstandorte), vom vorhandenen *Verkehrsangebot* (Fahr- und Flugplan), von der Verwendung angemessener *Technologien* (Informations-, Kontroll- und Buchungssysteme) und dem bestmöglichen Einsatz der *Betriebsmittel* (Energie, Fahrzeuge und Personal). Die hierbei auftretenden *Entscheidungs-, Planungs-* und *Optimierungsprobleme* sind z.T. gigantisch und „schreien" aufgrund ihrer hohen Komplexität nach Unterstützung durch Mathematik.

Dieser Artikel skizziert den Stand und die Bedeutung des Einsatzes von *Mathematik bei der Planung und Durchführung von öffentlichem Personenverkehr*, beschreibt die bestehenden Herausforderungen und regt zukunftsweisende Maßnahmen an.

Der gegenwärtige Beitrag der Mathematik zum ÖV ist — je nach Verkehrsträger — unterschiedlich tiefgehend. Die Unterstützung des *Luftverkehrs* durch Mathematik ist schon weit voran geschritten. Im *Busverkehr* sind in den letzten Jahren signifikante Fortschritte erkennbar, während im *Bahnverkehr* noch deutliche Verbesserungsmöglichkeiten zu verzeichnen sind. In

[*]Dieser Artikel ist erschienen in M. Grötschel, K. Lucas und V. Mehrmann, *PRODUKTIONSFAKTOR MATHEMATIK – Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt*, acatech DISKUTIERT, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Springer, 2008, S. 127–153.

[‡]Dres. Löbel, Borndörfer & Weider GbR (LBW), Salzburger Str. 17, 10825 Berlin, Email borndoeryfer@lbw-berlin.de

[**]Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), Takustr. 7, 14195 Berlin-Dahlem, Email groetschel@zib.de

[‡‡]BVO Busverkehr Ostwestfalen GmbH, Am Bahnhof 6, 33602 Bielefeld, Email Ulrich.Jaeger@bvo-bielefeld.de

allen Bereichen sind die vorhandenen *Potentiale* bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Für einige ÖV-Fragestellungen, z.B. Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung im Bus- und Flugverkehr, sind ausgezeichnete mathematische Werkzeuge verfügbar und an vielen Stellen im Einsatz. In anderen Bereichen ist die Leistungsfähigkeit der gegenwärtigen Algorithmen noch nicht ausreichend, um die im ÖV auftretenden Problemgrößen zu beherrschen; dies gilt z.B. für die Umlaufplanung im Bahnbereich. Verschiedene Themen sind aus mathematischer Sicht weitgehend unberührt; es fehlen (außer im Flugverkehr) u.a. praxistaugliche Modelle zur Angebots- und Preisplanung, ÖV-Infrastrukturplanung erfolgt nahezu mathematikfrei, obwohl in diesem Bereich gewaltige Investitionssummen bewegt werden. Hier tun sich Fragestellungen auf, die von Ingenieuren, Ökonomen, Politikern und Mathematikern nur in gemeinsamer Arbeit angegangen werden können.

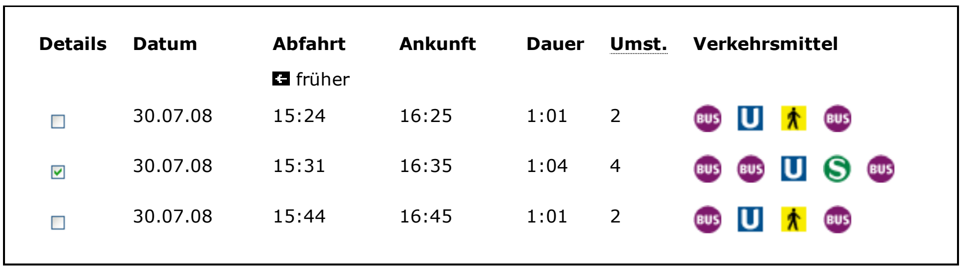
Die Autoren schlagen unter anderem vor, zwei konkrete Themen aufzugreifen, die kurzfristig in Angriff genommen werden können, von grundlegender Bedeutung auch über den Verkehr hinaus sind, zu einer deutlichen Verbesserung der Zusammenarbeit aller am Verkehr beteiligten Partner führen sollten und, falls erfolgreich, von echtem Nutzen für Betreiber und Kunden sind:

- Diskrete Optimalsteuerung: Echtzeit-Umplanung von Verkehrssystemen bei Störungen
- Modellintegration: Angebotsplanung im Bus- und Bahnbereich.

Diese Themen könnten von BMBF, BMWi oder DFG gefördert und im Rahmen von interdisziplinären Forschungsprojekten bearbeitet werden.

2 Erfolgsgeschichten

Was bringt der Einsatz von Mathematik im öffentlichen Personenverkehr? Drei Beispiele beleuchten den Nutzen der Mathematik für den Kunden, den Planer und den Eigentümer.



Details	Datum	Abfahrt	Ankunft	Dauer	Umst.	Verkehrsmittel
		früher				
☐	30.07.08	15:24	16:25	1:01	2	BUS U BUS
☑	30.07.08	15:31	16:35	1:04	4	BUS BUS U S BUS
☐	30.07.08	15:44	16:45	1:01	2	BUS U BUS

Abb. 1: Die Fahrinfo der BVG empfiehlt eine Route.

Fahrplanauskunft. Das Wälzen von dicken Kursbüchern und Flugplänen zur Bestimmung einer besten Verbindung in einem Bus-, Bahn- oder Flugnetz ist Vergangenheit. Heute bieten die Nahverkehrsbetriebe, Bahnen und Fluggesellschaften *elektronische Fahrplanauskunftssysteme* an, die diese Verbindungsinformationen per Internet oder Mobiltelefon jederzeit bequem, schnell, aktuell und kostenlos liefern. Damit dieser Service funktioniert, benötigt man zunächst einmal korrekte und vollständige Daten. Die „Intelligenz“ zur Nutzung dieser Daten liefert die Mathematik: gute Methoden zur Berechnung von *kürzesten Wegen in Netzwerken*[1]. Geeignete Algorithmen hierfür sind seit den fünfziger Jahren bekannt. Ihr kundenfreundlicher Einsatz wurde durch die rasante Entwicklung der Informationstechnologie in den letzten Jahren Realität.

Beispiele für elektronische Fahrplanauskunftssysteme sind die Fahrinfo der Berliner Verkehrsbetriebe (`http://www.fahrinfo-berlin.de`), siehe Abb. 1, das von der Deutschen Bahn verwendete Hafas (`http://reiseauskunft.bahn.de`) und die Flugplanauskunft der Lufthansa (`http://www.lufthansa.de`). Die Basismethode zur Berechnung von kürzesten Wegen ist der *Algorithmus von Dijkstra* [17]. Dieser hat im Laufe der Jahre viele Verfeinerungen und Verbesserungen erfahren, um große Netzwerke und komplexe Nebenbedingungen bearbeiten zu können, siehe hierzu [12].

Revenue Management. Lufthansa bietet zur Jahresmitte 2008 Flüge zu verschiedenen Zielen innerhalb Europas für 99 € an, siehe Abb. 2, Air Berlin Flüge nach Paris ab 29 € und manchmal findet man sogar Flugtickets für unter 10 €. Wie kommen solche Preise zustande? Sie sind das Ergebnis ausgefeilter Ticketverkaufsstrategien, die man als *Revenue* oder *Yield Management* bezeichnet. Die Idee ist die folgende. Hat eine Fluggesellschaft erst einmal einen Flug in ihren Flugplan aufgenommen, stehen die Kosten im

[1]Kunden bemängeln gelegentlich, daß sie bessere oder billigere Routen finden können als die Auskunftssysteme. Das liegt jedoch nicht an der Mathematik, sondern in der Regel an „Parametereinstellungen“ wie Mindestumsteigezeiten.

Abb. 2: Sonderangebote für Flüge Mitte 2008.

wesentlichen fest. Das Ziel ist dann die Maximierung der Einnahmen. Ursprünglich gab es dazu zwei Strategien: die klassischen Carrier verlangten hohe Preise (und hatten zu gewissen Zeiten leere Flugzeuge), die Billigflieger füllten ihre Flugzeuge ausschließlich mit preiswerten Tickets. Heute verfolgen alle Fluggesellschaften (je nach Firma unterschiedliche) Mischungen dieser Strategien, wobei der Clou darin besteht, die Sitzplatzkontingente und Preise kontinuierlich der bereits realisierten und noch erwarteten Nachfrage anzupassen. Diese Anpassungen werden von vielen Fluggesellschaften mit Hilfe von mathematischen Verfahren der *stochastischen Optimierung* getroffen. Auf Basis solcher Prognosen kann es sinnvoll sein, zu bestimmten Zeiten Restkapazitäten zu sehr niedrigen Preisen zu verkaufen, um wenigstens noch geringfügige Einnahmen zu erzielen, anstatt leere Plätze durch die Gegend zu fliegen.

Die oben beschriebene und heute allgemein praktizierte Form des Revenue Managements wurde um 1980 entwickelt. Berühmt ist in diesem Zusammenhang der Konkurrenzkampf von American Airlines mit dem Billigflieger PeopleExpress, den AA mit Hilfe von „Super Saver“ und „Ultimate Super Saver“-Tickets, die mit Yield-Management-Methoden verkauft wurden, für sich entscheiden konnte. Anläßlich der Verleihung des Edelman-Preises der INFORMS im Jahr 1991 hat AA nachgewiesen, durch Revenue Management von 1988 bis 1991 zusätzliche Einnahmen in Höhe von 1,4 Milliarden USD erzielt zu haben [32]. Nach weiteren Verbesserungen wurde der Betrag später sogar auf 1 Milliarde USD pro Jahr beziffert [9]. Das bekannteste Revenue-Management-Verfahren ist die *EMSR-Regel* (Expected Marginal Seat Revenue), die besagt, daß man für einen Flug solange Tickets einer Buchungsklasse verkauft, wie der erwartete Gewinn positiv ist [26]. Ausgehend von dieser Grundform sind im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Verfahren zur Buchungskontrolle entwickelt worden, die von der Betrachtung einzelner Flüge („leg control“) über die Berücksichtigung einfacher Netzeffekte („segment control“) bis zur Behandlung ganzer Reiseketten gehen („origin-destination control“); siehe [34] für einen aktuellen Überblick über den Stand der Forschung in diesem Bereich der stochastischen Optimierung.

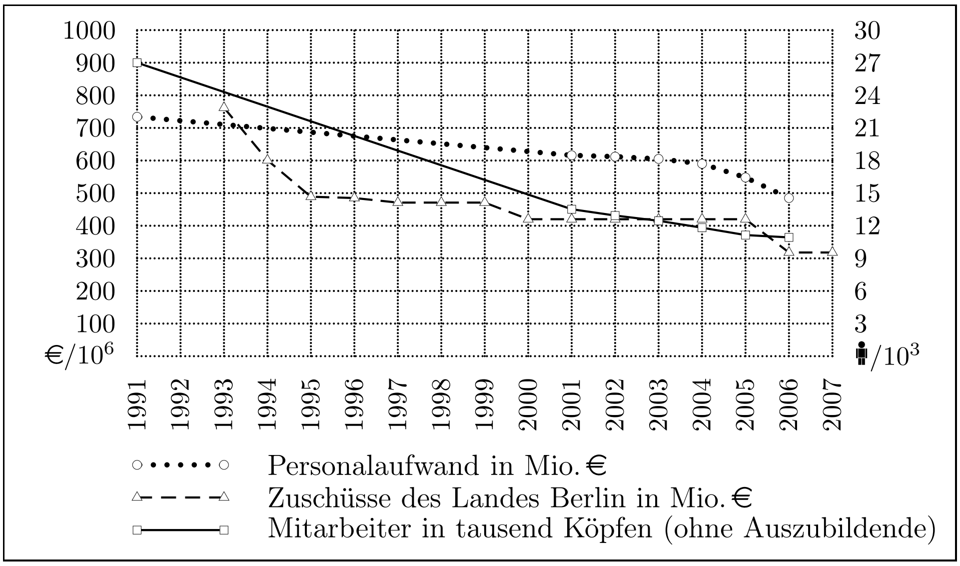


Abb. 3: Die Berliner Verkehrsbetriebe in Zahlen; Quelle: [33].

Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung. Abb. 3 zeigt die Entwicklung der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) in den letzten Jahren anhand dreier

Kennzahlen: von 1991 bis 2006 sank die Zahl der Mitarbeiter von 27.002 auf 10.982, die Personalkosten sanken im gleichen Zeitraum von 734 Mio. € auf 485 Mio. €, die Zuschüsse der öffentlichen Hand sanken von 762 Mio. € im Jahr 1993 auf 318 Mio. € im Jahr 2006 [33]. Diese bemerkenswerten Reduktionen wurden bei gleichbleibendem Verkehrsangebot erreicht. Sie sind natürlich nicht nur, aber auch auf mathematische Optimierung zurückzuführen. In den Worten von Andreas Sturmowski, dem Vorstandsvorsitzenden der BVG [33]: „Der Einsatz von IT-gestützten Planungssystemen ermöglicht signifikante Verbesserungen in den Planungsbereichen der BVG! Der Ressourceneinsatz wird optimiert. Produktivitätssteigerungen [werden] beim Einsatz von Personal und Fahrzeugen [erreicht durch die] Minimierung von Betriebsfahrten, [. . .], bessere Nutzung von Betriebshofkapazitäten [. . . und] Verringerung des Personalbedarfs durch optimierte Dienstpläne [. . .].“ Möglich gemacht wird dies durch Methoden der *kombinatorischen* und *gemischt-ganzzahligen Optimierung*, die die in diesem Bereich typischerweise auftretenden extrem großen Probleme bewältigen können. Diese „Rechenpower“ führt zu einer erheblichen Beschleunigung und Qualitätssteigerung im Planungsprozeß. Als Kunde bemerkt man von diesen Fortschritten direkt nichts; indirekt ist jedoch die Wirkung auf Ticketpreise und staatliche Subventionen erheblich.

Mathematische Methoden zur *Umlauf*- und *Dienstplanoptimierung* werden heute als Module in den marktführenden Planungssystemen angeboten. Dazu gehören im Bereich ÖPNV die Systeme `MICROBUS 2` der Berliner IVU Traffic Technologies AG (`http://www.ivu.de`), `HASTUS` der kanadischen Firma Giro Inc. (`http://www.giro.ca`) und `Turni` der italienischen Firma Double-Click (`http://www.turni.it/page001.htm`), im Luftverkehr die Systeme `NetLine` der Lufthansa Systems GmbH (`http://www.lhsystems.com`) und `Carmen` der amerikanischen Jeppesen-Gruppe (`http://www.carmen.se`), im Bahnverkehr das System `railRMS` von Jeppesen oder die Optimierungsmodule der amerikanischen Firma Innovative Scheduling, Inc. (`http://www.innovativescheduling.com`). Der aktuelle Stand der mathematischen Forschung ist in den Proceedingsreihen zu den jeweils alle drei Jahre stattfindenden internationalen CASPT- und nationalen Heureka-Konferenzen dargestellt [10, 11, 14, 18, 35, 36].

3 ÖV-Planungsprobleme: Übersicht & Status Quo

Der öffentliche Personenverkehr (ÖV) ist von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Tab. 1 zeigt exemplarisch anhand einiger Daten der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), der Deutschen Bahn (DB) und der Lufthansa (LH) für das Geschäftsjahr 2006, dass der ÖV auch ein wichtiger Wirtschaftsfaktor ist.

Durch die anhaltende Verteuerung des Individualverkehrs wird die Bedeutung des ÖV weltweit weiter zunehmen. In Deutschland kostet eine einzige Tankfüllung im Sommer 2008 mit ca. 75 € ungefähr so viel wie eine Monatskarte der BVG für die Tarifzone AB, die das gesamte Stadtgebiet umfaßt.

Öffentlicher Personenverkehr gliedert sich in die folgenden drei Bereiche:

- *öffentlicher Personennahverkehr* mit Bus, Tram, U-, S-Bahn (ÖPNV),
- *Schienenpersonennah-* und *-fernverkehr* (SPNV, SPFV),
- *Ziviler Passagierluftverkehr* (ZPLV).

Wir werden diese im folgenden verkürzt als *Bus-*, *Bahn-* und *Luftverkehr* bezeichnen. Die dort auftretenden Planungsprobleme kann man aus betriebswirtschaftlicher Sicht wie folgt klassifizieren:

- *Betriebsplanung* (d.h. Fahrzeug- und Personaleinsatz)
- *Betriebssteuerung* (z.B. Verspätungs- und Störungsmanagement)
- *Angebotsplanung* (z.B. Infrastruktur, Fahr-/Flugplan),
- *Regulierung* von Wettbewerbsbedingungen (z.B. Ausschreibung).

In all diesen Anwendungsfeldern werden bereits mathematische Methoden eingesetzt. Der Stand der Technik und die Durchdringung der Praxis sind jedoch unterschiedlich. In der *Betriebsplanung* haben sich mathematische Optimierungsmethoden als Industriestandard etabliert, bei der *Betriebsteuerung* und *Angebotsplanung* befindet man sich (mit Ausnahmen im Luftverkehr) im Forschungsstadium, während die Mathematik der *ÖV-Regulierung* noch in den Kinderschuhen steckt. Unterschiede gibt es auch bei den Verkehrsträgern. Die Planungsprobleme im Bus-, Bahn- und Flugverkehr ähneln sich zwar, sind aber doch nicht gleich. Technische und organisatorische Gegebenheiten sowie das Marktumfeld beeinflussen die Gliederung der Planungsprozesse und die Ausgestaltung der einzelnen Aufgaben, was wiederum Rückwirkungen auf den mathematischen Zugang hat. Aktuell ist der Einsatz von Mathematik im Luftverkehr am stärksten und bei der Bahn am schwächsten ausgeprägt.

Wir geben im folgenden eine Übersicht über den Stand der wichtigsten Entwicklungen.

Firma	Pkm/Jahr	Mitarbeiter	Umsatz/€	Gewinn/€
BVG	4,074 Mrd.	12.685	0,636 Mrd.	23 Mio.
DB	74,788 Mrd.	229.200	30,053 Mrd.	1.680 Mio.
LH	110,330 Mrd.	93.541	19,849 Mrd.	845 Mio.

Tab. 1: Öffentlicher Verkehr 2006 in Deutschland; Quellen: [4], [15], [16]. Die jeweiligen Zahlen sind interpretationsbedürftig, da sie z.T. nach unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden. Die Mitarbeiterzahl der BVG wird z.B. angegeben als „Mitarbeiterzahl im Jahresdurchschnitt“ inkl. Auszubildende. Die Zahlen der DB und der LH enthalten unter anderem auch Güterverkehre.

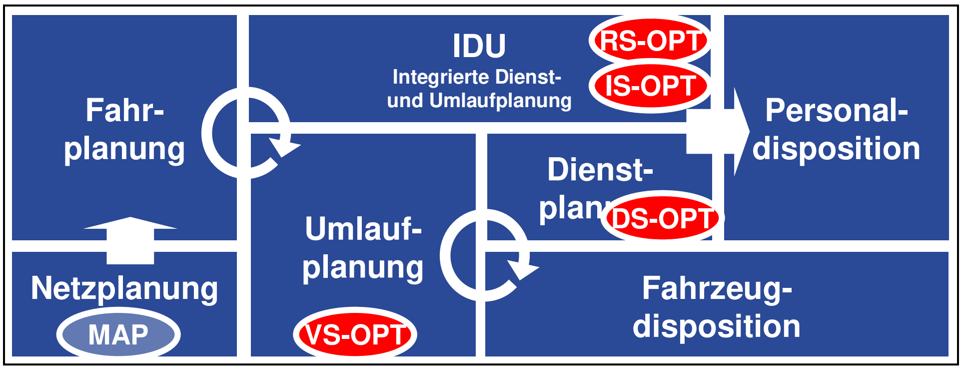


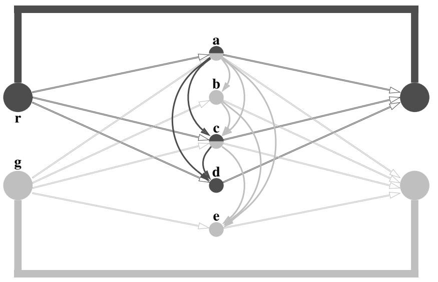
Abb. 4: Operative Planung im ÖPNV mit MICROBUS 2; Quelle [28].

3.1 Betriebsplanung

Die Betriebsplanung bestimmt — bei vorher festgelegtem Angebot — den Einsatz von Fahrzeugen und Personal. Der Betrieb eines Busses (allgemeine Verwaltung eingerechnet) kostet in Deutschland rund 250.000 € im Jahr. Von diesen Kosten entfallen in Deutschland etwa 70% auf das Personal und knapp 25% auf das Fahrzeug. Im Bahn- und Luftverkehr ist der Anteil der Fahrzeugkosten und hier insbesondere der Treibstoffkosten am Gesamtaufwand höher.

Die Probleme der Planung von Fahrzeugen und Personal lassen sich in ihren Grundversionen als Standardprobleme der kombinatorischen Optimierung auffassen. Man kann sie als *Mehrgüterflussprobleme* oder *Pfadüberdeckungsprobleme* formulieren. Diese Modelle sind gut untersucht und können heute in Dimensionen gelöst werden, die eine Behandlung realistischer und relevanter Szenarien mit einem hohen Detaillierungsgrad erlauben. Technische Nebenbedingungen, gesetzliche Vorgaben und Betriebsvereinbarungen erhöhen jedoch die Komplexität der Fragestellungen so stark, daß die Entwicklung von Spezialmethoden erforderlich ist. Diese weisen einen hohen Reifegrad auf und werden heute (wie bereits erwähnt) von Softwarefirmen weltweit angeboten.

Die genaue Organisation des Planungsprozesses und die Zerlegung in Einzelprobleme hängt von der Sichtweise auf den Betrieb ab und unterscheidet sich nach Ländern, Verkehrsträgern und Softwareanbietern. Abb. 4 zeigt die Sicht der IVU Traffic Technologies AG auf den ÖPNV. In dem Planungssystem MICROBUS 2 werden auf Basis der Netz- und Fahrplanung für einen Betriebstag Fahrzeugumläufe und Fahrdienste geplant, die anschließend zu Dienstreihenfolgen verkettet werden. Diese Planungsschritte werden durch mathematische Optimierungstools unterstützt, die im Bild rot gekennzeichnet sind. Wir geben im folgenden einen zusammenfassenden Überblick und erläutern die Probleme aus Anwendungs- und aus mathematischer Sicht.



Umlaufplanungsgraph.

Das Problem der Fahrzeugumlaufplanung im ÖPNV kann mathematisch als ein *Mehrgüterflussproblem* modelliert werden. Basis des Modells ist ein Planungsgraph, in dem die Fahrgastfahrten durch alle möglichen Leerfahrten verbunden werden. Die Fahrzeuge der verschiedenen Typen „fließen" durch diesen Graphen, so daß jede Fahrgastfahrt von einem Umlauf mit passendem Typ überdeckt wird. Formal kann dieses Modell wie folgt beschrieben werden. Wir bezeichnen mit $\mathcal{D}$ eine Menge von Fahrzeugtypen, mit $\mathcal{T}$ eine Menge von Fahrgastfahrten, mit A^d eine Menge von Bögen für die möglichen Leerfahrten für jeden Fahrzeugtyp d und mit κ^d die verfügbare Anzahl an Fahrzeugen von Typ d. Wir führen 0/1 Variablen x_{ij}^d für jeden Bogen (i, j) und jeden Fahrzeugtyp d ein. x_{ij}^d besagt, ob die Leerfahrt (i, j) von einem Fahrzeug des Typs d durchgeführt wird (in diesem Fall ist $x_{ij}^d = 1$) oder nicht ($x_{ij}^d = 0$).
Die zugehörige Formulierung als ganzzahliges lineares Programm ist:

$$
\begin{aligned}
\min \sum_{d,(i,j)c_{ij}^d} x_{ij}^d & \\
\sum_{d,(t,j)} x_{tj}^d &= 1, \ \forall t \in \mathcal{T}, \\
\sum_{d,(t,j)} x_{tj}^d - \sum_{d,(i,t)} x_{it}^d &= 0, \ \forall t \in \mathcal{T}, \ d \in \mathcal{D}, \\
\sum_{(d,j)} x_{dj}^d &\leq \kappa^d, \ \forall d \in \mathcal{D}, \\
x &\geq 0 \text{ und ganzzahlig.}
\end{aligned}
$$

Bei der Berliner BVG unterscheidet man rund 50 Fahrzeugtypen, rund 28.000 Fahrgastfahrten und rund 100 Millionen Leerfahrten. Dies übersetzt sich in dem obigen Modell in ein Mehrgüterflussproblem mit rund 100 Millionen Variablen und mehreren Hunderttausend Gleichungen und Ungleichungen.

Abb. 5: Umlaufplanung im ÖPNV, siehe [27].

Fahrzeugeinsatzplanung. Mathematische Verfahren wurden in der Verkehrsoptimierung erstmals erfolgreich im Bereich der *Busumlaufplanung* eingesetzt. In diesem Planungsschritt werden für die Fahrzeuge Abfolgen von Fahrten und Leerfahrten, die sog. *Umläufe*, konstruiert, so daß jeder „Fahrgastfahrt" (eine im Fahrplan ausgewiesene Fahrt) ein geeignetes Fahrzeug zugewiesen wird. Man plant hier im wesentlichen für einen Betriebstag. Ein Bus verläßt morgens seinen Betriebshof und kehrt abends wieder zurück. Das Ziel ist, alle Fahrgastfahrten abzudecken und die dabei entstehenden Kosten (durch Leerfahr- und Wartezeiten) zu minimieren. Diese Aufgabe kann mathematisch als *Mehrgüterflussproblem* formuliert werden, siehe Abb. 5. Im Fall der BVG führt das zu einer Optimierungsaufgabe mit rund 100 Millionen Variablen, die man mit modernen Algorithmen in weniger als einer Stunde auf einem handelsüblichen PC flottenoptimal lösen kann [27]. Die BVG hat damit im praktischen Einsatz nach eigenen Angaben im Jahr 2003 allein im Betriebshof Spandau 38 Busse, das ist etwa jeder fünfte, und 377 Betriebsstunden an unproduktiver Zeit eingespart ([30]).

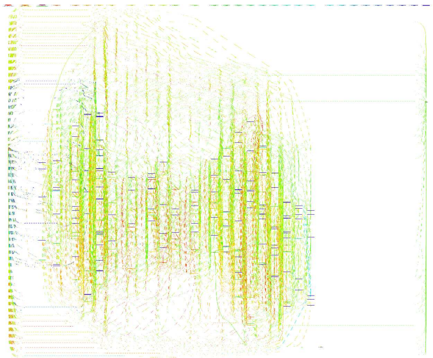
Im Luftverkehr wird die Flugzeugumlaufplanung gewöhnlich in die Teilschritte *Fleet Assignment* und *Tail Assignment* unterteilt. Beim Fleet Assignment wird entschieden, mit welchem Flugzeugtyp ein bestimmter Flug eines Flugplans durchgeführt wird. Für die einzelnen Flugzeugflotten werden anschließend beim Tail Assignment konkrete *Rotationen* einzelner Flugzeuge inklusive notwendiger Wartungsaufenthalte geplant. Es gibt zwei Gründe für diese Aufteilung. Einmal unterscheiden sich die Kosten für den Einsatz von größeren Flugzeugen sehr viel stärker als im Busverkehr, so daß Fleet Assignment enger mit der Angebotsplanung verzahnt ist als im Busverkehr. Zweitens ist der Planungshorizont im Wochen- bis Monatsbereich. Die mathematische Formulierung der beiden Aufgaben unterscheidet sich. Fleet Assignment kann wie bei Bussen als Mehrgüterflussproblem modelliert werden, während das Tail Assignment auf Pfadüberdeckungsprobleme führt und mit *Spaltengenerierung* gelöst wird, siehe Abb. 6. Man kann heute optimale Umlaufpläne für einen kompletten Nahverkehrsbetrieb oder eine ganze Fluggesellschaft berechnen.

Im Bahnbereich treten zusätzliche technische Nebenbedingungen auf, die unter anderem auch von den Gegebenheiten auf Bahnhöfen und den verwendeten Zugtypen abhängen können und die die mathematischen Modelle erheblich komplizieren. Hier ist die mathematische Methodik noch nicht weit genug, um ganze Bahnbetriebe behandeln zu können. Derzeit basiert Umlaufplanung bei der Bahn noch in großem Maße auf manueller Planung und heuristischen Methoden.

Personaleinsatz. In der Regel unterscheidet man bei der Personaleinsatzplanung zwei Teilschritte: *Crew/Duty Scheduling* (im Bus- und Bahnbereich auch *Dienstplanung* genannt) und *Crew/Duty Rostering* (*Dienstreihenfolgeplanung*). Beim Scheduling wird eine Anzahl von Diensten erzeugt, die noch nicht personenbezogen sind; hierbei werden arbeitsrechtliche Regeln eingehalten und Kosten minimiert. Im anschließenden *Rostering* werden diese (anonymen) Dienste (bei Bussen *Tagesdienste*, bei Flugzeugen mehrtägige sog. *Pairings*) zu Dienstreihenfolgen über einen längeren Zeitraum verkettet und konkreten Personen zugeordnet; dabei werden unter anderem Fairness-Bedingungen und Wünsche des Personals berücksichtigt.

Die ersten großen Erfolge beim Einsatz mathematischer Methoden zur Planung des Personaleinsatzes gab es im Bereich des Luftverkehrs. Die Personalkosten großer Airlines bewegen sich im Milliardenbereich und stellen hinter dem Treibstoff den zweitgrößten Kostenblock dar ([1]). Anfang der neunziger Jahre gelang es erstmals, große Crew-Scheduling-Probleme mit tausenden von Flügen optimal zu lösen ([21]). Die Optimierungstechnik hat sich seither rasant weiterentwickelt und als Industriestandard etabliert. Alle großen Airlines verwenden heute mathematische „Crew Optimizer" [37]. Methodisch basieren diese Verfahren auf *Set Partitioning Modellen*, mit denen die sehr komplexen Regelwerke zu Pausen-, Ruhezeiten usw. abgebildet werden können. Diese Modelle werden mit *Spaltenerzeugungsverfahren* gelöst, siehe Abb. 6.

Diese Methoden sind mit zeitlicher Verzögerung auf den Bus- und teilweise auch auf den Bahnverkehr übertragen worden. Die hier auftretenden Pro-



Dienstplanungsgraph im ÖPNV mit Morgen- und Nachmittagsspitze.

Das Problem der Dienstplanung im ÖPNV kann mathematisch als ein *Pfadüberdeckungsproblem* aufgefaßt werden. Ähnlich wie in der Umlaufplanung betrachtet man einen Planungsgraphen, in dem Arbeitseinheiten, die sog. *Dienstelemente*, durch alle möglichen Verknüpfungen miteinander verbunden werden. Die Fahrdienste entsprechen dann „Pfaden" in diesem Planungsgraphen, so daß jedes Dienstelement von einem Dienst überdeckt wird. Der Unterschied zur Fahrzeugumlaufplanung besteht in komplexen Regeln für die Zulässigkeit von Diensten wie z.B. Pausenregeln, die von der Form des Dienstes als Ganzes abhängen und sich nicht lokal entscheiden lassen. Dies führt dazu, daß man bei der mathematischen Behandlung nicht mehr mit Variablen für Verknüpfungen von Dienstelementen auskommt, sondern Variablen für ganze Dienste einführen muß, was die Modelle größer und komplizierter macht.

Diese Betrachtung führt auf ein formal sehr einfaches sog. *Set-Partitioning-Problem*. Es betrachtet für eine Menge von Dienstelementen I alle zulässigen Dienste J. Für jeden solchen Dienst j wird eine 0/1-Variable x_j eingeführt, die besagt, ob Dienst j in einem Dienstplan durchgeführt wird (in diesem Fall ist $x_j = 1$) oder nicht ($x_j = 0$). Bei großen, industriellen Problemen kann diese Formulierung nicht mehr explizit behandelt werden, da es schon bei kleinen Problemen mit 200 Fahrten oder Flügen Milliarden möglicher Dienste gibt [22]. Die Modelle können aber implizit gelöst werden, indem mit Hilfe sog. *Spaltenerzeugungsverfahren* die (in einem mathematisch präzisen Sinne) jeweils interessanten Dienste dynamisch generiert werden, siehe [3, 13]

Die zugehörige Formulierung als ganzzahliges lineares Programm ist

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in J} c_j \, x_j \\ & \sum_{j \ni i} x_j = 1 \forall i \in I \\ & x \geqslant 0 \text{ und ganzzahlig.} \end{aligned}$$

Heutzutage werden Dienstplanungsprobleme im ÖPNV und im Luftverkehr mit mehreren hundert oder tausend Personen routinemäßig gelöst [2, 6].

Abb. 6: Dienstplanung im ÖPNV [6].

bleme haben aber eine eigene Kombinatorik, die unter anderem dadurch entsteht, daß es im Bus- und Bahnverkehr andere Freiheitsgrade in Bezug auf die Ablösevorgänge gibt (im Busbereich werden z.B. „fliegende Wechsel" durchgeführt); dafür wird im Busverkehr die Einsatzplanung auf den Betriebstag bezogen, während man im Luftverkehr typischerweise für mehrere Wochen oder einen Monat plant.

Insgesamt ist der Personaleinsatz der Bereich, in dem der Einsatz mathematischer Methoden am weitesten fortgeschritten ist. Gelegentlich gibt es Kritik, wie z.B. der Schlagzeile der Atlanta Constitution vom 13.08.1994 zu entnehmen ist: „Delta to furlough 101 more pilots in bid to cut costs". Dies hat aber nichts mit der mathematischen Methodik zu tun. Man kann auch auf hohe Sozialverträglichkeit hin optimieren. Manager stellen jedoch eher Kostensenkungsmaßnahmen in den Vordergrund.

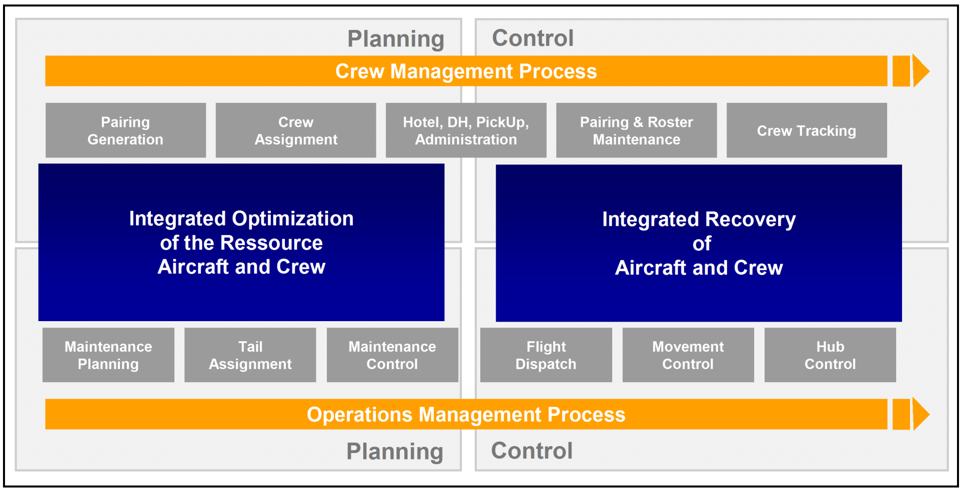


Abb. 7: Airline Planning und Control mit dem System NetLine; Quelle [8].

3.2 Steuerung des Betriebs

Wie man aus Abb. 7 ersieht, tritt neben die Planung gleichberechtigt die Steuerung (Control) des Betriebs. In der Praxis entstehen durch schlechtes Wetter, Unfälle, technische Schäden und Streiks Störungen. Die Chicago Tribune berichtet am 27.12.2007 hierzu: „According to its pilots union . . . , United has run low on crews to fly its planes. That's a result of lean staffing, scheduling practices and freakishly bad weather that have caused large numbers of pilots to hit the maximum number of monthly duty hours allowed by federal regulators well before December's end.“. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, dieser Problematik zu begegnen.

Stochastische und robuste Optimierung. Eine theoretisch befriedigende Möglichkeit ist der Einsatz von Modellen der stochastischen Optimierung, die vorausschauend Wahrscheinlichkeiten von Störungsereignissen berücksichtigt. Ein Hindernis beim Einsatz stochastischer Methoden ist die geringe Verfügbarkeit von Erwartungswerten und Verteilungsdaten in der Praxis. Aus diesem Grunde wird seit einigen Jahren eine vereinfachte Variante untersucht, die sog. *robuste Optimierung*, bei der nur gewisse Unsicherheitsintervalle im Sinne einer Worst-Case-Analyse Berücksichtigung finden. Sie hat den Weg in die Anwendungen noch nicht gefunden. In den im praktischen Einsatz befindlichen Planungswerkzeugen wird eine gewisse Vorsorge dadurch getroffen, daß man an einigen Stellen Puffer einbaut.

Echtzeit-Optimierung. Durch stochastische oder robuste Optimierung und Puffer schafft man Voraussetzungen dafür, daß Störungen durch momentane Umplanungen beseitigen werden können. Umplanung ist ein Anwendungsfeld der *Online-* bzw. *Echtzeit-Optimierung*, welche bei Störungen Anpassungen ermittelt, die so schnell wie möglich wieder auf einen stabilen Betriebszustand führen und die durch Störungen auftretenden Schäden so stark wie möglich reduziert. Methoden der Echtzeit-Optimierung sind z.B. bei der Disposition der Gelben Engel des ADAC erfolgreich im betrieblichen Einsatz [20]. Im Bus- und Bahnverkehr ist im Prinzip die notwendige IT-Infrastruktur für Echtzeit-Optimierung vorhanden. Hier wird die Störungsbeseitigung jedoch weiterhin durch erfahrene Dispatcher besorgt. Im Luftverkehr gibt es erste Erfolge beim Einsatz von mathematischen Methoden, z.B. bei der amerikanischen Fluggesellschaft Continental Airlines [38]. Die Softwarehersteller haben begonnen, sich des Themas anzunehmen.

Mangelhafte Betriebssteuerung führt nicht nur zu Kundenverärgerung, sondern auch zu enormen Kosten. So müssen Fluggesellschaften Übernachtungen für Passagiere bezahlen und Leer- und Zusatzflüge durchführen, Bus- und Bahnunternehmen erhalten bei Qualitätsmängeln nicht die vereinbarten Betriebszuschüsse.

Robuste und Echtzeit-Optimierung sind neue und aktuelle Forschungszweige, die im Verkehrssektor nur dann zum Tragen kommen können, wenn eine enge Kooperation mit der Praxis erfolgt.

3.3 Angebotsplanung

Bei der Angebotsplanung unterscheidet man drei wichtige Bereiche: Baumaßnahmen, Fahrzeugbeschaffung und die Linien-, Fahr- und Preisplanung.

Infrastrukturplanung. Der eigentlich bedeutendste Bereich der ÖV-Planung sind die Entscheidungen über Investitionen in Infrastruktur, wie z.B. den Bau von Flughäfen, Eisenbahnlinien und Bahn- oder Betriebshöfen. Infrastrukturkosten sind enorm. So hat die ICE-Neubaustrecke von Köln nach Frankfurt über 5 Mrd. € gekostet, für den Bau des neuen Berliner Flughafens BBI werden 2–5 Mrd. € veranschlagt. Einmal getroffen, können Infrastrukturentscheidungen nur in sehr langen Zeiträumen geändert werden. Entsprechend ist eine extrem sorgfältige Analyse aller Entscheidungsmöglichkeiten erforderlich.

Die heute verwendete Entscheidungsmethodik bei Baumaßnahmen basiert auf der Simulation einiger weniger Szenarien im Sinne von Fallstudien (begleitet von in der Regel hochaufgeladenen politischen Diskussionen). Bei Einzelmaßnahmen, die in komplexem Zusammenhang mit der gesamten Verkehrsinfrastruktur stehen, greift diese Methodik zu kurz. Im Bahnbereich, um ein Beispiel zu nennen, wird diskutiert, ob der Neubau teurer ICE-Strecken den höchsten Nutzenzuwachs in Bezug auf das Gesamtnetz erbringt oder ob nicht viele andere, kleinere Maßnahmen sinnvoller wären. Baumaßnahmen im Busbereich konzentrieren sich auf die Standortplanung für Betriebshöfe, ein Thema, das derzeit speziell aufgrund von Zusammenschlüssen eine große Rolle spielt. Hierzu sind Netzoptimierungsrechnungen erforderlich. Uns ist nicht bekannt, daß dies bei der Infrastrukturplanung im ÖV heute in nen-

nenswertem Umfang durchgeführt wird. Aus mathematischer Sicht ähnlich gelagerte Probleme treten in der Telekommunikation auf. Hier führt z.B. der DFN-Verein eine gleichzeitige Standort- und Netzoptimierung für das deutsche Wissenschaftsnetz (derzeit X-WIN) seit vielen Jahren regelmäßig durch [5]. Die hierfür entwickelte Methodik könnte als Startpunkt für eine mathematische Infrastrukturplanung im ÖV dienen.

Fahrzeugbeschaffung. Die Beschaffung von Flugzeugen, Zügen, Bussen etc. stellt einen hohen Kostenfaktor dar. Ein A380 kostet über 200 Mio. €, ein ICE3 über 20 Mio. €, ein 25m Gelenkbus 500.000 €. Die Bahn betreibt 236 ICE-Triebzüge [15], die BVG über 1.300 Omnibusse [4], die Lufthansa 411 Passagierflugzeuge verschiedener Typen [16]. Die Abschätzung des Fahrzeugbedarfs für ein Flug- bzw. Bahn- oder Busnetz wird zum Teil noch mit einfachen Faustformeln gemacht [24], [31], z.B. als

$$\left\lceil \frac{\text{Linienlänge} \times \text{Taktzeit}}{\text{Durchschnittsgeschwindigkeit}} \right\rceil + \text{Reserve},$$

zum Teil werden hierbei die Instrumente der operativen Planung eingesetzt. In der Regel erfolgen die Entscheidungen durch Kompromisse auf der politischen Ebene, bei denen mathematische Überlegungen nicht immer eine wichtige Rolle spielen.

Linien-, Fahr- und Preisplanung. Bei der Linien- und Fahrplanung geht es darum, die Verkehrslinien festzulegen, mit Takten zu versehen und die konkreten Abfahrtszeiten zu bestimmen. Diese beiden Planungsschritte gehören eigentlich zusammen, werden derzeit aber nacheinander durchgeführt, weil die mathematischen Methoden zur gleichzeitigen Behandlung großer Praxisprobleme nicht vorhanden sind. Zur Lösung beider Einzelprobleme gibt es inzwischen Forschungscodes, mit denen mittelgroße Nahverkehrsbetriebe behandelt werden können, siehe z.B. [7]. Etwas weiter fortgeschritten ist die periodische Taktfahrplanung, mit deren Hilfe z.B. der Fahrplan der U-Bahn in Berlin berechnet wurde [25]. Diese Ansätze gehen von einer fest vorgegebenen Nachfrage aus.

In der Preisplanung wird untersucht, wie sich die Nachfrage nach ÖV in Abhängigkeit von den geforderten Preisen verhält. Zu diesem Zweck müssen Modelle des Nachfrageverhaltens von Nutzern entwickelt werden, die eine Vorhersage der Nachfrage bei Preisvariationen erlauben. Sehr einfache Modelle der Nachfragemodellierung basieren auf Preiselastizitäten. Das Problem ist, daß diese Elastizitäten nur punktuell (für gewisse Orte zu gewissen Zeiten) empirisch geschätzt wurden und sich durchaus voneinander unterscheiden. Konstante Preiselastizitäten eignen sich nicht für die Vorhersage von Substitutionseffekten. Modernere, auf diskreten Entscheidungsmodellen basierende Ansätze sind inzwischen entwickelt worden und können in moderatem Umfang auch gelöst werden [29]. Sie sind bisher aber noch nicht in der Praxis angewendet worden. Eine Ausnahme bildet der Luftverkehr. Hier wird das bereits besprochene Revenue Management mit großem Erfolg eingesetzt.

Das langfristige Ziel muß sein, Linien-, Fahr- und Preisplanung integriert zu behandeln, da alle Komponenten des Systems stark voneinander abhängen. Da man die Einzelprobleme aber mathematisch nicht vollständig beherrscht, ist man von einer Systemoptimierung noch weit entfernt.

3.4 Wettbewerbsbedingungen

Die Angebotsplanung, wie im letzten Abschnitt diskutiert, beruht auf der gegenwärtigen Marktordnung. Überall in der Welt wird diskutiert, wie weit der Markt des öffentlichen Verkehrs dereguliert werden soll und auf welche Weise in diesem System Wettbewerb erzeugt werden kann. Die Deregulierung des Flugverkehrs hat zu einem enormen Boom geführt. Es kam zu einer starken Verbilligung der Flugpreise und hohen Steigerungsraten beim Fluggastvolumen. Ähnliche Effekte erhofft man sich im Bahn- und Busverkehr, jedoch ist nicht klar, was die richtigen Deregulierungsrezepte sind. Die bisherigen Erfahrungen in unterschiedlichen Teilen der Welt ergeben ein gemischtes Bild. Die Deregulierung der Eisenbahn in England wurde zunächst als großer Wurf gefeiert, führte danach zu einem Desaster, nach Anpassungen der Regelungen scheint sich nun ein Erfolg abzuzeichnen. Ein anderes Beispiel ist die Umgestaltung des Busverkehrs in Santiago de Chile, der im Frühjahr 2007 vollzogen wurde. Dies führte zu einem Verkehrskollaps, der beinahe den Sturz der Regierung nach sich gezogen hätte. Die mathematische Analyse von Regulierungsmaßnahmen kann ein Mittel sein, unerwünschte Auswirkungen von Systemwechseln zu erkennen und ihnen zu begegnen.

Ein Beispiel, wie dies in der Praxis aussehen könnte, gibt die Eisenbahn-Infrastruktur-Benutzungsverordnung (EIBV), die den wettbewerblichen Zugang zum bundesdeutschen Schienennetz regeln soll. Die EIBV stellt in §9 Abs. 5 fest: „Bei der Entscheidung ... hat der Betreiber der Schienenwege die Entgelte für die streitigen Zugtrassen gegenüberzustellen und ... bei einem Konflikt zwischen mehr als zwei Zugtrassen den Zugtrassen den Vorrang einzuräumen, bei denen in der Summe das höchste Regelentgelt zu erzielen ist.“ Dies ist gesetzlich verordnete Optimierung. Sie verpflichtet den Netzbetreiber DB Netz AG, ein *Trassenallokationsproblem* zu lösen, und die Bundesnetzagentur als Aufsichtsbehörde des Schienenverkehrs darauf zu achten, daß eine Optimallösung bestimmt wird. Ohne mathematische Optimierung ist ein im Sinne dieser Vorschrift diskriminierungsfreier Zugang überhaupt nicht möglich. Dies wird von allen Beteiligten „übersehen“, in der Regel mit der Begründung, daß Verhandlungslösungen besser geeignet sind. Eine im Grundsatz ähnliche Problematik stellt sich bei der Slotvergabe im Flugverkehr und bei der Ausschreibung von Linienbündeln im Busverkehr. Diese

Themen führen aus mathematischer Sicht auf Fragen der kombinatorischen Auktionen und der algorithmischen Spieltheorie, die in der ökonomischen Diskussion äußerst aktuell sind und für die mehrere Ökonomie-Nobelpreise, zuletzt 2007 vergeben wurden.

Es gibt inzwischen erfolgreiche Anwendungen dieser Methodik bei Ausschreibungen von Transportvolumina in der Logistik [23] und es sind Firmen entstanden, die entsprechende Auktionsplattformen vermarkten (combine.net). Im öffentlichen Verkehr ist die Methodik noch nicht eingesetzt worden.

4 Stärken/Schwächen-Analyse, Herausforderungen

In Abschnitt 3 wurden die Planungsprobleme im ÖV aus betrieblicher Sicht dargestellt. Dieser Abschnitt bietet eine Gesamtschau aus mathematischer Perspektive, erläutert Stärken und Schwächen und beschreibt einige der bestehenden Herausforderungen.

4.1 Rahmenbedingungen für den Einsatz von Mathematik

Zentrale Organisationsformen. Die öffentlichen Verkehrsträger Bus, Bahn und Flugzeug zeichnen sich durch relativ zentrale Organisationsformen aus. Bis auf den Bereich der Betriebssteuerung steht für alle Planungsprobleme ausreichend Vorlaufzeit zur Verfügung, so daß auch Alternativ- und Variantenrechnungen durchgeführt werden können. Damit sind grundsätzlich exzellente Voraussetzungen für die Verwendung mathematischer Planungsverfahren gegeben.

Datenverfügbarkeit und Informationstechnik. Um Optimierungsmethoden anwenden zu können, werden detaillierte und präzise Daten benötigt. Durch den Fortschritt in der Informationstechnik werden Daten in immer größerem Umfang und immer größerer Genauigkeit verfügbar. Datenfunk, RBL, GPS, elektronisches Ticket sind ergiebige Quellen über das Nutzerverhalten und den Zustand des Betriebes. Für eine vorausschauende Planung sind aber noch weitere Daten in erheblichem Umfang erforderlich. So benötigt man z.B. für die Umlaufplanung tausende von Streckenlängen für Alternativwege, die man potentiell benutzen könnte. Diese sog. Freiheitsgrade sind nicht automatisch bzw. in ausreichender Qualität in den Systemen vorhanden, und ihre Beschaffung ist häufig ein wesentlicher Aufwand bei der Einführung von Optimierungssystemen. In einigen Bereichen ist es auch grundsätzlich schwer, die notwendigen Daten zu erheben. Bei der Preis- und Angebotsplanung im Nahverkehr wäre es eigentlich notwendig, das Nutzerverhalten bei Veränderungen von Preis und Angebot zu prognostizieren. Hier arbeitet man in der Regel mit statistischen Nachfragematrizen. Die gelegentlich benutzten Preiselastizitäten beruhen auf wenig gesicherten Daten.

In diesen Bereichen muß die Datenbasis erst noch geschaffen werden, um eine zielgenaue Angebotsplanung durchführen zu können.

Der öffentliche Verkehr und die Planungsmethoden profitieren in großem Maße von den atemberaubenden Entwicklungen in der Informationstechnik. Mobilfunk, Datenfunk, etc. haben den Einsatz von quantitativen, mathematischen Planungsmethoden überhaupt erst möglich gemacht.

Komplexität. In kleinen Verkehrsbetrieben und bei konstanten Rahmenbedingungen kann manuelle Planung durchaus gute Lösungen bieten. Aber auch dort wachsen die Anforderungen an Qualität und Kosteneffizienz. Bei großen Verkehrsbetrieben mit tausenden von Bussen, zehntausenden von Mitarbeitern und zigtausenden von Verbindungen ist Planung durch „Draufschauen“, durch Auswertung von Excel-Tabellen oder durch Argumentation anhand wichtiger Einzelaspekte weder Stand der Technik noch der Forschung. Gleiches gilt für die Planung kostenintensiver Infrastrukturmaßnahmen, die die Verkehrslogistik in ganzen Regionen verändern. Es ist immer wieder frappierend zu sehen, daß beim Bau von Flughäfen die Anbindung von U- und S-Bahn „vergessen“ wurde. Dies liegt daran, daß „globale Sichten“ fehlen und die Netzwerkwirkungen einzelner Entscheidungen nicht ausreichend verstanden werden. Infrastrukturpolitische Entscheidungen müßten eigentlich in umfassende Netzwerkmodelle eingebettet werden, die Verkehrsbedarfe einer Region über lange Frist berücksichtigen und dabei insbesondere auch Intermodalitäten in Betracht ziehen. Planungen dieser Art erfolgen heute in großem Maße durch Ingenieurbüros des Bauwesens, die die technischen Einzelaspekte zwar hervorragend verstehen, aber nicht über die zur Beherrschung der komplexen Zusammenhänge notwendigen mathematischen Methoden verfügen. Daneben wird Planung durch Gesetze, Betriebsvereinbarungen und andere Regelwerke, bei denen nicht an die Auswirkungen auf die Verkomplizierung der Planung bedacht wird, erschwert, siehe Abb. 8 für ein typisches Beispiel.

ÖV-Planungsprobleme sind hochkomplex. Mathematik kann Komplexität nicht zum Verschwinden bringen, bietet aber Methoden, sie zu „beherrschen“. In der Tat kann man sogar beweisen, daß die im ÖV auftretenden Planungsprobleme in einem mathematisch präzisierbaren Sinne schwierig ($\mathcal{NP}$-schwer [19]) sind. Auch wenn mathematische Methoden für derartige Probleme nicht notwendig Optimallösungen liefern können, so können doch Abweichungen von der Optimalität oder ähnliche Gütegarantien berechnet werden, etwas, das keine andere Vorgehensweise erbringt. In einfachen Worten: Ohne Mathematik „geht nichts“.

Erschreckend ist, daß diese Einsicht noch nicht von allen Verkehrsbetrieben realisiert wird. Vielfach dominiert selbst bei großen Betrieben immer noch manuelle Planung. Wirklich erstaunlich ist, daß sogar einige Beratungsbüros und Softwareanbieter in diesem Marktsegment argumentieren, daß Optimierung nur spezielle Aspekte, manuelle Planung jedoch „das Große und Ganze“ berücksichtigen könne — aus unserer Sicht eine vollkommen absurde Behauptung. In Wahrheit muß das Ziel darin bestehen, die Komplexität der ÖV-Systeme dadurch zu beherrschen, daß man das Know-How der Verkehrsplaner mit der mathematischen Methodik verknüpft. Nur so kann man den großen Herausforderungen bei der integrierten Planung und dem Entwurf gesamter Verkehrssysteme gerecht werden. Die Investitionen in mathematische Planungsverfahren sind im Vergleich zu den Kosten für Infrastruktur, Fahrzeuge und Personal marginal, die Effekte, die man damit erzielen kann, allerdings erheblich.

Â§ 8 Flugdienstzeiten der Besatzungsmitglieder

(1) Die uneingeschränkte Flugdienstzeit jedes Besatzungsmitgliedes zwischen zwei Ruhezeiten beträgt 10 Stunden. Innerhalb 7 aufeinanderfolgender Tage ist eine viermalige Verlängerung der Flugdienstzeit nach Satz 1 bis 4 Stunden zulässig, wobei die Summe der Verlängerungen innerhalb jeweils 7 aufeinanderfolgender Tage 8 Stunden nicht überschreiten darf. Der Zeitraum von 7 aufeinanderfolgenden Tagen beginnt jeweils um 00.00 Uhr Mittlere Greenwich Zeit (MGZ) des ersten und endet um 24.00 Uhr MGZ des siebten Tages. Bei einem Luftfahrzeugführer, der während der Flugzeit nach Satz 1 ganz oder teilweise ohne Unterstützung durch ein weiteres Flugbesatzungsmitglied als Luftfahrzeugführer tätig wird, finden die Absätze 2 und 3 keine Anwendung.

(2) Bei Flugbesatzungsmitgliedern verringert sich die nach Absatz 1 höchstzulässige Zeitverlängerung von 4 Stunden

1. um 1 Stunde, wenn der Flugdienst mehr als 2, jedoch weniger als 4 Stunden,
2. um 2 Stunden, wenn der Flugdienst 4 oder mehr Stunden zwischen 01.00 Uhr und 07.00 Uhr Ortszeit des Startflugplatzes (Winterzeit)

ausgeübt wird.

(3) Eine nach Absatz 2 verringerte Zeitverlängerung ist

1. bei mehr als 3, jedoch weniger als 6 Landungen um eine weitere Stunde,
2. bei mehr als 5 Landungen um 2 weitere Stunden

zu kürzen.

(4) Bei einer Verstärkung der vorgeschriebenen Mindestflugbesatzung und bei Vorhandensein geeigneter Schlafgelegenheiten in einem von dem Führerraum und der Kabine abgetrennten Raum kann die Aufsichtsbehörde auf schriftlichen Antrag ein zweimalige Verlängerung der Flugdienstzeit nach Absatz 1, Satz 1 bis zu 8 Stunden innerhalb 7 aufeinanderfolgender Tage zulassen. Die mit der Führung und Bedienung des Luftfahrtzeugs verbrachte Zeit jedes Flugbesatzungsmitglieds darf hierbei 12 Stunden nicht überschreiten.

Abb. 8: Aus der 2. Durchführungsverordnung zur Betriebsordnung für Luftfahrtgerät (2. DVLuftBO).

Standardisierung. Viele Verkehrsbetriebe haben die Tendenz, sich als einzigartig zu sehen und zu glauben, daß die bei Ihnen auftretenden Probleme so speziell sind, daß sie einer Sonderbehandlung bedürfen. Daneben ist die Vielfalt der Wünsche von Planern, Managern und Betriebsräten an Softwaresysteme nahezu unbegrenzt. Eine derartige Atomisierung der Problemstellungen ist ein wesentliches Hindernis für die Weiterentwicklung der Planungsmethodik. Nur da, wo Planungsprobleme standardisiert werden und

Daten in Standardformaten verfügbar sind, kann man beginnen, sich über einen längeren Zeitraum nachhaltig mit den zugrundeliegenden mathematischen Problemen zu beschäftigen, deren Struktur zu analysieren und Spezialverfahren zu entwickeln, so daß auch bei den hier vorliegenden Größenordnungen Hoffnung auf eine Lösung besteht. In Bereichen, in denen Standardisierung gelungen ist, haben sich im Laufe der Zeit leistungsfähige Methoden etabliert. Die Frage der „richtigen" Definition der Fragestellungen ist teilweise kontrovers. Der Gewinn durch Standardisierung ist aber meistens so groß, daß es sich für Unternehmen auf lange Sicht eher lohnt, sich in ihren Prozessen anzupassen, als mit individuell zugeschnittenen Speziallösungen zu arbeiten, bei denen die Entwicklung nicht im gleichen Tempo voranschreitet.

Wie üblich ist die Standardisierung im Flugverkehr am weitesten fortgeschritten. Dort ist der Planungsprozeß in allgemein akzeptierte Teilprobleme gegliedert, für die Datenschnittstellen und leistungsfähige Optimierungskomponenten zur Verfügung stehen. Im Busverkehr gibt es mittlerweile ähnliche Standards im Bereich der operativen Planung. In der Angebotsplanung entsteht teilweise Standardisierung durch Marktbeherrschung einzelner Softwareanbieter wie z.B. durch das Produkt VISUM der ptv AG. Diese Quasistandards bilden prinzipiell eine mögliche Basis für die Entwicklung von Optimierungsmethoden, müßten aber ausgebaut werden, da sie primär eher für Simulations- als für Optimierungszwecke konzipiert worden sind. Bei der Bahn hingegen verfolgt fast jedes Unternehmen einen individuellen Ansatz, so daß sich Ergebnisse nur sehr schwer von einer Bahn zur anderen übertragen lassen. Es gibt auch dort erste Standardisierungsbestrebungen, z.B. durch das *OpenTrack*-Projekt der ETH Zürich.

Regulierung und Deregulierung. Es ist allgemeiner Konsens, daß öffentlicher Verkehr zur Daseinsvorsorge des Staates gehört. Strittig ist jedoch, wie weit die Daseinsvorsorge reicht und wie das Verkehrsangebot organisiert wird, d.h. wie der Staat das angestrebte Wohlfahrtsmaximum für seine Bürger erreichen soll. In der Vergangenheit war man der Meinung, daß dem Bürger am besten dadurch gedient wird, daß staatlich betriebene, monopolistische Anbieter den ÖV durchführen. Diese Konzeption ist in Bedrängnis geraten. Unter anderem verfolgt die Europäische Union auch im ÖV eine eindeutige Deregulierungspolitik. Sie geht davon aus, daß ein Wohlfahrtsmaximum eher durch Marktmechanismen als durch Monopolstrukturen erreicht werden kann. Unterschiedliche Länder gehen dabei verschiedene Wege. Es ist vielfach unklar, welche Planungsfragen in Zukunft entstehen werden und welcher Marktteilnehmer aufgrund von Regulierungsmaßnahmen was planen soll.

Beim Busverkehr etwa werden folgende Szenarien diskutiert. Soll die Region das Verkehrsangebot im Detail festlegen und dann nur noch die Durchführung der Fahrten ausschreiben, sollen die Regionen Angebote von Nahverkehrsunternehmern prüfen und dem besten den Zuschlag geben, oder sollen die Nahverkehrsunternehmen im freien Wettbewerb als Mobilitätsanbieter tätig werden? Der Luftverkehr hat durch die von den USA initiierte Deregulierung einen enormen Aufschwung erlebt. Konkurrenz und dadurch notwendige Optimierungsmaßnahmen haben zu wesentlich höherer Effizienz geführt. „Sollen Rad und Schiene getrennt und was soll privat betrieben werden?“ sind kontrovers diskutierte Themen im Bahnbereich. Die Befürworter einer Bahnprivatisierung verweisen auf die Erfolge im Luftverkehr, die Gegner argumentieren, daß ein integriertes System als Gesamtheit besser geplant und gesteuert werden kann und damit kundenfreundlicher ist.

Bei monopolistischer Herangehensweise bietet sich die Chance auf eine integrierte Gesamtoptimierung, während bei Entstehen eines Marktes jeder Wettbewerber zur Optimierung seiner Aktivitäten gezwungen ist. Ob und wie reguliert und dereguliert wird, Mathematik ist in allen Fällen nützlich.

Regulierung und Deregulierung, Auktionen und Verteilungsmechanismen haben in der ökonomischen Theorie in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erfahren. Von einer mathematischen Theorie der Regulierung und Deregulierung kann man aber noch lange nicht sprechen. Bisher sind nur in sehr speziellen Einzelbereichen wie bei der Auktionierung von Transportleistungen, Schürfrechten oder Kommunikationsfrequenzen bereits quantitative Umsetzungen der theoretischen Überlegungen erfolgt — nicht immer zur Zufriedenheit aller Beteiligten.

4.2 Mathematische Modelle und Algorithmen

Die diskrete Optimierung ist zur Formulierung von sehr vielen der in der Verkehrsplanung auftretenden Planungsprobleme grundsätzlich ausgezeichnet geeignet, weil es sich vielfach um Ja/Nein-Entscheidungen handelt, die sich als 0/1-Optimierungsprobleme modellieren lassen. Die mathematischen Modellierer haben gelernt, auch komplexe Zusammenhänge in Form von linearen Gleichungen und Ungleichungen mit Ganzzahligkeitsbedingungen auszudrücken und so Modellierungswerkzeuge geschaffen, mit denen es im Prinzip möglich ist, Probleme des öffentlichen Verkehrs in größtmöglichem Detail mathematisch zu formulieren. Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile. Verkehrsplanungsprobleme können so exakt, mit allen ihren Nebenbedingungen und Voraussetzungen erfaßt und beschrieben werden. Diskrete Mathematik und Optimierung bieten sich als „Sprache der Verkehrsplanung“ an. Die Fragestellungen werden dadurch betriebs- und länderübergreifend kommunizier- und analysierbar. Mathematische Modelle helfen, die Problemkreise zu strukturieren, Spezialfälle und Verallgemeinerungen zu erkennen und zu benennen. Dabei sollte man nicht verschweigen, daß es für den Laien durchaus intransparent ist, welche der Modelle theoretisch oder praktisch einfach oder schwierig zu lösen sind. Selbst erfahrenen Optimierern ist oft nicht von vornherein klar, ob und in welchen Größenordnungen ein konkretes, schwieriges Problem gelöst werden kann.

Standardmodelle und -techniken. Im Laufe der Zeit haben sich eine Reihe von Standardmodellen der kombinatorischen Optimierung herauskristallisiert, die häufig im Verkehrsbereich Anwendung finden (Partitionierungs-, Pfadüberdeckungs- und Flußprobleme); hinzu kommen Basismethoden wie der Einsatz von Verfahren der Linearen und Ganzzahligen Optimierung. An diesen Modellen und Algorithmen ist in den letzten Jahrzehnten intensiv gearbeitet worden. Heute können Größenordnungen bearbeitet werden, von denen man vor wenigen Jahren noch nicht geträumt hätte. Eine Studie von Bob Bixby aus dem Jahr 2004 hat gezeigt, daß Lineare Programme, die 1988 zwei Monate Rechenzeit zu ihrer Lösung benötigten, 2004 in einer Sekunde gelöst werden konnten. Die Beschleunigung der Rechner trug hierzu einen Faktor von etwa 1.600, die Verbesserung der LP-Algorithmen einen Beschleunigungsfaktor von 3.300 bei. Das schlichte Aufschreiben von mathematischen Modellen und die Verwendung von Standardtechniken reicht aber nur bei kleinen Verkehrsbetrieben und bei speziellen Fragestellungen zur Lösung der anstehenden Aufgaben aus. Häufig führen geringfügig erscheinende, aus praktischen Gegebenheiten herrührende Modifikationen zu deutlichen Erhöhungen des Schwierigkeitsgrades, welchen nur durch gezielte Forschungsanstrengungen begegnet werden kann. Die Berücksichtigung von Zeitfenstern, Reihenfolgebedingungen, Weglängenbeschränkungen usw. sind typische Beispiele hierfür.

Daten für akademische Forschung. Anwendungsnahe algorithmische Forschung zu $\mathcal{NP}$-schweren Problemen ist nur erfolgversprechend, wenn praxisgerechtes Datenmaterial zur Verfügung steht, an dem die algorithmischen Alternativen experimentell ausgetestet werden können. Die Verfügbarkeit von Praxisdaten für akademische Forschung ist von größtem Wert. Man muß feststellen, daß die Situation in diesem Bereich sehr unbefriedigend ist. Selbst staatliche Verkehrsbetriebe, die mit zusätzlichen staatlichen Mitteln Daten erheben, stellen diese Daten (mit ganz wenigen Ausnahmen) nicht einmal vertraulich für akademische Forschung zur Verfügung. Diese Furcht vor der Bekanntgabe von Betriebsgeheimnissen behindert den Fortschritt bei der mathematischen Lösung von Planungsproblemen im öffentlichen Verkehr erheblich.

Theorie und Algorithmen. Die im Verkehrsbereich auftretenden Planungsprobleme führen in der Regel zu kombinatorischen Optimierungsproblemen mit einer extrem großen Anzahl von Variablen und/oder Nebenbedingungen, die von kommerziellen Standardcodes der linearen oder ganzzahligen Programmierung nicht bearbeitet werden können. In den letzten 10 Jahren wurden Techniken wie Lagrangean Pricing oder Separierungsalgorithmen entwickelt, die mit derartigen Problemgrößen umgehen können, indem sie nicht alle Details des Problems von Anfang an behandeln, sondern die jeweils erforderlichen Variablen und Nebenbedingungen dynamisch generieren. Mit diesen Techniken kann man klassische Probleme der Verkehrsplanung in ausreichender Qualität lösen.

Es schließen sich eine Reihe weiterführender Fragen an, an denen heute wissenschaftlich gearbeitet wird:

- *Koppelung von diskreten Modellen (Integrierte Planung).* Bisher ist es nur in Einzelfällen geringer Größe und hoher Struktur gelungen, die Koppelung von zwei diskreten Modellen (z.B. Fahrereinsatzplanung und Fahrzeugumlaufplanung) erfolgreich zu behandeln. Das Fernziel besteht darin, die künstliche Zerlegung des ÖV-Plaungsprozesses in hierarchisch geordnete Einzelprobleme zu überwinden und mit Hilfe eines Baukastens von Modellen und Methoden, die sich miteinander kombinieren lassen, eine Gesamtplanung in einem Zug vorzunehmen. Man versucht, diese Kombination mit Methoden der nichtlinearen und nichtdifferenzierbaren Optimierung (Subgradienten- und Bündelverfahren) zu erreichen. Hier besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

- *Robuste und Stochastische Planung.* Ein Aspekt, der erst durch die Erfolge der Optimierung verstärkt ins Bewußtsein gerückt ist, ist, daß sehr ausgefuchste Pläne besonders anfällig gegenüber Störungen sind. Das übergeordnete Ziel muß deshalb sein, einen Plan zu berechnen, der nicht nur auf dem Papier gut aussieht, sondern auch in der tatsächlichen Umsetzung. Hier gilt es, Puffer auf optimale Weise so einzubauen, daß kleinere Störungen ohne große Umplanungen gut abgefangen werden können. Es gibt derzeit mehrere, zumindest theoretisch konkurrierende Ansätze zur Behandlung dieser Frage, insbesondere Methoden der robusten und stochastischen Optimierung scheinen hierzu geeignet zu sein. Praktische Erfahrungen liegen jedoch kaum vor.

- *Echtzeit-Planung.* Verkehrssysteme geraten gelegentlich aus dem Ruder, weil man nicht alle potentiellen Störungsmöglichkeiten in die Planung miteinbeziehen kann. Genau diese Störungen sind es, die den Fahrgast am meisten beeinträchtigen, insbesondere wenn er keine Informationen über den weiteren Verlauf seiner Reise erhält. Ein solches Szenario ist ein Fall für die sog. Echtzeit-Optimierung, die versucht, solche Sachverhalte in den Griff zu bekommen. Man muß allerdings feststellen, daß die theoretischen Werkzeuge nicht sonderlich weit entwickelt sind und insbesondere kaum brauchbare Aussagen für das praktische Verhalten von Online-Algorithmen liefern. Ein wichtiges Anliegen besteht darin, für die Echtzeit-Optimierung von Verkehrssystemen theoretisch fundierte, praxisadäquate Methoden zu entwickeln.

- *Koppelung von diskreten, stochastischen und nichtlinearen Modellen*

(Infrastrukturplanung). Ein Bereich, der aus unserer Sicht nahezu mathematikfrei ist, ist die Infrastrukturplanung von Verkehrssystemen. Wenn irgendwo noch traditionelle Planung dominiert, dann ist dies hier der Fall. Entscheidungsfindung ist politischer Natur, wobei einige technische Details, Erfahrungswissen und in guten Fällen der Einsatz von Simulationssoftware Berücksichtigung finden..

Die Entwicklung mathematischer Methoden zur Infrastrukturplanung ist ohne Frage schwierig, weil sie die Kombination von Modellen aus unterschiedlichen Bereichen der Mathematik erfordert, insbesondere von solchen, die mit verschiedenen mathematischen Werkzeugen arbeiten. Nutzerverhalten kann nur prognostiziert und damit stochastisch modelliert werden, Größen wie Einnahmen = Preis × Nachfrage führen zu Nichtlinearitäten, Angebote von Monatskarten zu Treppenfunktionen und damit zu Unstetigkeiten, die Betrachtung des Tradeoffs zwischen Qualität und Preis führt zu Überlegungen der multikriteriellen Optimierung, und diese Liste läßt sich noch beliebig fortsetzen.

Betrachtet man jedoch die langfristige Wirksamkeit der Entscheidungen und die Höhe der Investitionskosten, wäre es angebracht, ernsthafte Versuche einer modellgestützten Langfristplanung zu unternehmen. Die Forschung beschäftigt sich mit einigen hier auftretenden Basisproblemen wie nichtlinearen Netzwerkflußproblemen und ganzzahligen Programmen mit speziellen Nichtlinearitäten, der grundsätzlichen Beschleunigung von Ansätzen der stochastischen Optimierung z.B. durch Szenarioreduktion, der algorithmischer Spieltheorie usw. Einige erste Erfolge sind beim Einsatz von Discrete Choice Modellen bei der Preisplanung im ÖPNV oder beim Revenue Management im Flugverkehr auf Netzbasis zu verzeichnen.

Am Ende können Entscheidungen über Infrastrukturmaßnahmen natürlich nicht mit einem einzigen mathematischen Modell getroffen werden. Alternativrechnungen, komplexe Simulationen von Szenarien müssen gleichfalls als Entscheidungskriterien herangezogen werden.

4.3 Transfer und Ausbildung

Kommunikation und Ausbildung. Ein Hindernis bei der Erzielung von Synergien zwischen Praktikern, Algorithmenentwicklern und Theoretikern ist ein oft bestehender Mangel an Bereitschaft, aufeinander zuzugehen. Mathematiker wollen sich ungern in die Niederungen der Datenbeschaffung begeben, Praktikern erscheinen die Überlegungen der Mathematiker zu abgehoben. Das fängt sogar schon bei der Sprache an. Wenn ein Praktiker von Optimierung spricht, meint er häufig etwas anderes als ein Mathematiker. Dieses Kommunikationsproblem verstärkt sich durch Unkenntnis über die Beiträge, die die jeweils andere Gruppe leisten könnte. Im Rahmen dieses

Beitrags sticht insbesondere ein Defizit in der Ausbildung der im Verkehrsbereich tätigen Ingenieure in Bezug auf moderne Methoden der Optimierung, Graphentheorie und diskreten Mathematik hervor. Jeder Ingenieur weiß, was eine Differentialgleichung ist, viele haben aber nicht gelernt, daß man Entscheidungsprobleme als ganzzahlige Programme formulieren und lösen kann, obwohl dies der moderne Zugang zu einer guten Verkehrsplanung ist. Dies ist (übrigens weltweit) ein klarer Mangel, der in der Hochschulausbildung behoben werden muß.

Firmenlandschaft. Im Luftverkehr entstanden bei Beginn der Mathematisierung der Planung in vielen Unternehmen Operations Research (oder ähnlich genannte) Abteilungen, die sich mit den in diesem Artikel genannten Planungsproblemen beschäftigten und proprietäre Lösungen entwickelten. Im Laufe der Jahre sind die meisten dieser Abteilungen ausgesourct worden, die besten unter ihnen haben sich zu Softwareanbietern entwickelt, die standardisierte Lösungen anbieten, welche viele Luftverkehrsgesellschaften nutzen. Im Gegensatz dazu haben sich bei Bussen und Bahnen ähnliche OR-Abteilungen nur in geringem Maße entwickelt. Softwareentwicklung wird im Bus- und Bahnbereich von Anbietern betrieben, die aus dem universitären Umfeld stammen. Alle diese Firmen sind klein im Vergleich zu ihren Kunden und haben das Problem, ihre Ideen und internen Standards gegen die vielen Sonderwünsche ihrer großen Kunden durchzusetzen. Diese Sonderwünsche führen durch Fragmentieren des Softwaremarktes zu hohen Kosten, weil überall kostenträchtige Spezialentwicklungen und entsprechende Wartungen erfolgen müssen. Kleine Anbieter haben es auch schwer, genügend Werbung zu machen, um ihre Innovationen im Markt erfolgreich zu plazieren.

4.4 Fazit

Probleme der Infrastrukturplanung, der Personaleinsatzplanung, etc. sind seit über 100 Jahren jeweils zeitaktuelle Fragestellungen in der Verkehrswissenschaft. Für ihre Lösung wurden die zur jeweiligen Zeit verfügbaren Werkzeuge der Technik und Mathematik eingesetzt. Im Nachruf auf den bedeutenden Verkehrswissenschaftler Rüger schrieb der Dekan der verkehrswissenschaftlichen Fakultät Dresden:

> „Die Nutzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Verbesserung der Arbeit der Nahverkehrsbetriebe, ihre Umsetzung und Handhabung in der Planungs- und operativen Arbeit waren stets seine Maxime."

Rüger [31] in der DDR und Lehner [24] in der Bundesrepublik haben in den siebziger Jahren richtungsweisende Werke zur Verkehrsplanung geschrieben, in denen im Prinzip ein Verkehrsbetrieb mathematisch modelliert wird. Damals mußten die Entscheidungprobleme auf (aus heutiger Sicht) einfache, praxisadäquate Formeln reduziert werden, die auch heute noch vernünftige

Handlungsanweisungen für die Praxis darstellen. Die Fortschritte der Mathematik ermöglichen nun aber völlig neue Herangehensweisen, bei denen Entscheidungen als Lösungen komplexer Netzwerkmodelle entstehen. Ziel muß es sein, diese Mathematik konsequent weiterzuentwickeln und damit im Sinne Rügers und Lehners die Planungsabläufe kontinuierlich zu verbessern, so daß Ressourcen geschont, der Einsatz von Steuermitteln reduziert und die Kunden mit bedarfsgerechten und nutzerfreundlichen Verkehrsangeboten versorgt werden.

Wir sehen den Übergang von der formelgestützten Planung zu der hier skizzierten modellgestützten mathematischen Planung als einen ähnlichen Sprung wie von der Braunschen Röhre zum Transistor, vom Reißbrett zum CAD-System und sind davon überzeugt, daß sich Mathematik in immer stärkerem Maße als ein wesentlicher Produktionsfaktor im öffentlichen Verkehr etablieren wird.

Trotz der genannten Defizite in der Kommunikation zwischen den Disziplinen, in der Ausbildung und beim Transfer in die Industrie bietet Deutschland aus unserer Sicht die besten Voraussetzungen, dem Einsatz von mathematischen Planungsmethoden im öffentlichen Verkehr zum Durchbruch zu verhelfen. Die deutschen Verkehrssysteme gehören zu den besten der Welt, deutsche Softwarefirmen sind international führend, und an deutschen Hochschulen beschäftigen sich in verschiedenen Fachbereichen Wissenschaftler auf höchstem internationalen Niveau mit der quantitativen Behandlung von Planungsproblemen im öffentlichen Verkehr. Im ÖV sind erhebliche Optimierungspotentiale vorhanden. Das Know-How, um diese heben, ist verfügbar. Wenn es gelingt, die unterschiedlichen Akteure zu einem koordinierten und zielgerichteten Zusammenspiel zu bringen, könnte Deutschland sich zu einem Schaufenster für effizienten Nahverkehr entwickeln.

5 Visionen und Handlungsempfehlungen

Unsere Vision ist, diskrete Mathematik und Optimierung als einen wesentlichen Produktionsfaktor in allen Bereichen der Verkehrsplanung zu etablieren. Die mathematischen Modelle und Methoden müssen so ausgebaut werden, daß sie die verschiedenen Planungsprozesse in der Praxis nutzerfreundlich und anwendungsadäquat unterstützen. Hier sind Fortschritte (in einigen Teilbereichen durchaus erhebliche) in der Mathematik erforderlich, aber auch die Schnittstellen zu den beteiligten Ingenieuren und Praktikern müssen durch gemeinsame Anstrengungen verbessert werden.

Wir wir im vorhergehenden dargestellt haben, gibt es in fast allen Bereichen der ÖV-Planung Handlungsbedarf. Dieser erstreckt sich von mathematischer Modellierung, der dazu zu entwickelnden Theorie, über die Umsetzung dieser Theorie in Algorithmen bis hin zur Einführung von Optimierungssystemen in die Praxis. Dies sind Aufgaben für Jahrzehnte, bei denen nicht nur mathematische und innerbetriebliche Hindernisse überwunden, sondern auch politische Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

Wir wollen hier zwei konkrete Maßnahmen vorschlagen, die relativ kurzfristig gestartet werden und vom BMBF/BMWi oder der DFG zusammen mit der Industrie finanziell auf den Weg gebracht werden können. Beide Maßnahmen zeichnen sich durch verkehrstypische Interdisziplinarität aus. Sie verknüpfen mathematische Forschung mit ingenieurwissenschaftlichem Know-How, betriebswirtschaftlichen Kenntnissen, Erfahrungen von Praktikern und beziehen die innovative Nutzung von IT-Systemen mit ein.

5.1 Diskrete Optimalsteuerung: Umplanung von Verkehrssystemen bei Störungen in Echtzeit

Störungen im Betriebsablauf von Verkehrssystemen sind praktisch unvermeidlich. Größere Störungen erfordern Umplanungsmaßnahmen, die unmittelbar nach dem Eintritt der Störungen eingeleitet werden müssen. Aus mathematischer Sicht ist dies ein Thema der Online- bzw. der Echtzeit-Optimierung. Um Online-Optimierung sinnvoll einsetzen zu können, müssen viele Voraussetzungen erfüllt sein. Alle Daten über den geplanten und den aktuellen Zustand des Verkehrssystems müssen vorhanden sein. Daneben benötigt man Prognosen über die möglichen Entwicklungen des Systems und vorhandene Alternativen. Das Ziel ist, das Verkehrssystem wieder in einen Zustand zu bringen, so daß Plan und Stand weitgehend übereinstimmen und die „Schäden“ so gering wie möglich sind.

Online-Planung wird heute in den Leitzentralen der Verkehrsbetriebe durch erfahrene Disponenten vorgenommen, die durch Betriebsleitsysteme und deren Visualisierungsmöglichkeiten unterstützt werden. Die Disposition erfolgt aber weitgehend „per Hand“. In den meisten Fällen wird hier mit Hilfe von Entscheidungstabellen bzw. einem Regelwerk gearbeitet, das klare Handlungsanweisungen gibt, aber keine Optimierung vornimmt. Die Einbeziehung von Zielen und nicht nur die Abarbeitung von Regeln soll durch Echtzeit-Optimierung verfolgt werden. Ein Umstieg auf derartige mathematische Planung erfordert insbesondere eine Anpassung der IT-Infrastruktur und die Verknüpfung verschiedenster Datenbestände, ein nicht einfaches informationstechnisches Unterfangen.

Ein grundsätzliches Problem der Online-Optimierung ist die Aufzeichnung von Daten, mit deren Hilfe sich der Ablauf analysieren und rekonstruieren läßt. Idealerweise müßten solchen Daten nicht nur den Betriebsablauf aufzeichnen, sondern auch die Ursachen für Störungen und die Dispositionsmaßnahmen vermerken. Solche Daten sind in der Regel nicht vorhanden. Ein Forschungsprogramm zur Online-Optimierung sollte bereits auf dieser Ebene ansetzen und eine qualitativ hochwertige Datengrundlage schaffen.

Diese Daten müssen mit Simulationssystemen verknüpft werden können, mit denen sich exemplarisch Verifikationen einzelner Szenarien durchführen lassen. Solange es noch keine in der Praxis erprobte Online-Theorie gibt, ist der Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Überprüfung von Lösungsansätzen erforderlich. Im Bahnbereich ist die Betriebssimulation eine langjährig geübte Praxis, die mit einer ganzen Reihe von Systemen, wie RailSys, OpenTrack, etc. realitätsnah durchgeführt werden. Im Bus- und Flugverkehr fehlen solche Simulationssysteme noch.

Die zu entwickelnden mathematischen Echtzeit-Algorithmen sollten die langjährigen Erfahrungen der Disponenten berücksichtigen und natürlich ihre heuristischen Regeln zur Systemumplanung einbeziehen. Zusammenarbeit ist hier erforderlich zwischen Mathematikern, Datenverarbeitungsfachleuten und erfahrenen Disponenten. Darüber hinaus sehen wir einen möglichen Fortschritt darin, daß mathematische Algorithmen den Zustand von Verkehrssystemen im Sinne eines Regelkreises überwachen und steuernd auch präventiv eingreifen, wenn Zustandsänderungen sichtbar oder prognostiziert werden, die den Betrieb beeinträchtigen können. Ideen dieser Art könnte man unter dem Begriff „Diskrete Optimalsteuerung“ fassen. Gemeint ist dabei der fortlaufende Einsatz von Optimierungsalgorithmen, um Verkehrssysteme im Plan zu halten. Solche Fragestellungen werden z.B. in Mechanik und Verfahrenstechnik betrachtet und mathematisch unter den Begriffen Kontrolltheorie und Optimalsteuerung behandelt. Sie werden typischerweise mit Methoden der Differentialgleichungstheorie bearbeitet. Das neue im vorliegenden Fall ist, daß auch Methoden der diskreten Optimierung maßgeblich zum Einsatz kommen.

Projekte dieser Art hätte man schon vor 10 Jahren starten können. Damals waren jedoch die IT-technischen Voraussetzungen noch nicht gegeben. Heute besteht eine Chance, informationstechnisches Know-How, mathematische Methoden und betriebliche Erfahrung so zusammenzubringen, daß sie für alle am Verkehrsgeschehen Beteiligten Nutzen bringen. Die Spannbreite dieses Projektes kann von der Echtzeit-Optimierung von U-Bahnen, Straßenbahn- und S-Bahn-Systemen, über die Echtzeit-Optimierung von Nahverkehrsbussen bis hin zur Echtzeit-Optimierung des gesamten deutschen Bahnnetzes oder des europäischen Luftraums führen, wobei klar ist, daß letztere sicherlich noch Zukunftsmusik sind. Für den Kunden ist wichtig, daß Echtzeit-Optimierung mit Fahrgastinformationssystemen verbunden wird, so daß die Fahrgäste einen direkten Nutzen davon haben.

5.2 Modellintegration: Angebotsplanung im Bus- und Bahnbereich

Wir haben über verschiedene Aspekte der Modellintegration gesprochen und wollen hier vorschlagen, in dem speziellen Bereich der Angebotsplanung im

Bus- und Bahnverkehr verschiedene mathematische Modelle so zu integrieren, daß diese algorithmisch lösbar sind und zu verkehrsplanerisch sinnvollen Aussagen führen.

Genau wie im vorhergehenden Fall der diskreten Optimalsteuerung liegen die eigentlich benötigten Daten nicht in hinreichender Exaktheit vor.

Das Besondere an der Angebotsplanung ist die enge Verzahnung verschiedener Aspekte. Wir haben bereits ausgeführt, daß die Prognose von Nachfrage ein stochastisches Problem ist, während der Entwurf von Netzen auf diskrete Optimierungsprobleme führt und die Festlegung von Tarifen ein Thema der nichtlinearen gemischt-ganzzahligen Optimierung ist. Die Integration von Modellen aus verschiedenen mathematischen Disziplinen ist deshalb eine notwendige Bedingung für die Entwicklung erfolgreicher Ansätze zur Angebotsplanung. Modellintegration ist in der Regel hoffnungslos schwierig, jedoch erscheinen uns in diesem konkreten Fall aufgrund der speziellen Strukturen erfolgreiche Lösungsansätze möglich zu sein.

Erste Schritte in diese Richtung wurde z.B. bei Straßenmautsystemen durch den Einsatz von sog. Bilevel-Optimierung erzielt. Im Bereich der Preisplanung gibt es Ansätze, nichtlineare Optimierungsmodelle mit stochastischen Nachfragemodellen (Discrete Choice Logit-Modelle) zu kombinieren.

Das Vorgehen würde sich an historisch gewachsenen Planungsstrukturen orientieren, aber über die Durchrechnung einiger weniger Szenarien hinaus können diese Modelle Rückkopplungseffekte betrachten und Substitutionseffekte z.B. durch Betrachtung des Individualverkehrs mit einbeziehen.

Literatur

[1] R. E. Anbil, B. Patty Gelman, and R. Tanga. Recent adavances in crew-pairing optimization at american airliens. *Interfaces*, 21:62–74, 1991.

[2] Cynthia Barnhart, Amy M. Cohn, Ellis L. Johnson, Diego Klabjan George L. Nemhauser, and Pamela H. Vance. Airline crew scheduling. In Randolph W. Hall, editor, *Handbook of Transportation Science*, pages 517–560. Kluwer, Boston, 1999.

[3] Cynthia Barnhart, Ellis L. Johnson, George L. Nemhauser, Martin W. P. Savelsbergh, and Pamela H. Vance. Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations Research*, 46(3):316–329, 3 1998.

[4] Berliner Verkehrsbetriebe AöR. Geschäftsbericht 2006. `http://www.bvg.de/index.php/de/Common/Document/field/file/id/1409`, 2006.

[5] Andreas Bley and Marcus Pattloch. Modellierung und optimierung der x-win plattform. *DFN-Mitteilungen*, 67:4–7, 2005.

[6] Ralf Borndörfer, Martin Grötschel, and Andreas Löbel. Duty scheduling in public transit. In Willi Jäger and Hans-Joachim Krebs, editors, *MATHEMA-*

TICS – Key Technology for the Future, pages 653–674. Springer Verlag, Berlin, 2003. ZIB Report 01-02.

[7] Ralf Borndörfer, Martin Grötschel, and Marc E. Pfetsch. A column-generation approach to line planning in public transport. *Transportation Science*, 41(1):123–132, 2007.

[8] Sven Brieger. Workflow oriented and integrated optimization. AGIFORS Conference, 5 2005.

[9] Thomas M. Cook. Sabre soars. *ORMS Today*, 25(3):27–31, 6 1998.

[10] J. R. Daduna and A. Wren, editors. *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag, 1988.

[11] Joachim R. Daduna, Isabel Branco, and José M. Pinto Paixão, editors. *Proc. of the Sixth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT), Lisbon, Portugal, 1993*, volume 430 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Berlin, Heidelberg, 1995. Springer-Verlag.

[12] Camil Demetrescu, Andrew Goldberg, and David Johnson, editors. *9th DIMACS Implementation Challenge — Shortest Path*, Piscataway, New Jersey, 2006. DIMACS.

[13] Guy Desaulniers and Jaques Desrosiers Marius M. Solomon, editors. *Column Generation (Gerad 25th Anniversary)*. Springer, Berlin, 2005.

[14] M. Desrochers and J.-M. Rousseau, editors. *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag, 1992.

[15] Deutsche Bahn AG. Geschäftsbericht 2006. `http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/investor\_\_relations/finanzberichte/geschaeftsbericht/geschaeftsbericht\_\_2006.html`, 2006.

[16] Deutsche Lufthansa AG. Geschäftsbericht 2006. `http://konzern.lufthansa.com/de/downloads/presse/downloads/publikationen/lh\_gb\_2006.pdf`, 2006.

[17] Edsger Wybe Dijkstra. A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, 1:269–271, 1959.

[18] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. *Heureka '05: Optimierung in Verkehr und Transport*, Köln, 2005.

[19] Michael R. Garey and David S. Johnson. *Computers and intractability.* Freeman, 1979.

[20] Martin Grötschel, Sven O. Krumke, Jörg Rambau, and Luis M. Torres. Making the yellow angels fly: Online dispatching of service vehicles in real time. *SIAM News*, 35(4):10–11, 2002.

[21] Karla L. Hoffman and Manfred Padberg. Solving airline crew scheduling problems by branch-and-cut. *Management Science*, 39(6):657–682, 1993.

[22] Diego Klabjan, Ellis L. Johnson, George L. Nemhauser, Eric Gelman, and Srini Ramaswamy. Solving large airline crew scheduling problems: Random pairing generation and strong branching. *Computational Optimization and Applications*, 20(1):73–91, 2001.

[23] John O. Ledyard, Mark Olson, David Porter, Joseph A. Swanson, and David P. Torma. The first use of a combined-value auction for transportation services. *Interfaces*, 32(5):4–12, 2002.

[24] Friedrich Lehner. *Der maximale Wirkungsgrad des Personaleinsatzes*. Alba Verlag, Düsseldorf, 1978.

[25] Christian Liebchen. *Periodic Timetable Optimization in Public Transport*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2006.

[26] K. Littlewood. Forecasting and control of passenger bookings. In *AGIFORS Symposium Proceedings*, volume 12, Nathanya, Israel, 1972.

[27] Andreas Löbel. *Optimal Vehicle Scheduling in Public Transit*. Shaker Verlag, Aachen, 1997. Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin.

[28] Martin Müller-Elschner. Die microbus-optimierungskomponenten im überblick. Vortrag, 6 2005.

[29] Marika Neumann. Mathematische Preisplanung im ÖPNV. Diplomarbeit, TU Berlin, 2005.

[30] Partner für Berlin Gesellschaft für Hauptstadt-Marketing GmbH. Berlinbrief, 2003. ISSN 1611-3284.

[31] Siegfried Rüger. *Transporttechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr*. Transpress, Berlin, 1986.

[32] Barry C. Smith, John F. Leimkuhler, and Ross M. Darrow. Yield management at american airlines. *Interfaces*, 22(1):8–31, 1992.

[33] Andreas Sturmowski. Notwendigkeit der effizienzsteigerung unter einsatz von it-tools. In *Proceedings der IVU-Konferenz IT im ÖPNV am 05.10.2007*. IVU Traffic Technologies AG, Berlin, 9 2007.

[34] Kalyan T. Talluri and Garrett J. van Ryzin. *The Theory and Practice of Revenue Management*, volume 68 of *International Series in Operations Research and Management Science*. Kluwer, Boston, MA, 2005.

[35] Stefan Voss and Joachim Daduna, editors. *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag, 2001.

[36] N. H. M. Wilson, editor. *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag, 1999.

[37] Gang Yu, editor. *Operations Research in the Airline Industry.* Kluwer, Dordrecht, 1998.

[38] Gang Yu, Michael Argüello, Gao Song, Sandra M. McCowan, and Anna White. A new era for crew recovery at continental airlines. *Interfaces*, 33(1):5–22, 2003.