

# Optimierung im Nahverkehr

**Ralf Borndörfer, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin**

Dieser Beitrag behandelt mathematische Optimierungsprobleme, die bei der Planung von Systemen des öffentlichen Verkehrs auftreten. Der Schwerpunkt liegt auf dem *öffentlichen Nahverkehr* (ÖPNV), die Probleme treten jedoch in nicht wesentlich verschiedener Weise auch im Schiffsverkehr, im Schienenverkehr und im Luftverkehr auf.

Das wichtigste Einsatzgebiet der Mathematik im ÖPNV ist heute die *operative Planung*, in der die Betriebsmittel für eine Fahrplanperiode disponiert werden. Die operative Planung ist ein umfangreicher Prozess, der gewöhnlich in einer Reihe von aufeinanderfolgenden Schritten durchgeführt wird: Auf die Fahrplanung (Fahrplanerstellung) folgen nacheinander die Umlaufplanung (Fahrzeugeinsatzplanung), die Dienstplanung („anonyme“ Personalplanung), die Dienstreihenfolgeplanung (Turnusplanung) und die Personaleinsatzplanung (konkrete Personen). Nach außen wird natürlich der Fahrplan am meisten wahrgenommen. Aus betrieblicher Sicht sind aber Umlaufplanung und Dienstplanung die schwierigsten Aufgaben, und auch die wirtschaftlich bedeutendsten: Etwa 50% der Gesamtkosten eines Standardbusses im Stadtverkehr entfallen auf das Fahrpersonal (also auf die Gehälter der Busfahrer), und weitere 15% auf die Fahrzeuge (Abschreibung, Wartung, Kraftstoff). Ich werde im Folgenden einige Aspekte der mathematischen Optimierung von Umlauf- und Dienstplanung diskutieren.

## ***Beispiel 1: Umlaufplanung***

Bei der Umlaufplanung geht es darum, einen vorgegebenen Fahrplan mit der minimalen Anzahl an Fahrzeugen durchzuführen und unproduktive Leerfahrten (sog. Betriebsfahrten) zu vermeiden, die sonst später mit teurem Personal bemannt werden müssten. Jede Fahrt muss mit einem Fahrzeug eines geeigneten Typs (bei Bussen sind das Niederflerbus, Gelenkbus, Doppeldecker, etc.) durchgeführt werden. Je nach Fahrt sind dazu alle, manche oder nur ein einziger Typ geeignet.

Mathematisch lässt sich die Umlaufplanung als ein sog. *Mehrgüterflussproblem* auffassen, eines der klassischen Modelle der kombinatorischen Optimierung. Dazu wird aus Betriebshöfen, Fahrten und allen theoretisch möglichen Betriebsfahrten ein Netzwerk gebildet. Die Umläufe der Fahrzeuge der einzelnen Typen („Güter“ genannt) entsprechen in diesem Modell Mengen von Wegen („Fluss“ genannt). Mehrgüterflüsse spielen außer im Verkehr auch bedeutende Rollen in Logistik und Telekommunikation. Sie sind theoretisch gut untersucht und es gibt leistungsfähige Algorithmen zu ihrer Berechnung.

Die Busumlaufplanung großer Verkehrsbetriebe führt auf riesige Mehrgüterflussprobleme. Eine Gesamtplanung für die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), dem viertgrößten Verkehrsbetrieb der Welt, umfasst 10 Betriebshöfe, 14 Fahrzeugtypen, 28.000 Fahrten und über 100 Millionen möglichen Betriebsfahrten. Das sind große Dimensionen, die aber seit einigen Jahren mit leistungsfähigen PCs und ausgeklügelten Algorithmen routinemäßig bewältigt werden können. Es ist innerhalb von Stunden möglich, garantiert flottenminimale Lösungen (mit der minimalen Fahrzeuganzahl) und die richtige Aufteilung der Fahrzeuge auf die Betriebshöfe zu bestimmen.

Damit erschließen sich beachtliche Einsparpotentiale. Wir haben am Konrad-Zuse-Zentrum Rechnungen für die BVG, die Hamburger Hochbahn (HHA) und die Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein (VHH) durchgeführt. Allein im Betriebshof Spandau in Berlin konnten dabei 38 Fahrzeuge eingespart werden, bei der HHA 26 Fahrzeuge und etwa 10% der Betriebskosten. Bei der VHH konnte die Güte der derzeitigen Planung nachgewiesen werden. Hier wurde bereits die minimale Anzahl an Fahrzeugen verwendet, aber die Betriebskosten lassen sich noch um 5.7% senken.

## **Beispiel 2: Dienstplanung**

In der Dienstplanung werden die in der Umlaufplanung gebildeten Fahrzeugumläufe mit Fahrpersonal unterlegt. Dazu werden (anonyme) Dienste für einzelne Fahrer gebildet, die später in der Personaleinsatzplanung konkreten Personen zugeordnet werden. Im Gegensatz zu Fahrzeugen, die praktisch ununterbrochen eingesetzt werden können, sind bei der Bildung von Diensten vielfältige gesetzliche, tarifliche und betriebliche Bestimmungen zu beachten. Diese Regeln definieren Typen möglicher Dienste, die „Dienstarten“, wie Frühdienst, Mitteldienst, Spätdienst, Nachtdienst, geteilter Dienst usw. Als Planungsziel wird zumeist ein Kompromiss zwischen Kosteneffizienz und Arbeitskonvenienz angestrebt.

Die vielen Regeln machen die Dienstplanung zu einem schwierigeren Problem als die Umlaufplanung. Mathematisch behandelt man die Aufgabe als ein sog. *Mengenpartitionierungsproblem*, ein weiteres Standardmodell der kombinatorischen Optimierung. Wie bei der Umlaufplanung bildet man zunächst ein Netzwerk aus Dienstelementen (Einzelteilen von Umläufen) und den möglichen Übergängen zwischen diesen, so dass den Diensten, wie vorher den Umläufen, Wege im Netzwerk entsprechen. Der Unterschied zur Umlaufplanung besteht darin, dass es diesmal wesentlich schwieriger ist dafür zu sorgen, dass die berechneten Wege auch *umgekehrt* zulässigen Diensten entsprechen. Kurz gesagt: Jeder Dienst entspricht einem Weg, aber lange nicht jeder Weg einem Dienst. Fragen der Mengenpartitionierung treten so häufig auf, dass dieses Problem neben dem berühmten „Problem des Handlungsreisenden“ das wohl am besten untersuchte Problem der Kombinatorischen Optimierung ist. Es gibt auch leistungsstarke Rechenmethoden, doch kann man sehr große Instanzen, wie sie in der Dienstplanung auftreten, im allgemeinen nur näherungsweise und nicht optimal lösen.

Der Stand der Technik erlaubt heute eine Gesamtplanung für mittlere Verkehrsbetriebe und für ganze Betriebshöfe von Großbetrieben wie der BVG. Wir haben Konrad-Zuse-Zentrum Dienstpläne für Instanzen mit bis zu 9 Dienstarten, 6.000 Dienstelementen und 2 Millionen expliziten Übergängen berechnet. Optimale Lösungen kann man für solche Szenarien nicht erwarten. Man kann jedoch innerhalb einiger Stunden mit modernen Rechnern und Verfahren brauchbare heuristische Lösungen bestimmen (das sind Lösungen, von denen man nicht genau sagen kann, wie weit sie vom unbekanntem Optimum entfernt sind).

In der Praxis kann man damit erhebliche Einsparungen erzielen. In Testrechnungen für eine Reihe von verschiedenen europäischen Verkehrsbetrieben aus den Bereichen Bus, Tram und U-Bahn konnten wir Einsparpotentiale von 3.5% bis über 10% der Personalkosten aufzeigen.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Im Nahverkehr gibt es erhebliche nicht ausgeschöpfte Optimierungspotentiale, die sich mit mathematischen Planungsmethoden erschließen lassen. Analog zur CAD-Technologie im Konstruktionsbereich wird der Verkehrsplaner der Zukunft *Computer-Aided-Scheduling* (CAS) Systeme zur Kostensenkung und Qualitätsverbesserung im ÖPNV einsetzen.

## **Weiterführende Literatur**

- R. Borndörfer, M. Grötschel, A. Löbel (1998) *Optimization of Transportation Systems*, Report SC 98-09, Konrad-Zuse-Zentrum Berlin. Erhältlich von URL <http://www.zib.de>.
- M. Grötschel (1999) *Verkehrsplanung – Bessere Lösungen mit Mathematik*, Report SC 99-54, Konrad-Zuse-Zentrum Berlin. Erschienen in *Forschungspolitische Dialoge in Berlin: Mathematik – Die verborgene Schlüsseltechnologie*, 1999, 11-22. Erhältlich von URL <http://www.zib.de>.