

# ARCHEOPS – Optimierungssystem zur integrierten Umlauf- und Dienstplanbildung im Nahverkehr

*Claus Jørvang (Århus Sporveje, Dänemark, [www.sporveje.dk](http://www.sporveje.dk)),  
Anna Neufeld, Dr.Sergej Schlackow (Cheopsys, [www.cheopsys.de](http://www.cheopsys.de))*

**Zusammenfassung.** Wir beschreiben das System ARCHEOPS zur integrierten Umlauf- und Dienstplanbildung im Nahverkehr. Das System stellt neben der Anzahl der Dienste die Qualität einzelner Dienste und des gesamten Umlauf- und Dienstplans in Vordergrund. Es wurde erfolgreich in einem der größten öffentlichen Verkehrsunternehmen Dänemarks Århus Sporveje getestet und ist dort im Einsatz.

## Einführung

Bei der operativen Planung von Verkehrsbetrieben spielen die Umlaufplanung und Dienstplanung eine wichtige Rolle. In der Regel wird als erstes ein Umlaufplan gebildet, der dann als Grundlage für die nachfolgende Dienstplanung dient. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Optimierungsaufgabe für die Umlaufplanbildung sich gut formalisieren lässt und in den meisten Fällen mit mathematischen Algorithmen exakt lösbar ist. Dadurch ist eine rein automatische Umlaufplanbildung möglich, die einen optimalen Umlaufplan liefert.

Optimaler Umlaufplan bedeutet in diesem Kontext, dass mit dem Umlaufplan das Minimum an Fahrzeugen, oder, allgemeiner, das Minimum an Kosten, erreicht wird, mit denen ein bestehender Fahrplan bedient werden kann. Diese Kosten schließen aber noch keine Personalkosten ein, die erst bei der Dienstplanbildung berücksichtigt werden können.

Die Dienstplanbildung ist um einiges komplizierter als die Umlaufplanbildung. Die zu bildenden Dienste müssen einer ganzen Reihe der gesetzlichen und betrieblichen Anforderungen, wie etwa Pausenregelungen, genügen, was die entsprechende mathematische Aufgabe so kompliziert macht, dass eine exakte Aufgabelösung bei akzeptablen Lösungszeiten unmöglich wird. Deswegen werden hier unterschiedliche heuristische Techniken angewendet, aber auch heuristische Verfahren sind schwierig. Die fest vorgegebenen Rahmen von dem optimalen Umlaufplan lassen nicht nur einen optimalen, sondern oft auch einen akzeptablen Dienstplan nicht zu. Die Ursache ist offensichtlich: Die Optimierungsziele der Dienstplanbildung stehen in Widerspruch mit den Optimierungszielen der Umlaufplanbildung. Gerade die einzuhaltenden Pausenregelungen wären ein deutliches Beispiel dafür.

Um dieser Situation vorzubeugen, wird versucht schon bei der Umlaufplanbildung die Interessen von der Dienstplanung mit zu berücksichtigen, damit die gebildeten Umläufe besser für die Dienstplanung geeignet sind. Dabei wird entweder die Kostenmatrix manipuliert, um z.B. die Bildung von pausenreichen Umläufen zu begünstigen, oder, wie es in Praxis oft gemacht wird, ein Zwischenschritt eingeschaltet, bei dem die gebildeten Umläufe mit Pausen bereichert werden. Diese Maßnahmen, oft mit einem großen manuellen und kostenintensiven Aufwand verbunden, schaffen zwar Abhilfe, lösen das Problem aber nicht. Der grundsätzliche Umstand, dass bei der Umlaufplanbildung die vielfältigen und komplizierten Anforderungen der nachfolgenden Dienstplanung nur bedingt berücksichtigt werden können, führt dazu, dass der optimierte Umlaufplan zum Hindernis für die Dienstplanung und –optimierung wird. Als Folge sind die gebildeten Dienste von einer schlechten Qualität, das Optimierungspotential der gesamten Planung bleibt unerschöpft und es wird eine aufwendige manuelle Anpassung des Dienstplans benötigt.

Einen Ausweg aus dieser Situation bietet eine integrierte Umlauf- und Dienstplanung, bei der die beiden Planungsaufgaben gleichzeitig gelöst werden. In den letzten Jahren ist eine Reihe von Veröffentlichungen erschienen, wo unterschiedliche Ansätze zur Verwirklichung eines Systems zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung im regionalen Nahverkehr vorgeschlagen werden (siehe z.B. [1], [2]).

## **ARCHEOPS**

Das System ARCHEOPS wurde von der Fa. Cheopsys in der engen Zusammenarbeit mit dem Århus Sporveje, einem der größten öffentlichen Verkehrsunternehmen in Dänemark, entwickelt. Mit ARCHEOPS wurde ein Optimierungsverfahren mit der integrierten Umlauf- und Dienstplanung realisiert. Die Umlaufplanbildung als ein vorgeschalteter selbstständiger Planungsschritt entfällt komplett. Das System wird auf einem im Wesentlichen gültigen Umlauf- und Dienstplan aufgesetzt, der nicht jeglichen Optimierungsanforderungen genügen muss. „Im Wesentlichen gültiger“ Umlauf- und Dienstplan kann auch eine nach Möglichkeit geringe Anzahl unzulässiger Umläufe und Dienste enthalten, sie werden im Laufe des Optimierungsprozesses korrigiert. So sind in der Regel die Abwandlungen aus dem Umlauf- und Dienstplan für eine frühere Planungsperiode gut als Ausgangsplan geeignet. Obwohl das System auch intern einen Ausgangsplan produzieren kann, sind die Dienstpläne mit den schon eingegliederten Gegebenheiten des Verkehrsbetriebs bevorzugt, weil sie den Optimierungsprozess verkürzen.

Während des Optimierungsprozesses werden die Änderungen von Umläufen durchgeführt, sobald sie eine Verbesserung für den Dienstplan bringen. Das verlagert den Schwerpunkt im gesamten Planungsablauf auf die Dienstplanung und bringt somit viele Vorteile.

Zum einen spiegelt die Hervorhebung der Dienstplanbildung in dem Planungsprozess den Sachverhalt wider, dass die Personalkosten, auch die, welche sich nicht unmittelbar monetär ausdrücken lassen, wie etwa soziale Verträglichkeit der Dienste, Krankenquote o.ä., heutzutage ein viel wichtigerer Kostenfaktor als Fahrzeugkosten o.ä. sind. Zum anderen schafft die Befreiung von dem fesselnden Rahmen eines starren Umlaufplans zusätzliche Freiheiten bei der Optimierung, die zur besseren Qualität der einzelnen Dienste und somit des gesamten Dienstplans führen.

Der Umstand, dass die Umläufe während des Optimierungsprozesses geändert werden können, kommt aber nicht nur Diensten zugute. Vielmehr eröffnet er die Möglichkeit, die Ziele der Dienstplanbildung mit den Zielen der Umlaufplanbildung zu vereinbaren. Ein Beispiel dafür wäre, wenn einige Linien nur von Fahrzeugen einer bestimmten Art bedient werden können. Wenn das Unternehmen eine begrenzte Anzahl von den Fahrzeugen dieser Art hat, entsteht dadurch eine klare Restriktion an den Umlaufplan, und zwar, dass die Anzahl der Umläufe bzw. der Umlaufketten mit besonderen Linien nicht die Anzahl der geeigneten Fahrzeuge übersteigt. Auch wenn man bei der üblichen zweistufigen Planung während der Umlaufplanbildung diese Restriktion erfüllen könnte, würden die fixierten Umläufe möglicherweise eine starke Einschränkung für die Dienstplanbildung darstellen, insbesondere wenn es nur wenige solche Umläufe sind. Bei der integrierten Planbildung, obwohl die Dienste Priorität haben, werden solche Anforderungen auf den Umlaufplan auch nicht außer Acht gelassen. Sie bekommen nur eine andere Gewichtung, die flexibel nach dem Anwenderermessen definiert werden kann.

## **Überwachungswerte**

Das oberste Ziel, das bei der ARCHEOPS-Entwicklung im Vordergrund stand, ist die Bildung von qualitativ hochwertigen Umlauf- und Dienstplänen. Der Begriff der Dienstplanoptimierung wurde von Anfang an anders als traditionell nicht als eine einfache Minimierung der oft schwer definierbaren Kosten verstanden, sondern als Erreichung eines Standes, der die Erwartungen des Anwenders möglichst gut erfüllt und seinen Vorstellungen über Qualität entspricht. Die erste Voraussetzung für ein solches Vorhaben ist eine Definition, was eigentlich Qualität eines Dienstplans ist. Diese Definition muss gewährleisten, dass alle vielfältigen Vorstellungen über Qualität sich klar und verständlich ausdrücken lassen.

Im ARCHEOPS-Konzept wird die Qualität eines Umlauf- und Dienstplans als eine Menge von hierarchisch geordneten Werten, genannt Überwachungswerte, verstanden, wo jeder Wert eine Charakteristik des Umlauf- und Dienstplans aus einer bestimmten Sicht darstellt. Diese Überwachungswerte können verschiedenste Aspekte sowohl des Umlauf- als auch Dienstplans in Betracht nehmen. Mit dieser Definition von Qualität des Umlauf- und Dienstplans wird es möglich, zwei verschiedene Umlauf- und Dienstpläne zu

vergleichen: besser ist der Plan, dessen Überwachungswert auf irgendeiner Ebene besser ist, vorausgesetzt, dass auf höheren Hierarchieebenen die Werte gleich sind.

Hier sind nur einige Beispiele für Überwachungswerte:

- Anzahl der Dienste mit einer Dienstqualität kleiner als ein Grenzwert
- Anzahl der Dienste mit einer Längenabweichung von einem Idealwert größer als ein Grenzwert
- Die Differenz zwischen der Anzahl der Umläufe, die nur mit einer bestimmten Fahrzeugart bedient werden können, und der Anzahl vorhandenen Fahrzeuge dieser Art.

Die meisten während des Optimierungsprozesses geltenden Überwachungswerte werden vom Anwender vorgegeben. Es gibt aber auch systeminterne Überwachungswerte, die von außen nicht oder nur bedingt beeinflussbar sind. Der Überwachungswert mit dem höchsten Rang in der Hierarchie ist die Anzahl der unzulässigen Dienste. Das bedeutet, dass keine Änderung des Umlauf- und Dienstplans akzeptiert wird, wenn sie die Anzahl der unzulässigen Dienste erhöht. Umgekehrt wird der Umlauf- und Dienstplan im Laufe des Optimierungsprozesses geändert, wenn dabei die Anzahl der unzulässigen Dienste reduziert wird. Diese Eigenschaft ermöglicht die erwähnte Fähigkeit von ARCHEOPS die unzulässigen Ausgangspläne zu korrigieren.

Der zweite Überwachungswert in der Hierarchie ist die Anzahl der Dienste. Auf diesen Überwachungswert kann der Anwender einen gewissen Einfluss nehmen, und zwar kann er bestimmen, dass die Anzahl der Dienste bis zu einem bestimmten Grad erhöht werden kann, wenn das einen anderen anwenderspezifischen Überwachungswert positiv beeinflusst. Vor allem findet diese Möglichkeit eine Anwendung in den Fällen, wo sich die Qualität eines oder mehrerer Dienste bei der erreichten Anzahl der Dienste nicht verbessern lässt.

Durch die gegebene Möglichkeit, verschiedene Überwachungswerte zu definieren, ist eine Grundlage für eine Bildung eines qualitativ hochwertigen Dienstplans geschaffen. Tatsächlich, wenn man eine Menge von Überwachungswerten definiert wie z.B. Anzahl der Dienste mit einer ungünstig gelegenen Mittagspause, Anzahl der Dienste mit wenigen Kaffeepausen, Anzahl der Dienste mit häufigem Linienwechsel usw., dann wird im Optimierungsprozess die Anzahl der qualitativ minderwertigen Dienste kontinuierlich reduziert. Nur, abgesehen von einem negativen Einfluss einer Inflation von Überwachungswerten auf das Laufzeitverhalten von ARCHEOPS, kann man gerade bei solchen Überwachungswerten, die auf der Bewertung der Qualität eines einzelnen Dienstes basieren, nicht immer definitiv sagen, ob eine Diensteigenschaft wichtiger als eine andere ist. Welchen Dienst wird ein Fahrer bevorzugen – mit wenigen Kaffeepausen, dafür aber ohne Linienwechsel, oder ist der Linienwechsel unwichtig, wenn eine ordentliche Mittagspause vorhanden ist? Bei einem Versuch, solche Fragen zu durchleuchten, kommt man schnell

zu den Fragestellungen, bei denen man ohne zusätzliche Erhebungen nur mutmaßen kann.

Obwohl Dienstqualität jeweils nach Verkehrsbetrieb oder sogar nach Planer unterschiedlich interpretiert wird, muss ein Optimierungssystem mit einem Anspruch auf Bildung der qualitativ hochwertigen Dienstpläne über greifbare Werte verfügen, die die Qualität eines einzelnen Dienstes widerspiegeln.

Deswegen ist es von großer Bedeutung eine zuverlässige Funktion zu haben, die bei der qualitativen Bewertung eines Dienstes dessen relevante Aspekte in Betracht nimmt und sie in einem zusammenfassenden ausgewogenen Wert ausdrückt. Im ARCHEOPS wurde für die Dienstbewertung eine Funktion benutzt, die in Århus Sporveje als Ergebnis mehrjähriger Forschungsarbeit entwickelt und erprobt wurde. Hauptbewertungskriterien für diese Funktion sind Linienwechsel, Anzahl und Gleichmäßigkeit der Kaffeepausen, Positionierung der Blockpausen und die Lenkzeiten. Die Funktion bildet anhand von empirischen Gewichtskoeffizienten einen Wert für die Dienstqualität. Die gesammelten Erfahrungen zeigen, dass die gleichbewerteten Dienste ungefähr die gleiche Akzeptanz bei den Fahrern finden. Es war auch möglich zu bestimmen, ab welcher Dienstqualität ein Dienst als schlechter empfunden wird.

Diese Qualitätsfunktion ermöglicht die Definition eines Überwachungswertes, der für eine gleichmäßig hohe Dienstqualität aller Dienste sorgen muss.

## **Optimierungsprozess**

Der Optimierungsprozess, der vom ARCHEOPS durchgeführt werden soll, wird vom Anwender aus mehreren unterschiedlichen Teiloptimierungen zusammengestellt. Jede Teiloptimierung hat ein primäres Optimierungsziel oder, genauer ausgedrückt, ein Optimierungsgegenstand.

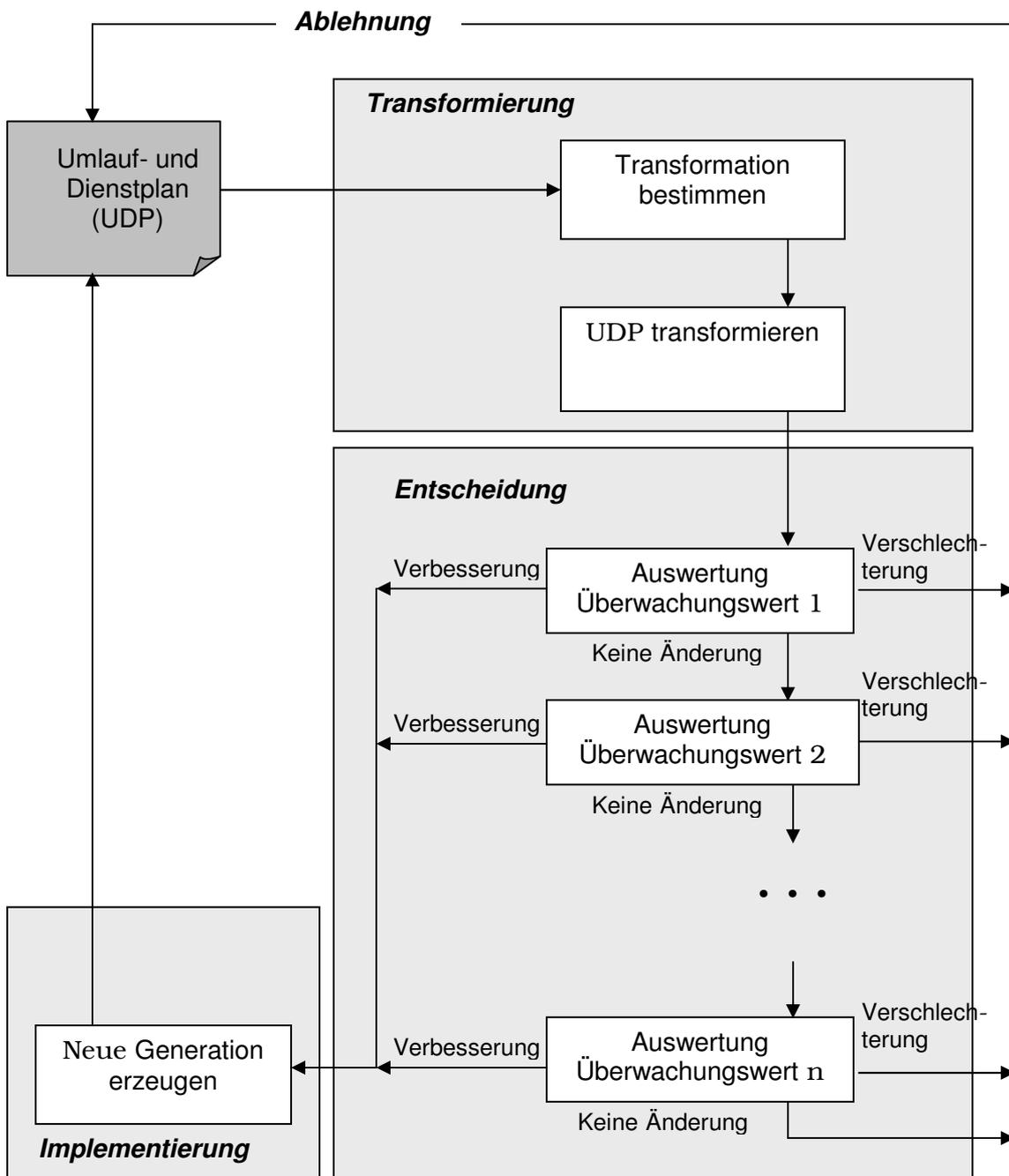
Zurzeit werden drei primäre Optimierungsziele verwendet: *Anzahl der Dienste*, *Qualität* des Umlauf- und Dienstplans und die *Effizienz* des Umlauf- und Dienstplans.

Das Optimierungsziel *Anzahl der Dienste* wird als die Erreichung einer vom Anwender vorgegebenen Anzahl der Dienste interpretiert. Das ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn der Anwender nicht das Minimum an Diensten erreichen will, sondern einen Dienstplan für eine bestimmte Fahreranzahl erstellen muss. In der Praxis ist er in diesem Fall oft auf eine manuelle „Rückoptimierung“ angewiesen, um die Anzahl der Dienste nach der Dienstplanbildung auf einen Wunschwert zu bringen. Mit ARCHEOPS entsteht dieses Problem nicht. Wenn aber der Zielwert für die Dienstanzahl nicht vorgegeben wird, wird sie minimiert.

Mit dem Optimierungsziel *Qualität* wird die Qualität des Dienstplans im Sinne der definierten Überwachungswerte optimiert.

Das Optimierungsziel *Effizienz* wird gesetzt, um die Leerfahrt- und Standzeiten zu verringern. Dieses Ziel ist den beiden anderen untergeordnet.

Das primäre Optimierungsziel ist an sich nur ein Begriff für die Lösungsart der zu lösenden Optimierungsaufgabe. Abhängig von dem primären Optimierungsziel werden intern die Einzelheiten des Algorithmus bestimmt. Das eigentliche Optimierungsziel wird durch die internen und vom Anwender vorgegebenen Überwachungswerte definiert. Somit wird das zu lösende Optimierungsproblem zu einem nichtlinearen Mehrzieloptimierungsproblem.



## Abbildung 1. Funktionelles Schema des Optimierungsprozesses

Abbildung 1 zeigt das funktionelle Schema einer Teiloptimierung. Der Kern des Algorithmus ist der Block *Transformierung*. In diesem Block wird nach einer passenden Dienstplan-Transformation gesucht, die zu einer Verbesserung des gesamten Dienstplans führen könnte.

Die Verbesserungen des Umlauf- und Dienstplans, die in einer Teiloptimierung erzielt wurden, bleiben für die nachfolgenden Teiloptimierungen erhalten. Da eine Teiloptimierung gezielt nach Dienstplanverbesserungen sucht, wird somit eine kontinuierliche Verbesserung des Umlauf- und Dienstplans über den gesamten Optimierungsprozess erzielt.

Typischerweise besteht ein Optimierungsprozess aus drei nacheinander folgenden Teiloptimierungen jeweils mit den Optimierungszielen *Anzahl der Dienste*, *Qualität* und *Effizienz*. Man kann aber z.B. mehrere Qualitäts-Teiloptimierungen mit unterschiedlichen Überwachungswerten definieren. Des Weiteren kann auch eingestellt werden, wie intensiv eine Teiloptimierung sein soll.

### **Flexibilität und Anwenderfreundlichkeit**

Das System besitzt eine Reihe nützlicher Eigenschaften, die eine flexible Gestaltung des Optimierungsprozesses und seine genaue Anpassung an die Anwenderanforderungen erlauben.

So lässt sich die interne ARCHEOPS-Dienstqualitätsfunktion durch eine anwenderspezifische externe Funktion ersetzen. Diese externe Funktion wird als DLL-Modul mit einer definierten Schnittstelle realisiert und mittels eines Parameters dem System bekannt gegeben.

Oft besteht eine Notwendigkeit, bestimmte Umläufe aus der Verarbeitung auszuschließen oder gewisse Verknüpfungen für bestimmte Fahrten vorzuschreiben. ARCHEOPS sieht vor, dass bei der Zusammenstellung des Optimierungsprozesses jede Menge zusätzlicher externer Regeln definiert werden können, womit nicht nur Umläufe zu sperren oder Verknüpfungen festzulegen möglich ist, sondern beinahe beliebige Einschränkungen und Bedingungen auf die Zusammensetzung der Umläufe und Dienste vorgegeben werden können.

Eine sehr wichtige Eigenschaft von ARCHEOPS ist die integrierte Optimierungsstrategie zur Auflösung bzw. Vermeidung der Terminalkapazitätsproblemen. Die Merkmale der problembeladenen Stationen (Ankunft- und Abfahrthaltestellen, Standspuren usw.) werden bei der Infrastrukturbeschreibung dem System bekannt gegeben, und diese Information wird während der Optimierung ausgewertet. Es ist offensichtlich, dass die Möglichkeit das Kapazitätsproblem zu lösen in erste Linie vom Fahrplan abhängig ist. Somit kann das Problem natürlich auch von ARCHEOPS nicht immer vollständig gelöst werden. In den meisten Fällen aber, wo das möglich ist, wird ARCHEOPS dafür sorgen, dass die Terminalkapazität optimal genutzt wird.

Der Optimierungsprozess kann jederzeit unterbrochen werden, wenn z.B. der Planer anhand der ausgegebenen statistischen Informationen der Meinung ist, dass die notwendigen Optimierungsgrad und/oder Planqualität erreicht wurden. Nach der eingehenden Analyse kann der Optimierungsprozess auf einem der gesicherten Zwischenstände wieder aufgesetzt werden.

Alles zusammen macht ARCHEOPS zu einem effizienten und flexiblen Umlauf-, Dienstplanbildungs- und Optimierungssystem, das vorteilhaft und kostensparend bei der operativen Planung eingesetzt werden kann.

## **Grundlagen des Algorithmus**

Es ist unumstritten, dass das Problem der Optimierung des Umlaufplans, zumindest in der Form wie es üblicherweise verstanden wird, mit den Methoden der linearen Programmierung effektiv gelöst werden kann. Es ist genauso unumstritten, dass gerade diese Methoden für die Optimierung des Dienstplans unanwendbar sind, einfach weil das Problem im Allgemeinen nicht linear ist. Dieser Umstand führte aber nicht dazu, dass man auf den mächtigen Apparat der linearen Programmierung zur Lösung der Dienstplanoptimierungsproblem verzichtet hat. Vielmehr wurde es versucht, mittels der sogenannten heuristischen Verfahren das Problem zu reduzieren oder in Teilprobleme zu zerlegen, dass man wieder zu den Methoden der linearen Programmierung greifen kann. Erfolg oder Misserfolg solcher Vorgehensweise hängt davon ab, wie gut diese heuristischen Methoden waren. So werden diese Heuristiken immer komplizierter und spezifischer, und die gesamte Optimierungsstrategie unterscheidet sich letztendlich nicht besonders von einem mehr oder weniger ausgeklügelten Enumerationsprozess.

Die Komplexität des Problems führt oft auch dazu, dass der Dienstplan nur im Wesentlichen gebildet und optimiert wird: Es bleibt noch ein Rest von Fahrten, die nicht in den Dienstplan integriert werden konnten, und es bleibt dem Planer überlassen, wie er mit diesem Rest fertig wird. Infolgedessen entstehen in der Regel zusätzliche Dienste mit sehr niedriger Qualität.

Die Anerkennung des Faktes, dass die lineare Programmierung nicht die richtige Methode für die Aufgaben wie Dienstplanoptimierung ist, war der entscheidende Faktor für die Entwicklung eines neuartigen Algorithmus, der in die Basis von ARCHEOPS gelegt wurde. Man sollte anmerken, dass es in diesem Fall keinerlei mathematisch gesicherten Erkenntnisse gibt, auf denen der Algorithmus gestützt wird, sondern nur die Annahme, dass die allgemeinen mathematischen Gegebenheiten, die in vielen anderen Bereichen gelten, auch in diesem Fall ihre Gültigkeit haben.

Bei der Formalisierung unserer multikriteriellen Optimierungsaufgabe wird ein möglicher Dienstplan als eine Matrix angesehen, deren Elemente Fahrten bzw. Fahrtenstücken entsprechen. Die Zeilen dieser Matrix stellen einzelne Dienste dar. Alle Matrizen, die eine bestimmte Menge von Bedingungen erfüllen (etwa

dass in jeder Spalte nur ein Element besetzt werden darf und die zulässige Zusammensetzung einer Zeile durch einen Graphen beschrieben wird usw.), bilden die Menge aller möglichen Dienstpläne. Dabei müssen die Zeilen einer Matrix nicht den Zulässigkeitsregeln „betrieblicher“ Art genügen, sondern nur den Einschränkungen auf Verknüpfungen von zwei benachbarten Fahrten. Mit anderen Worten, die Dienste, die den Matrixzeilen entsprechen, müssen nicht zulässig sein. Für die Zulässigkeit des resultierenden Dienstplans wird der Überwachungswert „Anzahl unzulässiger Dienste“ sorgen.

Wie bereits erwähnt, verbirgt sich der Kern des Algorithmus im Block *Transformation* (Abbildung 1). In diesem Block wird wiederholt eine gleichartige Transformation der Matrixzeilen angewendet, die zu einem neuen, möglicherweise unzulässigen, Dienstplan führt. Diese Transformation wird so gewählt, dass nach mehreren Iterationen die Elemente der Matrix gut durchgemischt sind. Man stelle sich vor die Bäckertransformation, bekannt in der Theorie der dynamischen Systeme, als Analog unserer Matrixtransformation. Die Bäckertransformation beschreibt einen Knetvorgang, bei dem der Teig auf die doppelte Länge gewalzt und dann durch Zurückklappen auf die ursprüngliche Größe gebracht wird. Wie die Rosinen im Rosinenkuchen beim Kneten werden die Matrixelemente durch Iterationen unserer Transformation schnell und gleichmäßig in der Matrix verteilt.

Die Transformationen mit solchen stark mischenden Eigenschaften werden in der Fachsprache ergodische Transformationen genannt (zur Einführung siehe z.B. [3]). So eine quasi ergodische Transformation der Matrix sorgt in unserem Algorithmus dafür, dass sehr viele äußerst unterschiedliche Dienstpläne in Betracht kommen und nach der Auswertung entweder abgelehnt oder akzeptiert werden. Gerade der Umstand, dass auch zulässige und hochwertige Dienste bei dem Optimierungsprozess immer wieder in ihre Bestandteile zerlegt werden, bringt dazu bei, dass die Globalsicht auf den Dienstplan nicht verloren geht und die Suche nach dem Optimum nicht durch lokale Dienstfixierungen erschwert oder unmöglich gemacht wird .

Diese quasi ergodische Transformation kann auf unterschiedliche Weise gewählt werden. So werden den unterschiedlichen primären Optimierungszielen auch unterschiedliche Transformationen zugeordnet. Somit bekommen wir eine ganze Klasse von transformationsabhängigen Algorithmen, die wir hier ergodische Algorithmen nennen.

Hier werden die genauen, gar nicht selbstverständlichen mathematischen Einzelheiten für die Problemformalisierung nicht beschrieben, zum Teil weil das viel zu weit vom Gegenstand des Artikels führen würde, in erster Linie aber wegen folgendes Umstandes: Wenn unsere Annahme über die Anwendbarkeit der gesamten Philosophie stimmt, brauchen wir diese Einzelheiten nicht, sie sind für die Praxis unerheblich.

Was hier oben beschrieben wurde, hat keinen Anspruch auf eine theoretische Begründung unseres Algorithmus. Es ist nur unsere Philosophie, die eine Ent-

wicklung von mehreren unterschiedlichen ergodischen Algorithmen ermöglicht hat, die in die Basis von ARCHEOPS gelegt wurden. Wie die nachfolgend beschriebenen Testergebnisse zeigen, erfüllt ARCHEOPS seine Aufgabe hervorragend.

## Testergebnisse

Das System wurde bei Århus Sporveje erprobt. Die im Unternehmen geltenden Regeln lassen keine geteilten Dienste sowie keinen Wechsel des Fahrzeuges vom Fahrer zu. Der Fahrer darf auf bestimmten Ablösepunkten nur innerhalb von vordefinierten Zeitintervallen abgelöst werden. Dazu kommen noch mehr oder weniger übliche Regeln bezüglich Pausen, Lenkzeiten, Dienstlänge usw.

Die Ergebnisse von ARCHEOPS wurden mit den Ergebnissen des Programms MINBUS verglichen, das seit mehreren Jahren in Unternehmen für Dienstplanung und -optimierung benutzt wird. Grundlage bildeten die produktiven Daten, die Pläne von MINBUS wurden später nach einer entsprechenden Anpassung umgesetzt.

An dieser Stelle möchten wir noch mal erwähnen, dass die erzeugten Dienste mit Hilfe der Qualitätsfunktion bewertet wurden, die freilich nicht alle qualitativen Aspekte erfassen kann. So weisen auch die von ARCHEOPS erzeugten Dienste gewisse qualitative Mängel auf. Um diese zu vermeiden, hätten noch zusätzliche Überwachungswerte in den Optimierungsprozess eingebunden werden müssen.

Die Tabelle unten zeigt die Vergleichswerte für zwei Betriebshöfe und die Tagessart Wochentag (Mo-Do).

Betriebshof	Programm	Anzahl der Dienste	Anzahl der Dienste niedriger Qualität	Anzahl der Fahrzeuge	Kurze Dienste	Unproduktive Zeit (Min.)
North	MINBUS	207	6	85	7	23072
	ARCHEOPS	203	0	86	0	23018
South	MINBUS	214	0	87	2	22252
	ARCHEOPS	209	1	89	0	22461

Wie man sieht, wurden für den Betriebshof North alle Referenzwerte von MINBUS mit Ausnahme der Anzahl der Fahrzeuge von ARCHEOPS unterboten.

Für den Betriebshof South erreichte ARCHEOPS 209 Dienste gegenüber 214 von MINBUS, dabei war allerdings ein Dienst niedriger Qualität geblieben. Dieser Dienst konnte im nachfolgenden Lauf eliminiert werden dadurch, dass die Anzahl der Dienste um 1 erhöht wurde.

Die Ursache dafür, dass bei der unproduktiven Zeit für den Betriebshof South ARCHEOPS einen minimal schlechteren Wert hat, liegt darin, dass die Kurzdienste mit der Dienstdauer unter 4 Stunden vom Unternehmen betriebsbedingt nicht gerne gesehen werden. Aus diesem Grund war die Optimierung der unproduktiven Zeit der Minimierung der Anzahl der Kurzdienste untergeordnet.

Die Anzahl der Fahrzeuge ist in den Umlaufplänen von ARCHEOPS größer als bei MINBUS. Die Ursache liegt wahrscheinlich darin, dass die Minimierung dieser Anzahl der Optimierung der Dienstqualität untergeordnet war.

## **Literatur**

[1] R.Freling, D.Huisman, and A.P.M.Wagelmans. Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling. *Journal of Scheduling*, 6:59-81,2003.

[2] R.Borndörfer, A.Löbel, S.Weider. Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im Nahverkehr. In *Heureka 02: Optimierung in Verkehr und Transport*, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln (2002), 77-98

[3] Walters, P. *Introduction to Ergodic Theory*. New York : Springer-Verlag,2000.