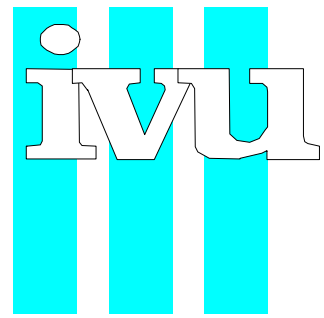


Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
Heilbronner Str. 10, 10711 Berlin



Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH
Bundesallee 88, 12161 Berlin

Andreas Löbel

Uwe Strubbe

Wagenumlaufoptimierung - Methodischer Ansatz und praktische Anwendung

Wagenumlaufoptimierung - Methodischer Ansatz und praktische Anwendung

Dipl.-Math. oec. Andreas Löbel
Konrad-Zuse-Zentrum für
Informationstechnik Berlin (ZIB)
Heilbronner Str. 10
10711 Berlin
Email loebel@zib-berlin.de

Dipl.-Math. Uwe Strubbe
Gesellschaft für Informatik,
Verkehrs und Umweltplanung mbH
Bundesallee 88
12161 Berlin
Email us@ivu-berlin.de

1. Einleitung

Im Rahmen des EDV-Systems BERTA (EDV-gestütztes System zur **Betriebseinsatzplanung** und -**auswertung** - bei den Berliner Verkehrsbetrieben BVG) wird ein Optimierungsmodul zur Wagenumlaufoptimierung realisiert.

Ziel der Wagenumlaufoptimierung ist es, die vorgegebenen Fahrgastfahrten und definierten Sonderfahrten zu Wagenumläufen miteinander zu verknüpfen und Betriebshöfen zuzuordnen, so daß die Anzahl der Fahrzeuge zur Bedienung dieser Fahrten (für die Tagesspitzenzeitintervalle) minimiert wird. Das Ergebnis ist die Aneinanderreihung einzelner Wagenumläufe zu Kursen. Ein Wagenumlauf beginnt in einem Betriebshof, von dem aus eine Einsetzfahrt zu der ersten Fahrgastfahrt führt, sich mehrere Fahrgastfahrten anschließen, die u. U. durch Leerfahrten verbunden sind, ein Umlauf endet durch eine Aussetzfahrt zum Ausgangsbetriebshof.

Es werden Strategien zur Verwaltung und Modifizierung der großen Datenmenge (alleine ca. 30.000 Fahrten pro Tag beim Betriebszweig Omnibus) und zur Gewährleistung der betrieblichen Stabilität in den Abschnitten 1-6 vorgestellt.

Die algorithmische Lösung der Wagenumlaufoptimierung wird in den Abschnitten 7-11 beschrieben. Das in dieser Arbeit zugrundeliegende mathematische Modell wurde in Kooperation zwischen der HanseCom GmbH, Hamburg, und dem ZIB aufgestellt. Die auf diesem Modell beruhenden mathematischen Methoden wurden anhand realer Datensätze der Hamburger Hochbahn AG entwickelt und getestet. Auf dieser Grundlage wird das Verfahren zur Zeit auf weitere relevante Bedingungen der BVG angepaßt.

Die Neuerungen gegenüber den klassischen Verfahren sind im wesentlichen:

- Kein zweistufiges Vorgehen, indem zunächst Umlaufpläne und anschließend Kurse gebildet werden, sondern direkte Festlegung der fahrzeugbezogenen Kurse.
- Das Verfahren beinhaltet eine automatische Betriebshofzuordnung, unter Berücksichtigung der Kapazitäten.

2. Nebenbedingungen

Um neben dem Ziel der Minimierung der Fahrzeuge auch eine praxisgerechte Lösung liefern zu können, gilt es Nebenbedingungen zu definieren, die zwar das Einsparungspotential einschränken, aber dafür eine Lösung garantieren, die im alltäglichen Betrieb umgesetzt werden kann. Im folgenden sind die Nebenbedingungen, die bei der Wagenumlaufoptimierung Berücksichtigung finden müssen, aufgeführt. Diese Nebenbedingungen werden als *Umlaufvorgaben* abgelegt.

Allgemeine Nebenbedingungen:

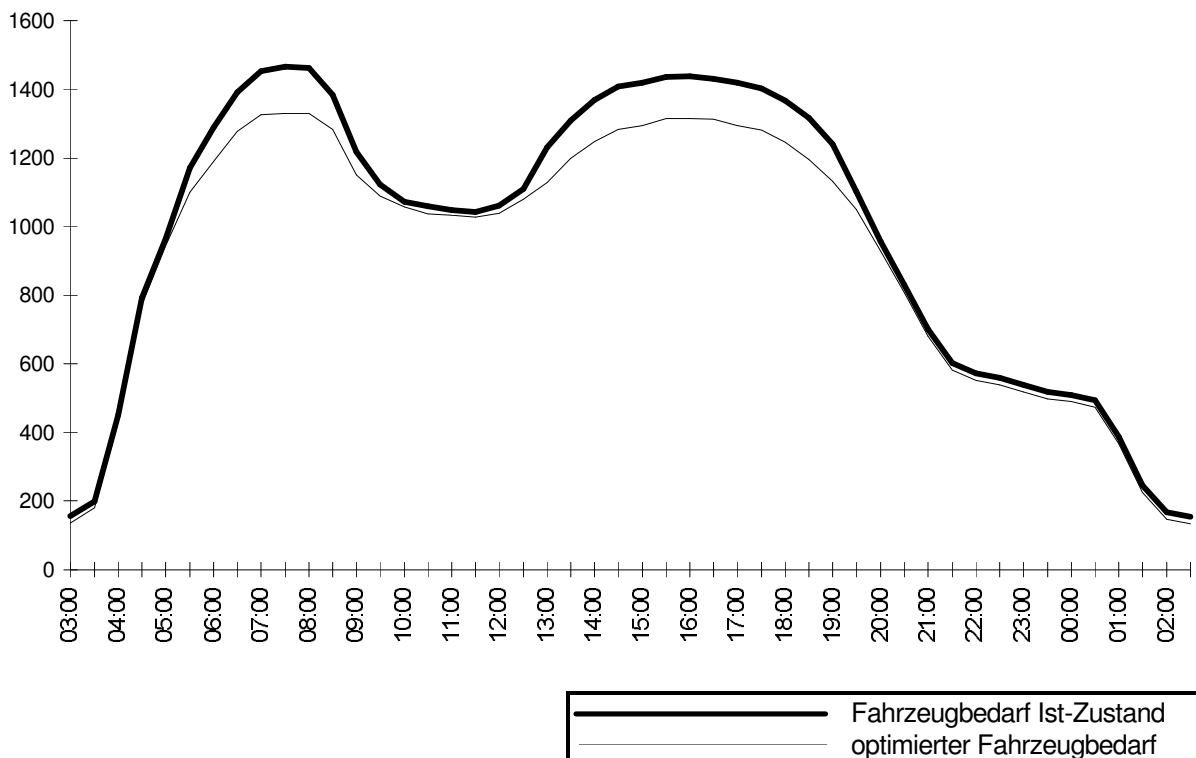
- Gesamtstellplätze der einzelnen Betriebshöfe;
- fahrzeugtypbezogene Fahrzeugkapazitäten pro Betriebshof;
- Zuordnungsverbot bestimmter Fahrzeugtypen zu Linien (Doppeldeckerbus kann nicht jede Brücke durchfahren, Gelenkbus zu lang für manchen Straßenverlauf).

Betriebliche Nebenbedingungen (BVG):

- Maximale Länge eines Umlaufes in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps (unterschiedliche Tankgröße und Kraftstoffverbrauch);
- Maximale Anzahl der Linienwechsel pro Fahrzeug;
- Berücksichtigung der Mindest- und Höchstwendezeit (Pausenregelung, technische sowie verkehrstechnische Nebenbedingungen);
- Netzsegmente (das Gesamtnetz wird in Netzsegmente eingeteilt, dadurch sollen Dominoeffekte bezüglich Verspätungen vermieden werden);
- Betriebshofzuordnung (Jeder Linie können vorab aus betrieblichen und organisatorischen Gründen Betriebshöfe zugewiesen werden).

3. Ziel

Um eine Minimierung der Fahrzeugflotte zu erreichen, muß vornehmlich in der Fahrzeugbedarfsspitze die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge reduziert werden. Eine Einsparung von Fahrzeugen zu anderen Tageszeiten reduziert die Betriebskosten des Verkehrsbetriebes, jedoch bleibt die Größe der Fahrzeugflotte dadurch unberührt. Bei der BVG existiert eine Morgenspitze, die im Intervall zwischen 6:30 Uhr und 8:30 Uhr liegt und eine etwas schwächere Nachmittagsspitze von 14:00 Uhr bis 17:00 Uhr. Ziel ist es nun, durch geschickte Verknüpfung der einzelnen Fahrten, den Spitzenbedarf zu reduzieren. Aufgrund von durchgeführten Testläufen ergibt sich eine neue Verteilung der Fahrzeuge über den Tageszeitraum, in der die beiden Spitzen reduziert werden (siehe Grafik 3.1).



Grafik 3.1: Tagesgang Fahrzeugbedarf

4. Integration der Wagenlaufoptimierung in BERTA

Die *Wagenlaufoptimierung* wird als eigenes Produkt in der BERTA Komponente Fahrplanoptimierung realisiert. (Weitere Komponenten: Fahrplanung, Dienstplanung, Personal- und Fahrzeugdisposition) Neben der Wagenlaufoptimierung werden die Produkte Anschlußoptimierung, Netzsegmente, Betriebshofzuordnung und mehrere Analysetools eingeführt.

Der Benutzer legt in der Komponente Fahrplanung zuerst Haltepunkte, Strecken, Linien und Fahrten an. Vorweg können bereits Fahrten in der Umlaufplanung zu Umläufen fest verknüpft werden, die in der anschließenden Optimierung nicht mehr aufgehoben werden. Des weiteren werden Netzbereiche in der Komponente Fahrplanoptimierung festgelegt. Ein automatisches Verfahren faßt Linien zu *Netzsegmenten* zusammen. Die Anzahl der Netzsegmente bestimmt der Benutzer, dieser hat selbstverständlich auch die Möglichkeit, alle Linien in ein Netzsegment zusammenzufassen, um somit den höchsten Freiheitsgrad nutzen zu können. Eine manuelle Nachbearbeitung der Netzsegmente ist möglich.

Ein weiterer vorbereitender Schritt für die Wagenlaufoptimierung ist im Produkt *Betriebshofzuordnung* die grobe Zuordnung der Linien zu Betriebshöfen unter Berücksichtigung der Leerfahrkilometer. Zum einen soll die Kombinatorik in der Wagenlaufoptimierung reduziert und zum anderen gewisse betriebliche Einschränkungen berücksichtigt werden. Es können somit Linien-Betriebshofzuordnungen ausgeschlossen werden, die zwar aus Optimierungssicht günstig sind, doch aus betrieblicher Sicht nicht geeignet

erscheinen.

Nach Festlegung der Grunddaten, der Netzsegmente und der Betriebshöfe und unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen kann die Wagensumlaufoptimierung durchgeführt werden (siehe Abbildung 4.1).

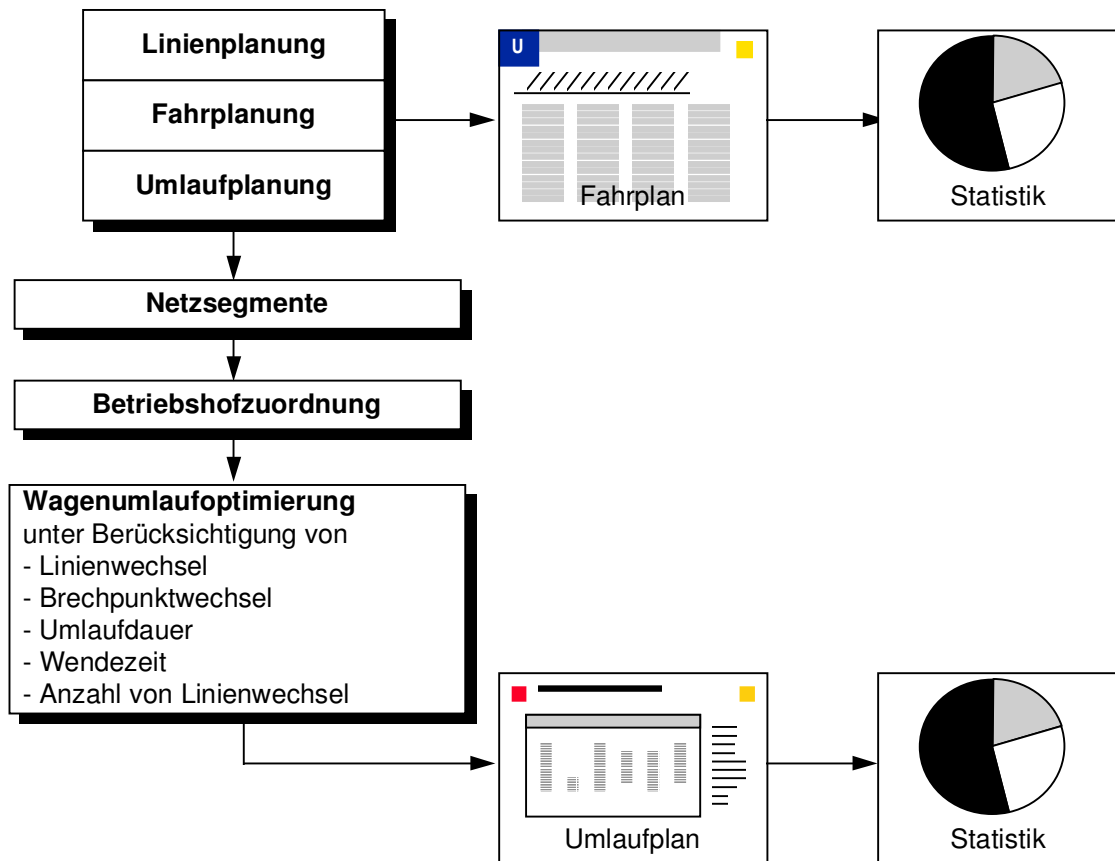


Abbildung 4.1: Integration der Wagensumlaufoptimierung in die BERTA-Fahrplanung

5. Ablauf der Wagensumlaufoptimierung

Aufgrund der großen Anzahl von ständigen Fahrplanänderungen, die vorrangig aus den Aktivitäten im Straßenbau, aber auch durch Ferien- und Sonderfahrpläne (wie z.B. Weihnachten und Sylvester) resultieren, können verschiedene Optimierungsszenarien betrachtet werden. Ein Szenario wird wie folgt festgelegt:

- Ein Netzbereich wird durch die Auswahl der Netzsegmente definiert.
- Ein Gültigkeitszeitraum wird durch ein Zeitintervall innerhalb der Fahrplanperiode vorgegeben. In diesem Zeitintervall bleibt der Fahrplan für alle Linien des Netzbereiches unverändert.
- Für jede Linie können unterschiedliche Umlaufvorgaben festgelegt werden.

Nach der Optimierung dieses Szenarios erfolgt die grafische Aufbereitung und Ausgabe der Ergebnisse. Der Benutzer hat die Möglichkeit einer manuellen Nachbearbeitung.

Durch Modifizierungen der Einstellungen innerhalb der Szenarios können mehrere Optimierungsvarianten durchgespielt werden (siehe Abbildung 5.1).

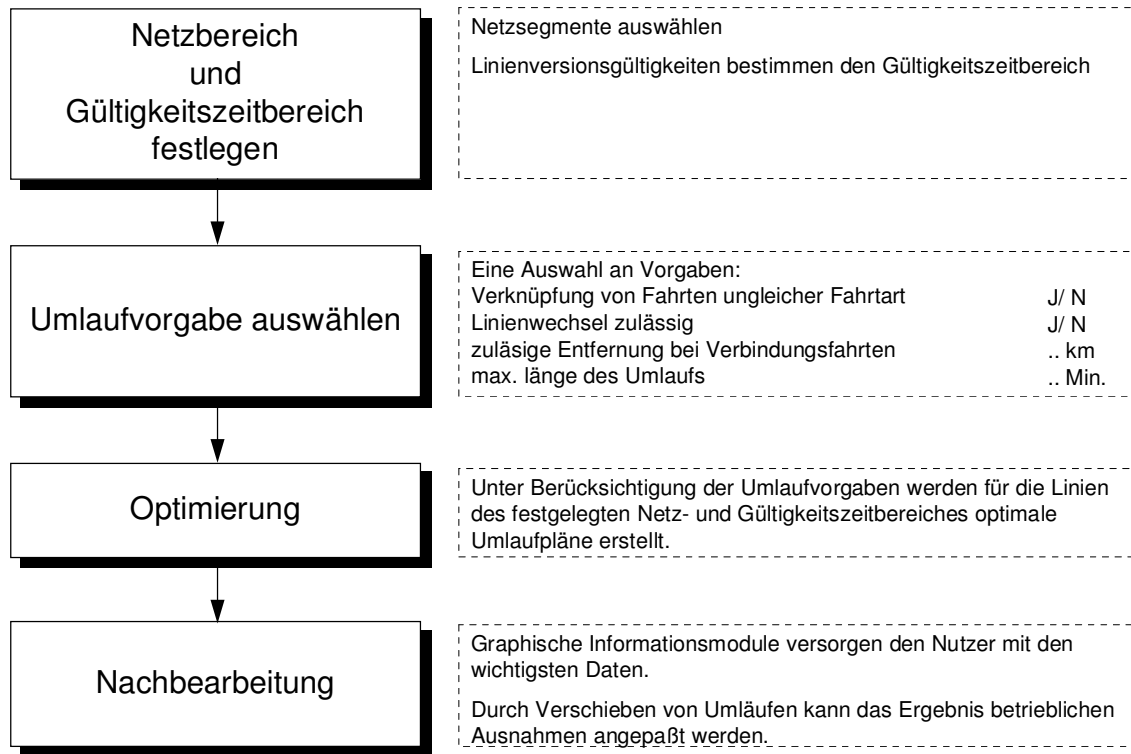


Abbildung 5.1: Ablauf Wagensumlaufoptimierung

6. Anpassungsoptimierung

Um bei vergleichsweise geringen Änderungen im Gesamtfahrplan die Stabilität der gefundenen Optimallösung zu erhalten, wird die Funktionalität einer *Anpassungsoptimierung* eingeführt. Das Ziel dabei ist, nur die geänderten Fahrten und damit die betroffenen Wagensumläufe einer Anpassungsoptimierung zu unterziehen, d.h. ein großer Teil des Wagensumlaufplans und damit auch des Dienstplans bleibt unverändert.

Im folgenden wird der Ablauf der Anpassungsoptimierung in BERTA skizziert. Es können Fahrten geändert, gelöscht oder neu angelegt werden. Sobald der neue Zustand in die Datenbank übernommen wurde, legt das Programm in der Umlaufplanung eine neue Umlaufplanversion an, übernimmt dabei aber alle Verknüpfungen aus der alten Umlaufplanversion mit Ausnahme der Verknüpfungen, die auf Grund der Änderungen in der Fahrplanung nicht mehr aufrechtzuerhalten sind. Diese Umläufe wurden automatisch aufgebrochen (siehe Abbildung 6.1).

Um auch die Optimierung den neuen Bedingungen anzupassen, muß zunächst einmal das alte Optimierungsszenario kopiert werden. Danach muß der Netzbereich und vor allem der Gültigkeitszeitbereich überprüft bzw. neu definiert werden. Nach Abschluß dieser Tätigkeiten wird die Optimierung erneut durchgeführt. Eine manuelle Nachbereitung ist möglich.

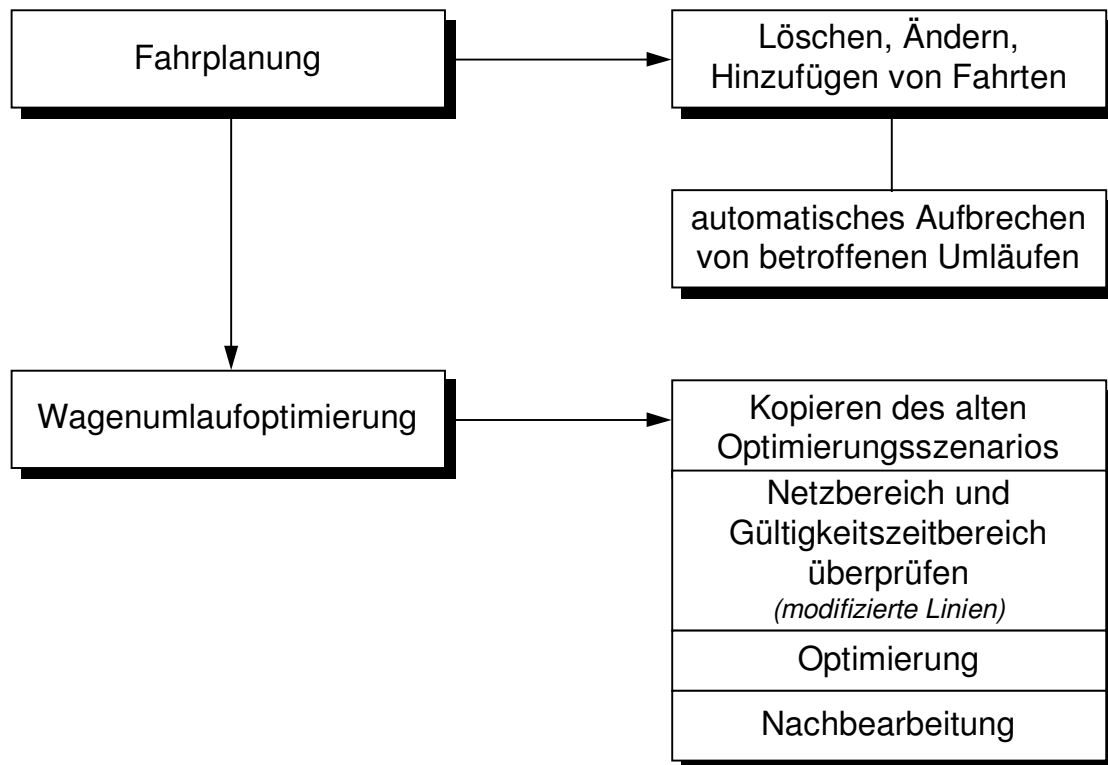


Abbildung 6.1: Ablauf der Anpassungsoptimierung

In der Anpassungsoptimierung werden nicht aufgebrochene Umläufe in ihrem Zustand belassen. Die neuen und geänderten Fahrten werden optimal in die vorhandenen Umlaufpläne eingefügt (siehe Abbildung 6.2).

Durch diese Vorgehensweise wird zwar nicht mehr ein Optimum im Sinne des optimalen Fahrzeugbedarfes erreicht, doch die betriebliche Stabilität bleibt gewahrt. Dem Benutzer obliegt im jeweiligen Einzelfall zu entscheiden, welche Zielsetzung er verfolgt - die betriebliche Stabilität oder ein fahrzeugbedarfsoptimaler Fahrplan.

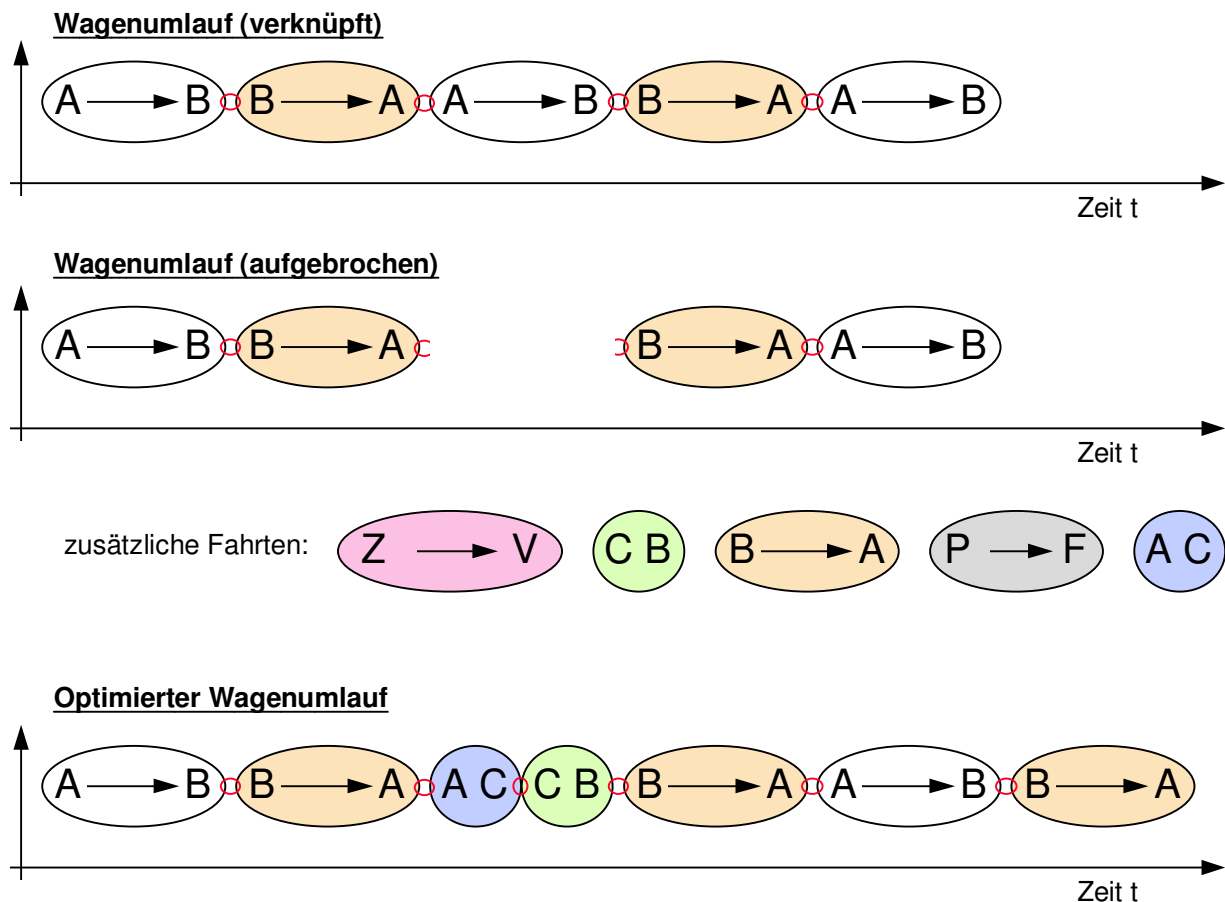


Abbildung 6.2: Vorgehensweise Anpassungsoptimierung

7. Mathematische Modelle und Methoden - Ein Überblick

Eine sehr gute Zusammenfassung über die mathematische Modellierungen und Methoden für die Wagenumlaufplanung wurde von Desrosiers, Dumas, Solomon und Soumis (1993) veröffentlicht. Die Autoren beschreiben zuerst die Modellierung und effiziente exakte Lösungsmethoden für Probleme mit einer homogenen Fahrzeugflotte, die in einem Betriebshof stationiert ist. Varianten wie beispielsweise „Umlaufplanung mit minimalen Betriebskosten bei vorgegebener Flottengröße“ oder „Bestimmung der minimalen Flottengröße zur Erfüllung des Bedarfs“ werden ebenfalls aufgeführt. Das Modell für das komplexitätstheoretisch sehr schwere Mehr-Depot-Problem (für eine inhomogene Fahrzeugflotte oder für den Mehr-Betriebshof-Fall) wurde in Desrosiers et al. von Ribeiro und Soumis (1994) übernommen; dieses kommt unserem Modell am nächsten. Desrosiers et al. skizzieren desweiteren einige Lösungsansätze zur Bestimmung zulässiger Lösungen und unterer Schranken, die in verschiedenen Publikationen beschrieben sind, z.B. Lagrange Relaxierungsansätze, Dekompositionsansätze, Column-Generation-Ansätze oder Branch-and-Cut-Ansätze.

Einen weiteren, aber nicht so ausführlichen Überblick wie von Desrosiers et al. erschien von Assad, Ball, Bodin und Golden (1983). Sie weisen allerdings auf ein Pro-

blem hin, das bei allen zu der Wagenlaufoptimierung erschienen Arbeiten bisher nicht im Modell berücksichtigt wurde, nämlich mögliche Zeit- und/oder Längenbeschränkungen von Umläufen. Solche Zusatzbedingungen sind aus Komplexitätstheoretischer Sicht sehr schwer und werden bestenfalls heuristisch berücksichtigt.

Bodin und Golden (1981) teilen verschiedene Lösungsansätze für das Mehr-Depot-Problem in 7 Klassen ein, wobei 2 Klassen von besonderer Bedeutung sind:

- *Cluster first - Schedule second*: Jede Fahrgastfahrt wird genau einem Fahrzeugtyp eines Betriebshofs zugewiesen. Damit dekomponiert das Gesamtproblem in unabhängige Ein-Depot-Probleme, die sehr schnell gelöst werden können (siehe auch Bertossi, Carraresi und Gallo (1987) und Carraresi und Gallo (1984).
- *Schedule first - Cluster second*: Die verschiedenen Depots werden zuerst ignoriert und die Kostenstrukturen möglicher Kopplungen von Fahrgastfahrten vereinheitlicht. Durch diese Reduktion kann die resultierende Problemrelaxierung mit den Methoden für das Ein-Depot-Problem schnell gelöst werden. Anschließend erfolgt eine heuristische Zuweisung der Wagenläufe zu den einzelnen Depots. Dies ist auch der zur Zeit in der Praxis angewandte Ansatz, der beispielsweise in dem System HOT II realisiert ist.

Allen mathematischen Publikationen ist gemeinsam, daß die numerischen Testrechnungen auf sehr kleinen (meistens künstlich erzeugten) Datensätzen erfolgen. Die einzigen uns bekannten Veröffentlichungen, die über Anwendungen auf großen realen Datensätzen berichten, jedoch keine Ergebnisse über numerische Testrechnungen angeben, stammen von Hoffstadt (1981), Mojsilovic (1983) und Daduna und Mojsilovic (1988).

8. Klassischer Wagenlaufplanungsansatz

Der klassische Optimierungsansatz ist ein „Schedule first - Cluster second“ Ansatz und wurde beispielsweise von Mojsilovic (1983) und Daduna und Mojsilovic (1988) in Hamburg realisiert. Dazu wird das Gesamtproblem auf ein Assignmentproblem (Zuordnungsproblem) reduziert. Die Variablen in diesem Modell sind die *Kopplungen* zwischen jeweils zwei Fahrten i und j . *Zulässige* Kopplungen sind solche, die einerseits aufgrund verkehrstechnischer Gegebenheiten fahrbar sind und andererseits betrieblichen Belangen wie Zeitfenster, maximaler Kopplungsentfernung etc. entsprechen. Jede *zulässige* Kopplung erhält eine von zuvor festgelegten Parametereinstellungen abhängige *Gewichtung* (Kosten). Die Parameter sind beispielsweise Leerkilometer, unproduktiver Lenkzeit, Linienwechsel, Brechpunktwechsel oder Zeitfenster. Die Gewichtungen der *unzulässigen* Kopplungen werden jeweils auf eine hinreichend große Zahl M gesetzt.

Wird dieses Assignmentproblem unter der gegebenen Kostenfunktion minimiert, so wird aufgrund der Wahl der Zielfunktionskoeffizienten (Dominanz der M) die Anzahl der in der Zuordnung benutzten unzulässigen Kopplungen minimiert. D.h. die Anzahl verwendeter zulässiger Kopplungen wird maximiert, was äquivalent ist zu einer Mi-

nimierung der Anzahl der Wagenumläufe. Zweitrangig werden für die minimale Anzahl der Wagenumläufe die Fahrgastfahrten so miteinander verknüpft, das dies zu der minimalen Gesamtgewichtung führt.

Die so erzeugten Wagenumläufe werden heuristisch unter Berücksichtigung betrieblicher Belange und Kapazitäten den einzelnen Fahrzeugtypen in den Betriebshöfen zugeordnet. Anschließend werden die einzelnen Wagenumläufe zu Kursen verknüpft, die dann konkret Fahrzeugen zugewiesen werden.

Die Vorteile des klassischen Ansatzes liegen offen auf der Hand: Das Verfahren ist eine schnelle Heuristik mit einem relativ kleinen Speicherplatzbedarf. Gegenüber einer manuellen Planung führt eine Optimierung mit diesem Ansatz bereits zu beträchtlichen Einsparungen.

Die Nachteile des klassischen Ansatzes sind:

- Es wird nicht die minimale Anzahl der Kurse garantiert, wie es in Daduna und Mojsilovic (1988) behauptet wird. Zwar wird eine Lösung mit minimaler Wagenumlaufzahl errechnet, jedoch kann zum Erreichen der minimalen Kurszahl eine andere Umlaufbildung notwendig sein. Dies wurde auch in Testrechnungen am ZIB für die Umlaufplanung in HOT II nachgewiesen.
- Die unterschiedlichen Betriebskosten der verschiedenen Fahrzeugtypen, die Kosten für die Ein- und Aussetzfahrten und die Kosten für die fahrzeugtypabhängige Durchführung einer Fahrgastfahrt werden nicht berücksichtigt.
- Wagenumläufe können eventuell unzulässig sein, da sie aus betrieblichen Gründen keinem Fahrzeugtyp zugewiesen werden können (Doppeldecker sind zu hoch zur Brückendurchfahrt).
- Eine Berücksichtigung von Fahrzeugkapazitäten erfolgt erst bei der heuristischen Zuweisung der Wagenumläufe zu den einzelnen Fahrzeugtypen innerhalb eines bestimmten Betriebshofs.

Jedoch sei bei aller Kritik bemerkt, daß dieser Ansatz zur Zeit zu den am besten realisierten Verfahren der Wagenumlafplanung zählt. Das System wurde in den 80-iger Jahren entwickelt und war für die damals vorhandenen EDV-Systeme das bestmögliche. Jedoch erst durch die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Computerhardware (Prozessoren und Speichermedien) und damit einhergehend die Fortschritte auf dem Gebiet der mathematischen Optimierung wurden die Grundlagen für neue Methoden zur exakten Lösung der Wagenumaufplanung geschaffen.

9. Ein exakter Wagemumlaufplanungsansatz

Die HanseCom GmbH und das ZIB haben in Kooperation ein mathematisches Modell für die Wagemumlaufplanung entwickelt, welches die Lücken des klassischen Ansatzes schließt.

In einem ersten Schritt werden sog. *Depots* definiert. In der Regel bilden alle in einem Betriebshof stationierten Fahrzeuge eines Typs ein Depot. Jedem Depot kann eine Kapazität zugewiesen werden. Im zweiten Schritt werden aus dem Netz- und dem Fahrplan die *Fahrgastfahrten* (inkl. Sonderfahrten) mit ihren Anfangs- und Endhaltepunkten, Start- und Endzeiten bestimmt. Jeder Fahrgastfahrt wird außerdem noch die sog. *Depotgruppe* zugeordnet, die sich aus den Betriebshofzuordnungen zu Linien und den Zuordnungsverboten von Fahrzeugtypen zu Linien ergibt. D.h. das sind die Depots, deren Fahrzeuge die Fahrgastfahrt durchführen können. Jede Depotgruppe muß mindestens ein Depot enthalten. Zu jedem Depot in der Depotgruppe kann außerdem noch ein depot- bzw. fahrzeugtypabhängiger Kostenanteil definiert werden. Bereits vorweg festgelegte Wagen(teil)umläufe können als eine Fahrgastfahrt betrachtet werden. Im dritten Schritt werden für jedes Depot die zulässigen *Einsetzfahrten*, *Aussetzfahrten* und *Kopplungen* mit den depotabhängigen Gewichtungen bestimmt. Die Kopplungen umfassen die Nacheinanderausführung von Fahrgastfahrten auf einer Linie, wie auch Verbindungsfahrten zwischen Fahrgastfahrten verschiedener Linien und verschiedener Brechpunkte. Bei der Gewichtung können betrieblich weniger bevorzugte Kopplungen, z.B. Brechpunktwechselfahrten, durch Parametrisierung entsprechend teurer bewertet werden.

Bisher sind die verschiedenen Fahrzeugtypen, Fahrzeugstandorte und Kapazitäten durch die Depots, die Fahrgastfahrten mit den betrieblichen Belangen wie Fahrbarkeit durch die Depotgruppe, die Ein-/Aussetzfahrten und die depotweise Kostendefinition für Fahrgastfahrten und Leerfahrten in dem Modell berücksichtigt. Die Aufgabe ist es nun, jede Fahrgastfahrt genau einem Depot seiner Depotgruppe zuzuweisen. Alle einem Depot zugewiesenen Fahrgastfahrten müssen mit den definierten Einsetzfahrten, Aussetzfahrten und Kopplungen zu Wagenumläufen verkettet und diese Wagenumläufe unter Einhaltung der Depotkapazitäten zu Kursen verknüpft werden können.

Übersetzt in ein graphentheoretisches Modell erhält man einen gerichteten Graphen. Dessen Knoten sind durch die Depots und die Start- und Endpunkten aller Fahrgastfahrten bestimmt. Die Einsetzfahrten, Aussetzfahrten, Kopplungen und Fahrgastfahrten definieren (jeweils depotweise) die Bögen des Graphen (siehe Abbildung 9.1: Jede Graustufe stellt ein Depot dar; die *Rückführungsbögen* überführen den Fahrzeugbestand in den nächsten Tag). Gesucht sind nun depotreine *Ketten*, die mit einem Einsetzfahrt-Bogen beginnen, Fahrgastfahrt-Bögen und Kopplungs-Bögen alternierend benutzen und schließlich mit einem Aussetzfahrt-Bogen enden. Dabei muß von jeder Fahrgastfahrt genau ein Fahrgastfahrt-Bogen benutzt werden, und die Ketten müssen unter Einhaltung der Depotkapazitäten zu Kursen verknüpft werden können.

Mit diesem Modell kann bisher lediglich das Szenario *Bestimmung einer kostenoptimalen Lösung bei vorgegebenen Fahrzeugkapazitäten* optimiert werden. Jedoch das vorrangige Ziel einer Optimierung ist die Bestimmung einer kostengünstigen Lösung mit der minimalen Anzahl von Kursen. Dazu wird auf den Kostenkoeffizienten aller Einsetzfahrten die sog. *Big-M-Methode* angewandt: Ein hinreichend großer Wert M , der größer ist als jede mögliche Gewichtung einer zulässigen Umlaufplanung, wird zu der Gewichtung jeder Einsetzfahrt addiert.

Wird nun bezüglich dieser neuen Zielfunktion minimiert, werden so wenig Einsetzfahrten wie möglich benutzt. Wie beim klassischen Ansatz wird dadurch nicht die Kursanzahl sondern nur die Anzahl der Wagenumläufe minimiert. Es muß deshalb noch ein Mechanismus bereitgestellt werden, der die Generierung ganzer Kurse an Stelle von Wagenumläufen gestattet. Die Benutzung einer Einsetzfahrt soll genau einen Kurs definieren. Es stellt sich deshalb die Frage, wie die Wagenumläufe zusammengestellt werden müssen, so daß diese mit der minimalen Anzahl von Kursen verknüpft werden können. Die Verknüpfung von Wagenumläufen kann jedoch wie eine Kopplung von einzelnen Fahrgastfahrten betrachtet werden, wobei das Fahrzeug nach Beendigung des Wagenumlaufs in den Betriebshof zurückkehrt und zu einem wohldefinierten späteren Zeitpunkt mit der Durchführung eines weiteren Wagenumlaufs beginnt.

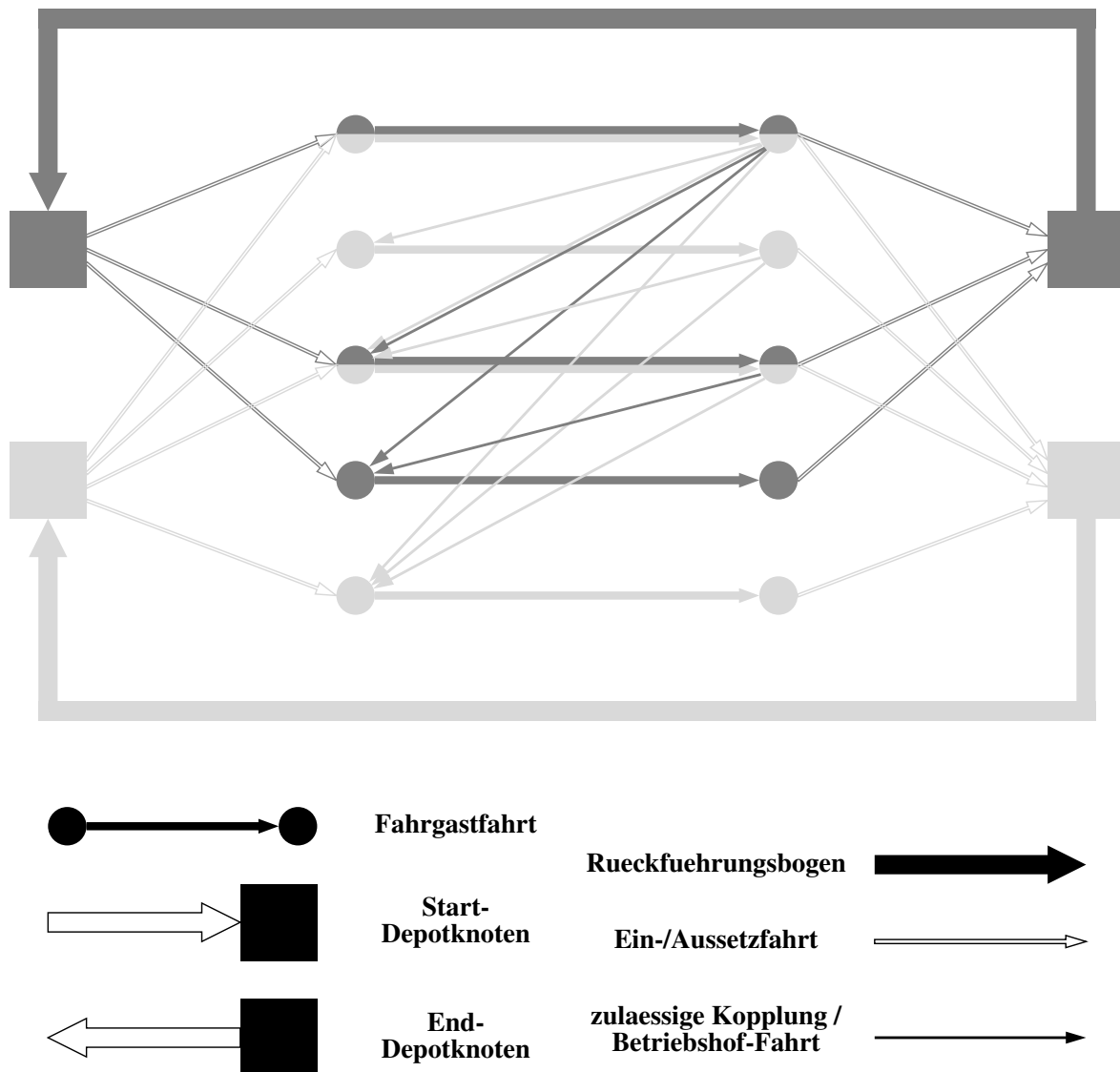
Dieses Parken in dem Betriebshof zwischen zwei für ein Depot möglichen Wagenumläufen wird durch eine sog. *Betriebshof-Fahrt* modelliert. Eine Betriebshof-Fahrt wird wie eine Kopplung betrachtet und definiert in dem Graphen ebenfalls einen Bogen. Natürlich müssen diese Betriebshof-Fahrten auch gewissen betrieblichen Anforderungen (Wartung oder Auftanken im Betriebshof, etc.) genügen, was beispielsweise durch ein hinreichend großes Zeitfenster sichergestellt werden kann.

Als Gewichtung einer Betriebshof-Fahrt bietet sich die Summe der Gewichtungen (ohne *Big-M*-Anteil) der durchgeführten Aus- und Einsetzfahrt an. Jedoch haben Testrechnungen gezeigt, daß das Verfahren mit einer solchen Kostenfunktion sehr lange Wagenumläufe generiert, da i.d.R. echte Kopplungen weniger Kosten verursachen als die Betriebshof-Fahrten. Dies ist jedoch aus betrieblicher Sicht nicht wünschenswert. Um diesem Effekt entgegensteuern zu können, wird die Gewichtung der Betriebshof-Fahrten durch Parameter gesteuert.

Mit den Konzepten „Berücksichtigung von Fahrzeugtypen und -standorte“, „*Big-M*-Methode“ und den „*Betriebshof-Fahrten*“ werden bei der Optimierung anstatt der Wagenumläufe ganze Kurse mit dem minimalen Fahrzeugbedarf bei minimaler Gesamtgewichtung unter gleichzeitiger Einhaltung der Depotkapazitäten erzeugt. Ein einzelner Kurs läßt sich leicht in seine Wagenumläufe aufsplitten, indem alle *Betriebshof-Fahrten* durch die entsprechenden Aus- und Einsetzfahrten ersetzt werden.

Ein *Fluß* in dem Graphen definiert sich wie folgt: Jedem Bogen wird ein nichtnegativer Wert zugewiesen. Ein *Fluß* heißt *zulässig*, wenn für jeden Knoten der *Fluß* erhalten bleibt, d.h. die Summe der *Fluß*werte der in einen Knoten eintretenden Bögen ist gleich der Summe der *Fluß*werte der aus dem selben Knoten austretenden Bögen. Es wird von einem *Mehrgüterfluß* gesprochen, wenn für jedes Depot ein zulässiger

Fluß betrachtet wird. Ein Mehrgüterfluß heißt für die Wagnumlaufplanung *zulässig*, wenn folgende drei Bedingungen erfüllt sind: Die einzelnen Flußwerte sind ganzzahlig, für jede Fahrgastfahrt ist die Summe der Flußwerte der Fahrgastfahrt-Bögen gleich 1 (definiert eine eindeutige Zuweisung der Fahrgastfahrt zu einem Depot) und für jedes Depot ist der Flußwert des Rückführungsbogens kleiner gleich der Depotkapazität. Ein zulässiger Umlauf wird wie folgt in einen Mehrgüter-Fluß wie folgt abgebildet: Der Fluß eines Bogens erhält den Wert „1“, falls für ein Depot eine Fahrgastfahrt, Einsatzfahrt, Aussetzung, Kopplung oder Betriebshof-Fahrt durchgeführt wird, andernfalls den Wert „0“. Der Wert des Rückführungsbogens für ein Depot ist gleich der Anzahl aller benutzter Einsatzfahrten des Depots.



Grafik 9.1: Graphentheoretisches 2-Depot-Modell zur Wagnumlaufplanung

10. Lösungsmethoden

Bei der Lösung von Wagenumlaufproblemen wird zwischen Ein-Depot-Problemen und Mehr-Depot-Problemen unterschieden, da für die ersteren effiziente Lösungsmethoden existieren, aber letztere sehr schwer sind.

Ein Ein-Depot-Problem läßt sich nach geeigneter Transformation als ein Minimalkosten-Fluß-Problem modellieren. Lösungsmethoden für solche Flußprobleme werden beispielsweise in Ahuja, Magnanti und Orlin (1993) beschrieben. Die Knoten für die Endpunkte der Fahrten werden zu Überschussknoten mit einem Wert von 1 , die Anfangspunkte der Fahrten werden zu Bedarfsknoten mit einem Defizit von 1 , und die beiden Depotknoten sind Transportknoten. Abbildung 10.1 zeigt eine solche Transformation eines Ein-Depot-Problems.

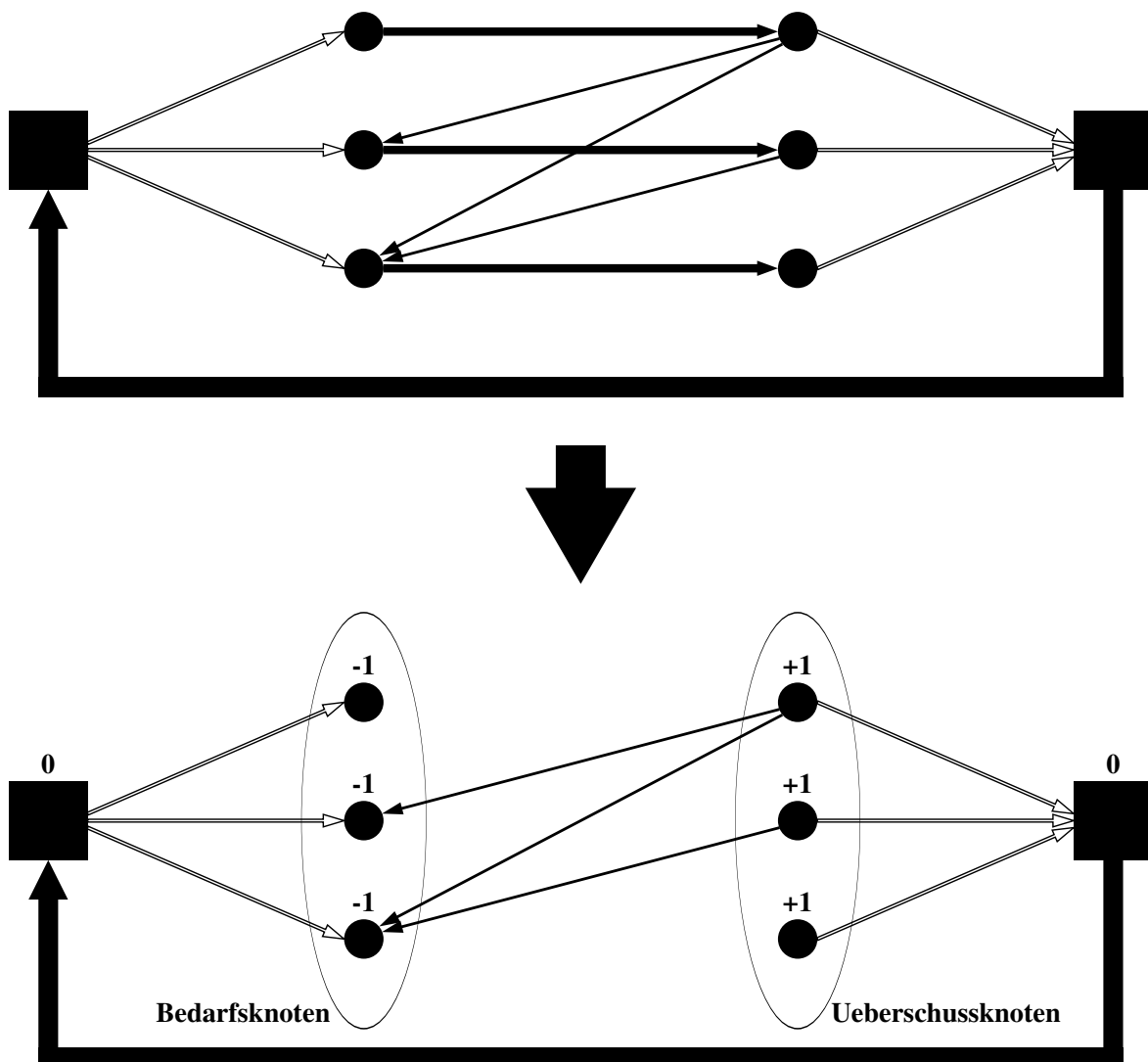


Abbildung 10.1: Transformation eines Ein-Depot-Problems zum Minimalkosten-Fluß-Problem

Zur Lösung großer realer Mehr-Depot-Probleme ist eine ganz andere, sehr viel kompliziertere Methode notwendig, deren genaue Beschreibung den Rahmen für diese Präsentation sprengen würde. Es sei an dieser Stelle nur bemerkt, daß ein Mehr-Depot-Problem als ein ganzzahliges lineares Programm formuliert wird, für dessen Lösung am ZIB ein Schnittebenenverfahren in Verbindung mit einem Branch-and-Bound-Algorithmus entwickelt wurde. Dazu war die Implementierung eines Column-Generation-Ansatzes und anspruchsvoller Pricing-Strategien notwendig. Das ganze Verfahren wird außerdem durch Heuristiken zur Bestimmung unterer Schranken und zulässiger Lösungen unterstützt. Einige Teile des Codes wurden auch parallelisiert und können auf einer Mehrprozessormaschine und/oder auf einem Cluster von Workstations parallel ablaufen.

Der Code ist inzwischen in der Lage, die Wagnumlaufprobleme der Hamburger Hochbahn AG, des Verkehrsbetriebes Hamburg-Holstein AG und der Berliner Verkehrsbetriebe zu lösen. Das Auffinden der Optimallösung bzw. der Beweis der Optimalität einer Lösung von sehr großen Problemen benötigt für den betrieblichen Einsatz noch unpraktikabel lange Laufzeiten. Jedoch werden flottenminimale Lösungen mit fast optimaler Gesamtgewichtung innerhalb weniger Stunden auf einer leistungsfähigen SUN Workstation berechnet. Ein-Depot-Probleme mit mehreren tausend Fahrgastfahrten werden sogar innerhalb weniger Minuten optimal gelöst.

11. Ausblick

Bisher erfolgt die Betriebseinsatzplanung und -optimierung im ÖPNV in mehreren nacheinander geschalteten Prozessen: Linienplanung → Fahrplanung → Wagnumlaufplanung → Dienstplanung → Dienstreihenfolgeplanung. Eine optimierte Wagnumlaufplanung kann nun aber eine schlechte Ausgangsbasis für die Dienstplanung sein. Deshalb sind i.d.R. Anpassungsläufe zwischen den einzelnen Stufen notwendig und erst eine iterative Optimierung der einzelnen Phasen führt zu praktikablen Lösungen.

Als Verkehrsbetriebe in den achtziger Jahren mit dem Einsatz rechnergestützter Optimierungstools begannen, war aus der Sicht der bereitstehenden mathematischen Methoden wie auch aus der Sicht der Realisierbarkeit auf den vorhandenen Hardwareplattformen eine Unterteilung des ganzen betrieblichen Planungsprozesses in mehrere nacheinander zu lösende Teilprobleme die einzige Realisierungsmöglichkeit. Dazu wurden die trotzdem noch sehr schwierigen Teilprobleme auf relativ einfach zu lösende Probleme, wie beispielsweise das Zuordnungsproblem, reduziert. Die Lösung des vereinfachten Teilproblems konnte dann heuristisch zu einer Lösung des Ausgangsteilproblems erweitert werden.

Durch den rasanten Fortschritt in der Methodik wie auch in der Hardware können nun exakte Modellierungen und Lösungsverfahren für die einzelnen Teilprobleme entwickelt und umgesetzt werden. Eine erste Herausforderung dazu war auch die Wagnumlaufplanung, die zur Zeit jedoch noch an die Grenzen leistungsfähiger Workstations stößt. Das nächste Ziel ist es, Verfahren zu entwickeln und bereits bestehende auszubauen, um die gewaltigen Einsparungspotentiale einer Dienstplan-

optimierung freizusetzen. Langfristig sollen jedoch die Umlaufplanung und die Dienstplanung gemeinsam modelliert und optimiert werden, was jedoch mit den heutigen mathematischen Methoden und Rechenkapazitäten noch nicht umsetzbar ist.

Literatur

R. K. Ahuja, T. L. Magnanti und J. B. Orlin (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

A. Assad, M. Ball, L. Bodin und B. Golden (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews. *Computers & Operations Research*, 10(2):63-211.

A. A. Bertossi, P. Carraresi und G. Gallo (1987). On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17:271-181.

L. Bodin und B. Golden (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11:97-108.

P. Carraresi und G. Gallo (1984). Network models for vehicle and crew scheduling. *European Journal of Operations Research*, 16:139-151.

J. R. Daduna und M. Mojsilovic (1988). Computer-aided vehicle and duty scheduling using the HOT programme system. In Daduna und Wren (1988).

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

J. Desrosiers, Y. Dumas, M.M. Solomon und F. Soumis (1993). Time constrained routing and scheduling.

J. Hoffstadt (1981). Computerized vehicle and driver scheduling for the Hamburger Hochbahn Aktiengesellschaft. In Wren (1981), Seiten 35-52.

M. Mojsilovic (1983). Verfahren für die Bildung von Fahrzeugumläufen, Dienstplänen und Dienstreihenfolgeplänen. In Heureka 83 - Optimierung in Transport und Verkehr, Karlsruhe.

C. C. Ribeiro und F. Soumis (1994). A column generation approach to the multiple-depot vehicle scheduling problem. *Operations Research*, 42(2):41-52.

A. Wren, Editor (1981). *Computer scheduling of public transport: Urban passenger vehicle and crew scheduling*. North-Holland Publishing Company.