Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

MARTIN GRÖTSCHEL

Verkehrsplanung: Bessere Lösungen mit Mathematik

Preprint SC 99-54 (Juli 1999)

Verkehrsplanung: Bessere Lösungen mit Mathematik

Martin Grötschel

Juli 1999

Anwendungen der Mathematik in der Verkehrs- und Transporttechnologie haben eine große und bedeutende Tradition. Natürlich wurden die ersten Fahrzeuge mit der ingenieurmäßigen Methode von Versuch, Irrtum und Verbesserung entworfen. Aber schon sehr bald kamen mathematische Berechnungen hinzu, mit denen mechanische Eigenschaften von Fahrzeugteilen ermittelt und zum Teil optimiert wurden. Die hierzu erforderliche Mathematik wurde in diesem Jahrhundert zu einem mächtigen Werkzeugkasten ausgebaut. Mit diesem kann man heute z.B. hocheffiziente Motoren mit geringem Schadstoffausstoß entwerfen, aerodynamisch günstige Fahrzeugprofile ermitteln und Flugzeugflügel berechnen, die die gewünschte Last sicher und mit geringem Treibstoffaufwand tragen. Die Mathematik unterstützt die Technologie des Verkehrs beginnend bei globalen Designfragen bis hin zur Spezifizierung von Materialeigenschaften kleinster Bauteile; sie berechnet mit hoher Präzision energieoptimale Bahnen von Raumflugkörpern oder zeitoptimale Trajektorien für Flugzeuge, steuert automatische Roboteranlagen oder innerbetriebliche Transportsysteme.

Verkehrsplanung: eine Einführung

Diese – technologisch sehr bedeutsamen – Anwendungsaspekte der Mathematik sind jedoch nicht das Thema der heutigen Sitzung. Heute geht es um mathematische Beiträge zur Verkehrsplanung.

Bemerkenswert ist, daß die Lösung militärischer Transportprobleme eine der Wurzeln der modernen mathematischen Optimierung ist. Das moderne Operations Research wurde erstmals erfolgreich bei der Planung der Logistik des US-Pazifikkrieges eingesetzt; Operations Research unterstützte gleichfalls maßgeblich die Planungen der Berliner Luftbrücke, siehe [8]. Aus diesen Anfängen entstanden die mathematischen Gebiete "Lineare Programmierung" und "Kombinatorische Optimierung". Sie sind heute insbesondere bei Planungsproblemen in Technik und Wirtschaft unverzichtbar geworden, siehe [3], [4], [6], [8], [9], [10].

Es ist erstaunlich, daß trotz früher Anfänge und häufiger Versuche mathematische Methoden in der Verkehrsplanung nie in dem eigentlich erwünschten Maße zum Einsatz gekommen sind. Ein Grund hierfür liegt darin, daß Verkehrsplanungsprobleme zu außerordentlich großen Optimierungsproblemen führen, die vor noch wenigen Jahren nicht optimal oder auch nur nahezu optimal gelöst werden konnten. Aber hierzu haben sicherlich auch Kommunikationsprobleme zwischen den verschiedenen beteiligten Disziplinen beigetragen.

Heute stellt sich die Situation deutlich günstiger dar. In der Mathematik wurden Methoden entwickelt, mit denen man Verkehrsplanung nachhaltig unterstützen kann. In vielen Anwendungsbereichen hat man gelernt, adäquate mathematische Modelle der vorliegenden Planungsprobleme zu bilden. In manchen Betrieben hat das Management bemerkt, daß das Einsparpotential, das Mathematik bietet, erheblich ist. Die Verständigungsprobleme zwischen Ingenieuren, Betriebswirten, Informatikern und Mathematikern konnten manchmal, jedoch nicht überall, überwunden werden. Gemeinsame Anstrengungen aller Beteiligten haben vielfach zu deutlichen Verbesserungen in der Planung und zu einem kostengünstigeren Betrieb geführt. Einige Aspekte dieser Entwicklung sollen hier dargestellt werden.

Worum geht es?

Der vorliegende Beitrag faßt die drei Vorträge

Prof. Dr. Martin Grötschel (Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik und Technische Universität Berlin): "Transport und Verkehr: Was kann man verbessern?"

Dr. Norbert Ascheuer (Intranetz GmbH): "Bedarfsorientierte Transportsysteme"

Uwe Strubbe (IVU Traffic Technologies AG): "Endlich nicht mehr warten: ÖPNV-Planungssysteme"

zusammen und stellt sie in einen einheitlichen Rahmen. In dieser Übersicht sollen die Verbesserungspotentiale skizziert werden, die durch den Einsatz mathematischer Methoden bei der Verkehrsplanung erschlossen werden können.

In drei durch jeweils 15 Minuten Redezeit beschränkten Vorträgen kann man natürlich nicht das volle Spektrum darstellen. Es sind daher die gesamten Aspekte der Logistik (z.B. der Baustellenlogistik, wie sie für Berlin zur Zeit von großer Bedeutung ist), der Steuerung innerbetrieblicher Transportsysteme (wie Automatic Guided Vehicles, Kommissionierfahrzeuge, Förderbänder, Aufzüge, etc.), der Steuerung von Verkehrsströmen des überregionalen Verkehrs (z.B. auf Autobahnen) sowie von Verkehrsleitsystemen in Städten von der Darstellung ausgespart.

Der Beitrag konzentriert sich auf eine Übersicht über Planungssysteme für spezielle Verkehrsarten, wie sie sich zum Beispiel im öffentlichen Nahverkehr und damit verwandten Verkehrssystemen finden. Es wird ein Versuch unternommen, einige der wichtigsten hier auftretenden Fragestellungen zu skizzieren und dabei anzudeuten, mit welchen mathematischen Methoden die vorliegenden Probleme gelöst werden können. Es wird auch erwähnt, welche Erfolge bereits erzielt worden sind und was man von einer Einbindung dieser Methoden in den traditionellen Planungsprozeß in Zukunft erwarten kann.

"Vision"

Ich möchte beginnen mit einer mathematischen Idealisierung des Verkehrsgeschehens, die Vision und Illusion zugleich ist.

Wir stellen uns vor, daß zeitlich gestaffelte Start-Ziel-Matrizen bekannt sind. Solche Matrizen geben an, welche Transport- und Verkehrsleistungen in einer vorgegebenen Region (z.B. in der Stadt Berlin) wann, von wo und nach wo erbracht werden sollen. Die Aufgabe besteht darin, diese erwünschten Verkehrsleistungen Verkehrsträgern so zuzuordnen, daß alle Anforderungen erfüllt, verschiedene technische und rechtliche Nebenbedingungen eingehalten werden und die Kosten für die Erbringung der Verkehrsleistung möglichst gering sind.

Solche Start-Ziel-Matrizen werden in vielen Regionen regelmäßig erhoben. Es ist jedoch nicht vorstellbar, daß präzise Daten jemals vollständig ermittelt werden können. Eine derartig überzogen anspruchsvolle Planung kann alleine aus diesen Gründen und nicht nur aufgrund zu großer mathematischer Komplexität von niemandem erbracht werden.

Verkehrsinfrastruktur

Unser Verkehrswesen hat sich, historisch bedingt, auf vielfältige Weise ausdifferenziert. Dabei ergänzen sich einzelne Verkehrsträger gegenseitig oder stehen in Konkurrenz.

Die Verkehrsinfrastruktur basiert auf zwei Säulen: auf der Fahrzeugtechnologie und auf den Transportnetzwerken.

Die technologische Entwicklung hat natürlich begonnen mit dem Transport von Waren durch den Menschen, später durch Tiere, danach durch Schiffe. Heute sind wir von technologisch hochkomplexen Transportsystemen umgeben: Eisenbahnen, Straßenbahnen, Flugzeuge, Autos und LKWs und sogar Raketen. Dabei sind in der Fahrzeugtechnologie ernorme Fortschritte erzielt worden, bei denen auch die Mathematik wichtige Leistungen erbracht hat. Gleichzeitig sind weltweit komplizierte Transportnetzwerke entstanden durch die Schiffbarmachung von Flüssen, das Baggern von Kanälen, die Errichtung von Häfen an Flüssen und an Meeren, dem Bau von Wegen, Straßen und Autobahnen, der Einrichtung von Bahnlinien und dem Bau von Flughäfen. Der technischen Infrastruktur durch Fahrzeugtechnologie steht gleichwertig gegenüber das System von Transportnetzwerken. Beide zusammen stellen die derzeitige Infrastruktur für den weltweiten Verkehr dar.

Es ist klar, daß ökonomische und betriebswirtschaftliche Überlegungen bei der Organisation des Verkehrs eine Rolle spielen. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Informatik hinzugesellt, die heute durch Überwachungsmechanismen, durch Telekommunikationstechniken, durch Sensorik und insbesondere durch aufwendige Softwaresysteme, die das Verkehrsgeschehen überwachen und steuern, zu einem unverzichtbaren Bestandteil geworden ist.

Von dieser hohen Warte aus betrachtet sind Verkehr und Transport eine Kombination aus

- Fahrzeugtechnologie
- Verkehrsnetzwerkinfrastruktur
- Ökonomie
- Betriebswirtschaft
- Informatik
- Mathematik

Welche Rolle die Mathematik dabei spielt, will ich in diesem Artikel kurz skizzieren. Mathematik ist hierbei eine häufig verborgene und leider noch nicht ausreichend genutzte Schlüsseltechnologie, die zu einer deutlichen Verbesserung des Verkehrswesens führen kann.

Hinderungsgründe für den Einsatz von Mathematik

Die Idee, zur Verbesserung des Verkehrs und zur Planung von Routen Mathematik zu benutzen, ist keineswegs neu. Man denke nur an Jules Vernes “In 80 Tagen um die Welt”:

“But, in order not to exceed it [the deadline] you must jump mathematically from the trains upon the steamers and from the streamers to the trains again.”
“I will jump – mathematically.”
“You are joking.”
“A true Englishman doesn’t joke when he is talking about so serious a thing.”

Auch wenn es Jules Vernes Helden Phileas Fogg gelungen ist, die Welt in den geforderten 80 Tagen zu umrunden, so hat dies den Einsatz von Mathematik nicht sonderlich befördert. Dieser ist häufig in den Kinderschuhen steckengeblieben oder völlig gescheitert. Ein wichtiger Grund hierfür waren und sind FEHLENDE DATEN. Mathematik kann ohne Daten keine Ergebnisse liefern. Eine für uns überraschende Erkenntnis war, daß Verkehrsträger häufig nicht ausreichend über ihre eigenen Systeme informiert sind. Sie führen keine systematischen Statistiken, speichern Daten nicht strukturiert oder haben keinen einfachen Zugriff auf vorhandene Daten, so daß Mathematik kaum eingesetzt werden kann.

Ein weiterer Grund war, daß die Mathematik in einigen ihrer Teile nicht weit genug entwickelt war. Die mathematische Methodologie reichte einfach nicht aus, um wirklich große Planungsprobleme behandeln zu können. Dazu trug natürlich auch bei, daß früher Computer nicht groß und schnell genug waren. Hier sind in letzter Zeit erhebliche Fortschritte gemacht worden. Über die Verbesserung der Computertechnologie, die größere Leistungsfähigkeit und Schnelligkeit der Prozessoren und Kommunikationsnetze lesen wir hinreichend viel in den Zeitungen. Aber auch die Mathematik hat bei der Algorithmenentwicklung in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht, wovon der Nichtmathematiker in der Regel sehr wenig erfährt.

Weitere Gründe für den Nichteinsatz von Mathematik waren eher psychologischer Art. In manchen Institutionen herrschte einfach ein mangelnder Wille zum Einsatz dieser Methoden. Die agierenden Personen kannten und kennen sich mit der Mathematik, die zur Bewältigung von Planungsaufgaben benötigt wird, nicht aus und fürchten, daß sie die Kontrolle über die Systeme verlieren und ihr Einfluß eingeschränkt wird. Dies sind verständliche Verhaltensweisen. Sie sind überall dort anzutreffen, wo Veränderungen durch die Einführung neuer Technologien und Verfahrensweisen stattfinden. Computertechnologie im Verbund mit Mathematik kann man dann natürlich als eine “drohende Gefahr” ansehen.

Ich denke jedoch, daß sich gerade in diesem psychologischen Bereich die Situation grundsätzlich geändert hat. Konkurrenz- und Kostendruck haben den Willen aller Beteiligten zur Effizienzsteigerung nachhaltig gefördert. Es gibt heute gute Chancen, viele der wichtigen Optimierungsprobleme in Transport und Verkehr angemessen zu lösen.

Regel- und zielorientiertes Handeln

Dennoch möchte ich hier einige der noch bestehenden Haupthindernisse bei der Einführung mathematischer Methoden in den traditionellen Planungsprozeß darstellen.

Traditionelle Planer wissen oft nicht, was Optimierung ist. Der Grund hierfür ist einfach. Die Planer in Verkehrsbetrieben sind in Mathematik und speziell in Optimierungstheorie selten gut ausgebildet. Sie sind häufig Betriebswirte oder Kaufleute, Verkehrstechniker oder Ingenieure verschiedener Fachrichtungen, manchmal auch kaufmännische Angestellte oder weiterqualifiziertes Fahrpersonal. Selbst wenn sie eine mathematische Vorbildung haben, dann haben sie in der Regel eine Mathematik gelernt, die für diesen Themenbereich nicht relevant ist. Daraus folgt auch, daß sie keine mathematischen Modelle bilden können, die die gegebene Situation angemessen abbilden.

Ein wichtiger Aspekt ist, daß traditionelle Planer überwiegend prozeßorientiert und nicht zielorientiert handeln. Sie halten sich an ein bürokratisches Regelwerk, welches festlegt, was ein zulässiger Plan ist und was nicht. Hinter solchen Regelwerken stehen normalerweise Sicherheitsüberlegungen und Grundsatzvereinbarungen, die durchaus vernünftig sind, bei starrer Anwendung jedoch Optmierungspotential verschenken. Regelwerke schränken Planungsfreiheit ein. Es ist deutlich besser, zielorientiert vorzugehen und dabei zum Beispiel die Kostenreduktion oder Effizienzsteigerung in den Vordergrund zu stellen. Traditionelle Planung resultiert in, so wie Mathematiker es bezeichnen, einfachen Lösungsheuristiken, deren Resultate lokal gerechtfertigt werden können, die jedoch global nicht überzeugen

Es ist angebracht, an dieser Stelle auf die Erfahrungen von George Dantzig, den Begründer der Linearen Programmierung, hinzuweisen. Neben der Erfindung des Simplexalgorithmus rechnet er die Einführung zielorientierten Denkens in die Planungswissenschaften zu einer seiner größten Leistungen. Er schreibt in [5]:

If I were asked to summarize my early and perhaps my most important contributions to linear programming, I would say there are three: ...

(2) Replacing ground rules for selecting good plans by general objective functions. (Ground rules at best are only a means for carrying out the objective, not the objective itself.)

Ein Vorteil des mathematischen Ansatzes

Der Vorteil mathematischer Planung besteht darin, alle beteiligten Quantitäten und deren Beziehungen untereinander auf logisch klare Weise deutlich zu machen. Alle Einflüsse werden unzweifelhaft dargestellt, können klar kommuniziert werden und sind quantifizierbar. Dadurch allein ergeben sich wichtige Einsichten. Die Mathematik hilft dabei, das konkrete Planungsproblem auf ein abstraktes Niveau zu heben und ermöglicht dabei auch den Einsatz von mathematischen Methoden, die in ganz anderem Zusammenhang entwickelt worden sind. Auf diese Weise können Rechner die weit entwickelte Informationstechnik und mathematische Methodologie (in Computerprogramme verpackt) für die Verkehrsplanung zum Einsatz bringen.

Zusammenarbeit tut not

Es steht jedoch völlig außer Frage, daß Mathematik allein keinen Fortschritt bringt. Von großer Bedeutung ist die enge Zusammenarbeit zwischen Praktikern und Theoretikern. Der Theoretiker kann ohne die Hilfe des Praktikers nicht modellieren. Der Praktiker weiß in der Regel nicht, welche mathematischen Werkzeuge bereitstehen, die in der Praxis gewinnbringend eingesetzt werden können.

Öffentlicher Nahverkehr: Gigantisches Optimierungsproblem mit komplizierten Nebenbedingungen

Nach dieser langen Vorrede mit eher “philosophisch-psychologischen” Betrachtungen möchte ich nun einen Überblick geben über die verschiedenen Phasen der Planung im öffentlichen Nahverkehr, einem wirklich wichtigen Bereich der Verkehrsplanung. Das im nachfolgenden skizzierte Szenarium stellt sich in analoger und nicht deutlich anderer Weise auch bei der Planung von Flugverkehrssystemen, der Planung des Schiffverkehrs oder bei der Planung eines nationalen oder überregionalen Eisenbahnsystems.

Ich sehe die Planung eines öffentlichen Nahverkehrssystems als **Standardbeispiel** für die mathematische Modellierung wichtiger Verkehrssysteme an und werde die Fragen, die dabei auftreten, im einzelnen analysieren und darstellen.

In der Regel unterteilt man die Planung in drei Phasen:

- strategische Planung
- taktische Planung
- operative Planung

Ich möchte auf die drei Phasen skizzenhaft eingehen und dabei auftretende Fragestellungen kurz beschreiben.

Strategische Planung

Die strategische Planung legt die Grundzüge des Vorgehens fest und trifft wesentliche "Systementscheidungen". Es ist üblich, zwei aufeinanderfolgende Schritte zu unterscheiden. In einem ersten Schritt geht es um die

Ermittlung des Verkehrsbedarfs.

Dies ist eine statistische Aufgabe, bei der man zunächst den Planungsraum (zum Beispiel eine Stadt wie Berlin oder den Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg) in Untergebiete aufteilt, zwischen denen man Verkehrsbeziehungen feststellen will. Das genaue Vorgehen hängt ab von der Siedlungsstruktur, von Bevölkerungszahlen, bestehenden Verkehrsverbindungen etc.

Hat man sich auf eine regionale Aufteilung geeinigt, wird der Verkehrsbedarf geschätzt: eine statistisch schwierige Arbeit, die regelmäßig von lokalen Verkehrsträgern (bzw. von diesen beauftragten statistischen Institutionen) vorgenommen wird. Typischerweise werden sogenannte Start-Ziel-Matrizen ermittelt, die zeitlich gestaffelt sind und folgende Informationen enthalten. Die Matrix hat so viele Zeilen und Spalten, wie die betrachtete Region Gebiete hat. Ein Element a_{ij} der Matrix gibt dann an, wie viele Personen von Gebiet i in Gebiet j in einem bestimmten Zeitraum (typischerweise in einem Intervall von einer halben oder einer Stunde) fahren. Solche Werte müssen für alle Gebiete und die jeweils vorgesehene zeitliche Staffelung erhoben und fortgeschrieben werden.

Natürlich geht es hier nicht allein um den Bedarf für Personentransport, andere Verkehrsträger benötigen die Ermittlung des Transportbedarfs an Gütern aufgeschlüsselt nach Güterarten, Gefahrenklassen, etc.

Bei der Datenerhebung wird mit mathematisch-statistischen Methoden gearbeitet. Jeder, der solche Matrizen erstellt, weiß, wie fehlerbehaftet Schätzungen dieser Art sind. Dennoch ist eine Planung ohne die (ungefähre) Kenntnis derartiger Matrizen kaum möglich.

Ist der Verkehrsbedarf ermittelt, ist eine

Entscheidung über das Systemangebot

erforderlich. Es muß also entschieden werden, ob man den Bedarf mit S-Bahnen, U-Bahnen, Straßenbahnen, Bussen, O-Bussen, Rufbussen oder Anrufsammeltaxis decken will und wie man das Eisenbahn- und Flugverkehrssystem einbezieht. In der Regel stehen natürlich nicht alle Verkehrsträger zur Auswahl. Die jeweilige lokale Situation schränkt die Möglichkeiten erheblich ein.

Aus historischen Gründen gibt es bereits Verkehrssysteme, jede Einführung eines neuen Verkehrssystems führt zu erheblichem Widerstand und damit verbundenen politisch schwierigen Problemen. Man denke nur an die Diskussion um die Magnetschwebebahn Transrapid.

Es muß festgehalten werden, daß ernsthafte mathematische Methoden bei Entscheidungsfindungen dieser Art derzeit nur ganz selten eingesetzt werden. (Manchmal wird vielleicht Zins- und Zinseszinsrechnung benutzt.) Die Überlegungen werden häufig von wirtschaftlichen Interessen und politischen Zielsetzungen einzelner Gruppen dominiert. Wirklich rationale Entscheidungen sind schwierig. Mangelhafte Daten und interessengeleitete Schätzungen bieten kein solides Diskussionsfundament. Auch in naher Zukunft wird Mathematik hier keine entscheidende Rolle spielen können, da eine Basis für den Einsatz mathematischer Werkzeuge fehlt.

Taktische Planung

Sind Entscheidungen über das Systemangebot gefallen und wurde festgelegt, wo Schiffe eingesetzt werden sollen, wo Busse fahren, ob eine U-Bahn gebaut werden soll oder nicht oder ob Straßenbahnen stillgelegt werden sollen oder nicht, dann geht es um die Vorbereitung der operativen Planung durch Entscheidungen, die man häufig mit taktischen Maßnahmen bezeichnet.

Die Auswahl eines Systems hat wirklich langfristige Auswirkungen und wird deswegen dem strategischen Bereich zugeordnet, mittelfristige Auswirkungen hat etwa die Festlegung, wo welche Betriebshöfe eingerichtet werden, mit welchen Kapazitäten diese ausgestattet werden, wo welche Serviceeinrichtungen für die Verkehrsträger installiert werden sollen.

Etwas weniger mittelfristig ist die Festlegung der Linien für die jeweils in Betracht gezogenen Systeme, die Berücksichtigung von Umsteigemöglichkeiten durch die Festlegung von Haltestellen etc. In der Regel sind aus historischen Gründen schon Vorentscheidungen gefallen, jedoch werden durch die Entwicklung der Straßensysteme, die veränderten Gewohnheiten der Bevölkerung und durch Wachstum oder Schwund von Bevölkerung permanent Änderungen erforderlich.

Analog ist die Festlegung eines Fahrplans eine wesentlich kurzfristigere Maßnahme. Verkehrsbetriebe etwa ändern Fahrpläne inzwischen mehrmals im Jahr. Man hat typischerweise einen Winter- und einen Sommerfahrplan, Spezialfahrpläne für Ferien oder für die Weihnachtszeit etc. Planungen in diesem Bereich haben in der Regel einen Vorlauf und einen Gültigkeitszeitraum von mehreren Monaten. Dies ist auch erforderlich, damit die beteiligten Individuen, Firmen etc. Planungsvorgaben für ihr eigenes Verhalten haben.

Bei der Linienbestimmung und Fahrplangestaltung werden inzwischen mathematische Methoden umfangreich eingesetzt. Mathematische Optimierung hilft z.B. dabei, Linien so auszulegen, daß möglichst viele Fahrgäste ohne Umsteigen befördert werden können. Fahrpläne können so gestaltet werden, daß die Wartezeiten an Umsteigepunkten minimiert werden. Insgesamt geht es um ein gutes Serviceangebot für den Kunden, wobei natürlich viele organisatorische und technische Nebenbedingungen beachtet werden müssen. Die Mathematik hierzu ist schwierig und die Planung erfolgt in der Regel heuristisch, zumal sich natürlich Zielkonflikte zwischen einzelnen Zielen der Planung ergeben.

Die derzeit größten Erfolge der Mathematik sind sicherlich in der

Operativen Planung

zu verzeichnen. Hier ist die Datenbasis erheblich besser. Die Vorgaben und Nebenbedingungen sind in der Regel präzise formuliert, so daß die Stärke der Mathematik, nämlich die quantitativ korrekte Einhaltung aller Regeln und die Ausnutzung aller Freiheitsgrade optimal umgesetzt werden können. Ich will daher an dieser Stelle einige Aspekte der operativen Planung erwähnen.

Fahrzeugumlaufplanung

Hier geht es um die Minimierung der Anzahl der benötigten Fahrzeuge und/oder und der Betriebskosten, je nachdem, ob man eine fest vorgegebene Fahrzeugzahl hat und seine Betriebskosten minimieren will oder ob man eine Fahrzeugflotte modernisieren und dabei mit möglichst wenig Fahrzeugen auskommen will. Fahrzeuge (wie zum Beispiel die Busse der BVG) sind nicht nur in der Anschaffung teuer, auch die Einsatzkosten sind erheblich. Man rechnet z.B. mit mehreren Hunderttausend DM an Kosten, die der Einsatz eines Busses pro Jahr (incl. Reparatur, Wartung, Energiekosten, Kosten von Fahrern auf den Fahrzeugen) erfordert.

Die Fahrzeugumlaufplanung – am Konrad-Zuse-Zentrum intensiv untersucht – ist eine außerordentlich komplexe Aufgabe, siehe [7]. Sie führt auf ganzzahlige Optimierungsprobleme mit zig Millionen ganzzahligen Variablen. Hier stößt man in Bereiche vor, die am Rande des derzeit Berechenbaren sind. Jedoch ist es mit modernen mathematischen Methoden gelungen, auch Bussysteme großer Verkehrsbetriebe (wie das der BVG) heutzutage optimal oder nahezu optimal zu planen in bezug auf die benötigte Fahrzeugzahl oder die Einsatzkosten. Dabei soll nicht verschwiegen werden, daß der Planungserfolg stark abhängt vom lokalen Regelwerk der einzelnen Verkehrsbetriebe und der Bereitschaft, durch kleine Modifikationen der Regeln und Nebenbedingungen in Verkehrsspitzenzeiten Freiheitsgrade für die Optimierung zu eröffnen. Es ist notwendig, Praxis und Theorie effizient zu kombinieren, um so einen Kompromiß zwischen der strikten Einhaltung von Regeln und dem Ziel der deutlichen Verringerung der Kosten zu erzielen.

Ist eine Fahrzeugumlaufplanung erfolgt, so ist der nächste Schritt die **Fahrzeugeinsatzplanung**, also die Lösung der Frage, welches konkrete Fahrzeug welchen Umlauf zu welcher Zeit fährt. Dazu gehört dann auch die **Betriebshofplanung** (Welches Fahrzeug wird auf welchem Betriebshof stationiert und gewartet). Die Lösung beider Fragestellungen kann mit mathematischen Methoden angemessen und zufriedenstellend unterstützt werden.

Ein schwieriges Problem stellt die

Dienstplanung

dar, bei der Teilstücke von Einzelfahrten zu sogenannten Diensten zusammengefaßt werden, die von einem einzelnen Fahrer unter der Berücksichtigung aller gesetzlichen Bestimmungen und Betriebsvereinbarungen gefahren werden können. Das Ziel ist ein möglichst kostengünstiger Einsatz von Fahrern bei Berücksichtigung aller Regeln und der Wünsche der Fahrer bezüglich angenehmer Dienstzeiten.

Nach erfolgter Dienstplanung ist eine **Dienstreihenfolgeplanung** erforderlich. Durch sie werden unterschiedliche Dienstarten (Früh- oder Spätdienst, geteilte Dienste, etc.) – Fahrerwünsche und Betriebsvereinbarungen berücksichtigend – über einen betrieblich festgelegten Zeithorizont (Wochen oder einige Monate) so verteilt, daß eine im Durchschnitt faire Zuweisung von Diensten an Fahrer möglich ist.

Hinter den hier angedeuteten Optimierungsproblemen wie Umlaufplanung, Dienstplanung, Dienstreihenfolgeplanung "verstecken" sich sich komplexe mathematische Aufgaben.

Umlaufplanungsprobleme z.B. werden in der Regel als "ganzzahlige Mehrgüter-Flußprobleme" modelliert. Bei den Daten der BVG mit rund 28.000 Busfahrten pro Tag und zig Millionen möglichen Übergängen zwischen solchen Fahrten sind mathematische Optimierungsprobleme mit (je nach Parametereinstellung und Detailtreue) über 100 Millionen Variablen zu lösen. Diese Größenordnungen können mit leistungsfähigen Computern und ausgefeilten Algorithmen inzwischen bewältigt werden, siehe [7]..

Die Dienstplanung wird üblicherweise mit sogenannten Set-Partitioning-Methoden der ganzzahligen Optimierung angegangen. Hier ergeben sich Modelle mit mehreren Millionen Variablen, siehe [2]. Diese Aufgaben sind strukturell komplexer als Umlaufplanungsprobleme, können zwar in dieser Größenordnung nicht optimal, doch mit Gütegarantien gelöst werden, die für die Praxis akzeptabel sind.

Sonderdienste

Neben diesen "großen Aufgaben" der operativen Planung gibt es Sonderdienste vielfältiger Art, etwa die Einsatzplanung für Schulbusse oder regelmäßige Sonderdienste. Städte betreiben Behindertentransportsysteme oder setzen Anrufsammeltaxis und Rufbusse ein. Straßenkehr- und Räumdienste sind von großer Bedeutung, speziell wenn zu Beginn der Winterzeit plötzlicher Schneefall ein Verkehrschaos verursacht. Gleichfalls kann man die Routen der Müllabfuhr so planen, daß die Einsatzzeiten günstig sind, zurückgelegte Wegstrecken klein und der Personalbedarf minimal ist. Liefer- und Ablesedienste sind ebenfalls von Bedeutung, auch wenn sie natürlich nicht ähnlich hohe Kosten wie ein gesamtes Verkehrssystem einer Stadt oder einer Region verursachen.

Wenn man die verschiedenen Verkehrssysteme genau analysiert und mathematisch exakt modelliert, so sieht man, daß die oben skizzierten Fragestellungen nicht nur im öffentlichen Nahverkehr auftreten, sondern analog auch beim Flugverkehr, beim Zugverkehr oder bei der Fahrzeugeinsatzplanung in Transportunternehmen.

Der Mathematik – und das ist einer ihrer besonderen Vorzüge – ist es gleichgültig, ob eine Variable einen Bus, ein Flugzeug oder einen Zug repräsentiert oder ob eine andere Variable die Einsatzzeit eine Busfahrers oder einer Flugzeug- oder Bahncrew bezeichnet.

Was ist wo im Einsatz?

Es steht außer Frage, daß der Einsatz mathematischer Methoden im **Flugverkehr** am weitesten fortgeschritten ist. Dieser Sektor wurde als erster dereguliert, so daß internationaler Wettbewerb frühzeitig eingesetzt hat. Die Gebiete Operations Research und Optimierung haben in diesem Bereich eine lange Tradition. Mathematische Entscheidungshilfen werden seit über 30 Jahren entwickelt und benutzt. Führende Flugverkehrsunternehmen benutzen Optimierungstechniken für die tägliche, wöchentliche oder monatliche Planung. Man behandelt u.a. die Flottenplanung, die Flugzeug-einsatzplanung, das Crew Scheduling, das Crew Rostering und ähnliche Fragestellungen, die dazu dienen, mit den vorhandenen Ressourcen möglichst optimal umzugehen, die Kosten zu senken und gleichzeitig die Qualitäts- und Sicherheitsstandards zu wahren. Die Erfolge in diesem Bereich sind vielfältig. Einige Fluglinien haben inzwischen ihre Optimierungsabteilungen ausgegründet und bieten durch neu entstehende Firmen diesen Service weltweit an, so daß auch kleinere Fluglinien in den Genuß der mathematischen Optimierungswerkzeuge kommen.

Die **Eisenbahnen** befinden sich derzeit noch in mäßigem Wettbewerb. Die beginnende Deregulierung hat noch nicht richtig gegriffen. Die meisten Eisenbahngesellschaften sind noch national organisiert und in der Regel Monopolisten. Sie haben den Nutzen des Einsatzes mathematischer Optimierungsmethoden noch nicht richtig erkannt oder sind noch nicht in der Lage gewesen, ihn umzusetzen. Dennoch gibt es einzelne Ansätze bei der Linienplanung, der Fahrplangestaltung, der Planung des Einsatzes von Personen- oder Güterwaggons und sogar bei der Personaleinsatzplanung, auch wenn hier noch sehr vorsichtig vorgegangen wird und die Potentiale keineswegs gut ausgenutzt werden. Ich denke, daß die anstehende Deregulierung und der Eintritt neuer Wettbewerber die Situation verändern wird. Jedoch werden die bisherigen Monopolisten sicherlich versuchen, große Hürden aufzubauen, um neuen Wettbewerbern den Marktzutritt zu erschweren. Die Prognose ist jedoch klar: Ohne Ausschöpfung des Einsparungspotentials durch mathematische Optimierung werden die Monopolisten kaum überleben, wenn die Gewinnmargen geringer werden und Wettbewerber mit geringeren Kosten arbeiten können.

Die verschiedenen Möglichkeiten, im öffentlichen Nahverkehr, im Flug- und Eisenbahnverkehr Optimierungsmethoden einzusetzen, habe ich im vorangegangenen Abschnitt eingehend dargestellt. Die Aufteilung der Gesamtplanung in Hierarchien (wie operative und taktische Planung) scheint weltweit ähnlich zu sein. Überall werden inzwischen Anstrengungen unternommen, mathematische Methoden der skizzierten Art einzusetzen, um mit knappen Ressourcen besser umzugehen und Kosten zu reduzieren, ohne den Service einzuschränken.

Behindertentransport

Ich möchte nun auf einen Sonderdienst eingehen, der am ZIB eingehend untersucht wurde und u.a. zu einer Firmengründung geführt hat.

Einige große Städte bieten ihren behinderten Bürgern kostenlose Transportmöglichkeiten an, um etwa zur Arbeit zu fahren, einen Arzt zu besuchen oder Freizeitaktivitäten zu erleben. In Berlin z.B. sind rund 25.000 Bürger berechtigt, diesen Dienst in Anspruch zu nehmen. Täglich werden fast 2.000 Fahrten mit über 100 behindertengerecht ausgestatteten Kleinbussen durchgeführt, siehe Abbildung 1.

Die bedarfsgerechte und kostengünstige Disposition dieser Fahrten ist eine komplizierte Aufgabe, die noch Anfang der 90er Jahre manuell erledigt wurde. Erhebliche Kostensteigerung führte diesen Dienst, das Telebus-System, in eine nachhaltige Krise. In einem rund 3 Jahre dauernden Projekt gefördert durch den Senator für Soziales wurde am Konrad-Zuse-Zentrum eine sorgfältige Analyse und mathematische Modellierung des gesamten Systems vorgenommen. Eine Kombination von mathematischer Optimierung, Operations Research und Werkzeugen der Informatik hat dazu geführt, daß ein 30%iger Zuwachs der Systemnutzung (insbesondere durch Einbeziehung der Behinderten aus Ost-Berlin) kostenneutral aufgefangen wurde, siehe [1].

Abbildung 1: Telebus

Die hierbei entwickelte Methode (auch basierend auf Set Partitioning und Set Covering) hat zu neuen Ansätzen bei der Disposition von Rufbussen geführt. Über diese "Dial-A-Ride-Systeme" hat Herr Ascheuer in seinem Vortrag berichtet. Die Arbeiten hierzu wurden bei der Firma Intranetz durchgeführt und in benutzerfreundliche Software umgesetzt. Intranetz ist eine Firma, die aus den Ideen entstanden ist, die bei der Optimierung des Telebus-Systems entwickelt wurden.

Leistungen kommerzieller Firmen

Bisher fast unberücksichtigt blieben (enorm arbeitsintensive) Leistungen, die erbracht werden müssen, um mathematische Optimierung überhaupt anwenden zu können und um die Ergebnisse dem Nutzer auf einfache Weise verständlich zu machen. Herr Strubbe hat in seinem Vortrag das Tätigkeitsspektrum kommerzieller Unternehmen beschrieben, die im Bereich verkehrliche Planungssysteme tätig sind. Er ist dabei natürlich insbesondere auf das Aufgabenfeld der IVU eingegangen, die z.B. verschiedene Softwaresysteme für Planungsprobleme des öffentlichen Nahverkehrs anbietet. Bei einer oberflächlichen Analyse werden vielfach der Arbeitsaufwand für gutes Software-Engineering und die geistigen Leistungen unterschätzt, die notwendig sind, um ein geeignetes Datenkonzept für derartige Aufgaben zu entwickeln, welches effiziente Pflege von und den schnellen Zugriff auf zigtausend Fahrgastfahrten und Millionen Übergangsfahrten erlaubt. Optimierungsrechnungen können ohne solche Daten nicht erfolgen. Genauso aufwendig ist die Entwicklung und Pflege nutzerfreundlicher Oberflächen und Schnittstellen.

Es bedarf langjähriger praktischer Erfahrung, exzellenten Systemdesigns und guter Programmierung, bis ein Planungswerkzeug entstanden ist, das den anspruchsvollen Nutzer zufriedenstellt. Auch in diesem Bereich sind in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht worden. Dies gilt weltweit und für alle Sparten des Verkehrsplanungswesens.

Fazit

Bei der strategischen Verkehrsplanung scheint aufgrund der Problem- und Datenlage der Einsatz von Mathematik nur in sehr begrenztem Rahmen möglich.

Auch wenn bei der taktischen und operativen Planung von Verkehrssystemen noch lange nicht zufriedenstellende Zustände herrschen, so sind doch in den letzten Jahren in allen beteiligten Bereichen erhebliche Fortschritte erzielt worden. Die mathematische Optimierung – selten nach außen sichtbar – hat zu der Entwicklung durch neue konzeptionelle Ansätze erheblich beigetragen. Kostenbewußtsein und Konkurrenzdruck werden den Einsatz von Mathematik weiter fördern und sogar beschleunigen. Schnellere Rechner, bessere Algorithmen und effizientere Programme werden die Grenzen der praktischen Berechenbarkeit weiter hinausschieben, dennoch wird es noch sehr lange dauern, bis auf eine Hierarchisierung des Planungsgeschehens verzichtet und gesamte Verkehrssysteme innerhalb eines integrierten mathematischen Modells in der Praxis behandelt werden können. Es gibt also noch viel zu tun, bis alle Ressourcen tatsächlich optimal ausgeschöpft werden können und jeder Bürger ein preisgünstiges und zufriedenstellendes Verkehrsangebot vorfindet.

Literatur

[1] Borndörfer, Ralf: *Aspects of Set Packing, Partitioning, and Covering,* Shaker-Verlag, 1998.

[2] Borndörfer, Ralf; Löbel, Andreas; Strubbe, Uwe; Völker, Manfred: *Zielorientierte Dienstplanoptimierung,* Heureka ’99: Optimierung in Verkehr und Transport, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1999, 171–194 (elektronisch verfügbar als ZIB-Preprint SC98-41 unter `www.zib.de/bib/pub/pw/index.de.html`).

[3] Chvátal, Vasek: *Linear programming.* Freeman, New York, 1983.

[4] Cook, William J.; Cunningham, William H.; Pulleyblank, William R.; Schrijver, Alexander: *Combinatorial optimization.* Wiley, New York, 1998.

[5] Dantzig, George B.: *Linear Programming,* in: Lenstra, Jan Karel; Rinnooy Kan, Alexander H.G.; Schrijver, Alexander (eds.): History of mathematical programming. A collection of personal reminiscences. North-Holland, Amsterdam, 1991.

[6] Grötschel, Martin; Lovász, Laszlo; Schrijver, Alexander: *Geometric algorithms and combinatorial optimization.* 2. corr. ed. Springer-Verlag, Berlin, 1993.

[7] Löbel, Andreas: *Optimal Vehicle Scheduling in Public Transit,* Shaker-Verlag, 1998.

[8] Padberg, Manfred *Linear optimization and extensions.* Springer-Verlag, Berlin, 1995.

[9] Schrijver, Alexander: *Theory of linear and integer programming.* Wiley, Chichester, 1998.

[10] Wolsey, Laurence A.: *Integer programming*, Wiley, New York, 1998.