

# Optimale Disposition von Rangierlokomotiven bei Werks- und Industriebahnen – Vom Bedarf zum Produkt

**Marco E. Lübbecke und Uwe T. Zimmermann**

Abteilung für Mathematische Optimierung, Technische Universität Braunschweig,  
Pockelsstraße 14, D-38106 Braunschweig

Email: m.luebbecke@tu-bs.de, u.zimmermann@tu-bs.de

Gemäß der Zielsetzung des *Arbeitskreises für Mathematik in Forschung und Praxis*, als Schnittstelle zu fungieren, haben wir diese Zusammenfassung allgemeinverständlich verfaßt und auf die Beschreibung mathematischer Sachverhalte verzichtet.

## 1 Einleitung

Werks- und Industriebahnen transportieren Güter auf dem Werksgelände größerer Unternehmen zum Beispiel der stahlerzeugenden Industrie. Die Disposition der Lokomotiven, d.h. die Terminierung und Zuordnung von durchzuführenden Transportaufträgen zu Lokomotiven spielt dabei eine zentrale Rolle. Ein *Transportauftrag* kann eine tatsächliche Wagenbewegung, eine lokal gebundene Aufgabe wie Bereitschaft oder eine Sondertätigkeit wie Pause des Lokrangierführers, Tanken, Wartung o.ä. sein. Attribute eines Auftrags sind im wesentlichen Start- und Zielgleis, Arbeitsdauern und gegebenenfalls Zeitfenster an diesen beiden Orten sowie Wagengewichte. Fahrpläne existieren im allgemeinen nicht, einzelne fahrplangebundene Fahrten sind jedoch im Wechselverkehr mit der Deutschen Bahn AG durchzuführen. Da sich die Lokomotiven in technischer und personeller Ausstattung unterscheiden, ist nicht jeder Auftrag auf jeder Lokomotive fahrbar. Gesucht ist für einen gegebenen Planungshorizont jeweils eine Fahrtroute für jede Lokomotive, so daß jeder Transportauftrag von genau einer für ihn zulässigen Lokomotive bedient wird. Die Leerkilometer und die gegebenenfalls vor Erreichen eines Zeitfensters anfallenden Wartezeiten sollen minimiert werden. Als Planungshorizont relevant sind jeweils etwa zwei Stunden, was je nach Größe der Industriebahn einer Auftragsmenge zwischen 25 und 500 entspricht.

Die gegenwärtige Disposition der Lokomotiven geschieht rein manuell. Dabei wird der Disponent durch die EDV unterstützt. Die Systeme sind allerdings nicht in der Lage, aktiv zum dispositiven Entscheiden und Handeln beizutragen. Wünschenswert wäre es daher, eine *Vorschlagskomponente* in die bestehenden Systeme zu integrieren, um den maximalen Nutzen aus den hinterlegten Betriebs- und Ablaufdaten zu ziehen. Betriebliche Ziele wie Kostenminimierung oder die Verbesserung des Serviceangebots sollen dabei unmittelbar von einem solchen Vorschlag berücksichtigt werden.

Dank moderner Methoden der Mathematik und der Verfügbarkeit leistungsfähiger Computer erschließen sich seit einigen Jahren solch große Planungsaufgaben dem Zugang exakter Optimierungsverfahren. In einem BMBF-geförderten Projekt [2],<sup>1</sup> wurde ein rechnergestütztes Vorschlagswesen für den zentralen Aspekt der Lokomotiven-Disposition entwickelt. Hier betrachten wir weniger das Modell, dafür aber Rahmenbedingungen, die im *Vorfeld* und bei der *Umsetzung* mathematischer Ergebnisse in die betriebliche Praxis zu berücksichtigen sind.

---

<sup>1</sup>Förder-Kennzeichen 03-ZI7BR2-1. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Zusammenfassung liegt bei den Autoren.

## 2 Erfasste betriebliche Rahmenbedingungen und verwendete Daten

Die Ausgangslage für den Einsatz von Optimierungstechniken zur Lösung praktischer Aufgabenstellungen hat sich im vergangenen Jahrzehnt dramatisch gewandelt. Innovative Entwicklungen im Bereich der kombinatorischen Optimierung haben die methodische und algorithmische Grundlage geliefert, um Anwendungen überhaupt mathematisch *abbilden* zu können. Durch die kostengünstige Verfügbarkeit äußerst leistungsfähiger Computer-Hardware werden diese Modelle in akzeptablen Antwortzeiten *rechenbar*. Daneben tritt ein wesentlicher Punkt: Datenmaterial aus der täglichen unternehmerischen Praxis wird elektronisch gepflegt und erlaubt dadurch die Validierung entwickelter Optimierungsmodelle und gegebenenfalls in einem iterativen Prozeß deren Verbesserung bis hin zur Praxistauglichkeit.

Ein wesentliches Ziel war es, für mathematische Bedürfnisse einen *Auftragsbegriff* so allgemein zu formulieren, daß alle bisher denkbaren und diskutierten Möglichkeiten unter diesem Begriff wiederzufinden sind. Daher ist ein hier beschriebener *Auftrag* nicht identisch mit dem von Bahn zu Bahn verschiedenen Begriff des Transport- oder Rangierauftrags. In welcher Tiefe unser Begriff letztendlich ausgeschöpft wird, kann mit jedem Anwender abgestimmt werden und richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten. Ein *Auftrag* umfaßt folgende Daten:

- (interne) Auftragsnummer
- Start- und Zielgleis (optional)
- Zeitfenster für Start- und Zielgleis (optional)
- Bearbeitungsdauern in Start- und Zielgleis (optional)
- Bruttogewicht (*Gewicht Null* ist möglich)
- Liste der möglichen/erlaubten Lokomotiven

Mit diesen Attributen lassen sich Wagenbewegungen mit und ohne zeitliche Vorgaben, lokal gebundene Aufgaben (z.B. Bereitschaft am Hochofen) oder andere Tätigkeiten wie Pausen, Tanken, Wartung, Lokausfall usw. realisieren. Für einige Aufträge sind *Start- und Zielgleis* unter Umständen gar nicht bekannt, bzw. sollen nicht vorgegeben werden (etwa bei Pausen). Dies wurde berücksichtigt, so daß solche Aufträge an einem Ort eingeplant werden, der vom Optimierungsziel her günstig erscheint. Unter *Bearbeitungsdauern* können Zeiten für Rangieren, Kuppeln, Schlauchen, Bremsproben usw. aber auch für Zugbildung, Be- und Entladen usw. untergebracht werden. In der täglichen Praxis verschiedener Industriebahnen hat sich gezeigt, daß diese Zeiten stark von Personal und Umgebungsbedingungen wie Wetterverhältnissen abhängen. Hier könnte zunächst mit Erfahrungswerten gearbeitet werden, die dann laufend selbständig vom System oder vom Disponenten angepaßt oder neu vorgegeben werden. Die zugehörigen *Zeitfenster*, also frühestmögliche bzw. spätestzulässige Termine für die Bearbeitung in Start- und/oder Zielgleis müssen nicht, können aber beliebig vorgegeben werden. Intern wird hierdurch auch ermöglicht, daß gewisse Aufträge zu festen Zeitpunkten eingeplant werden *müssen*. Die *Liste der möglichen Lokomotiven* läßt sich leicht automatisch für jeden Auftrag erzeugen, wenn einmalig technische Daten von Wagen und Lokomotiven und Qualifikationsdaten des vorhandenen Personals hinterlegt werden. Diese Liste wird beliebig um gewünschte Aspekte erweitert werden können. Es sei darauf hingewiesen, daß die Verwaltung und Pflege der obigen Daten für jeden auch noch so kleinen Transportauftrag nur *scheinbar* einen Mehraufwand für den Disponenten bedeutet. Tatsächlich ergeben sich viele Aufträge automatisch aus einem auf Disponentenwissen aufgebauten, im Rechner abgelegten Regelwerk. So können Eingabemasken bereits mit den wesentlichen Daten vorgefüllt werden, die der Disponent nur in Ausnahmefällen korrigieren muß. Die meisten der verwendeten Daten lassen sich bereits heute aus den gepflegten Daten ableiten.

Die von einigen Bahnen gewünschte Eingabe einer Priorität ist allerdings nur dann sinnvoll und nötig, wenn nicht sämtliche Aufträge pünktlich ausgeführt werden können – eine Situation, die aus Servicegesichtspunkten überhaupt nicht auftreten darf und durch den Einsatz des von uns vorgeschlagenen Systems auf ein Minimum reduziert werden könnte.

### **Auftragsbündel**

Der Regelfall bei der Abarbeitung der Aufträge sieht offenbar momentan so aus, daß meist *nur ein Auftrag gleichzeitig* auf einer Lokomotive bearbeitet wird. In Gesprächen mit verschiedenen Bahnen ist deutlich geworden, daß – sofern dies sinnvoll, möglich und vom Disponenten nicht ausdrücklich für einzelne Aufträge verboten ist – verschiedene Aufträge auch zusammen bearbeitet werden sollen. Dies bedeutet neben der selbstverständlichen Vergabe von Folgeaufträgen, also *sequentieller* Planung auch die gleichzeitige, also *parallele* Bearbeitung von Aufträgen. Vereinzelt geschieht dies auch heute schon. In unserem Modell ist es erlaubt, bis zu zwei Aufträge in diesem Sinne miteinander zu verbinden, sogenannte *Auftragsbündel* anzulegen. Mit unserem allgemeinen Auftragsbegriff hieße dies zum Beispiel daß eine Pause des Lokrangierführers eingeplant werden kann *während* eine Lokomotive am Hochofen Bereitschaft hat. Ein anderer „klassischer“ Fall ist das Mitnehmen von Wagen „im Vorbeifahren“. Die Verknüpfung von mehr als zwei Aufträgen erscheint nicht sinnvoll, da dies zu einer unzumutbaren Kompliziertheit für den Lokrangierführer und zu unverhältnismäßig hohem Rangieraufwand führen würde.

### **Zielvorstellungen**

Ein Vorzug der von uns gewählten Modellierung ist die Angabe eines oder mehrerer Optimierungsziele, die mit den Dispositionsentscheidungen verfolgt und bestmöglich erfüllt werden. Die hohen Anforderungen an die Konzentration eines Disponenten und Belastungen durch unvorhergesehene Ereignisse erlauben es bei manueller Planung im allgemeinen nur, mit geringer oder mittlerer Vorausschau zu arbeiten, schlimmstenfalls nach dem Dispatcherprinzip die dringlichsten Aufträge an die nächste freiwerdende Lokomotive zu verteilen. Die Komplexität der gesamten Planungsaufgabe läßt eine globale Sicht der Dinge oftmals nicht zu und führt lediglich zu lokalen Optimierungen. Lokal bedeutet eine räumliche und zeitliche Begrenzung des Betrachtungs- und Verantwortungshorizonts. Als vordringlichste Anforderung an einen systemseitigen Vorschlag zur Lokomotivdisposition wurde allgemein die *Fahrbarkeit* des Vorschlags angesehen. Das bedeutet, daß der Vorschlag alle Vorgaben des Disponenten einhält und mit den verfügbaren Lokomotiven umgesetzt werden kann. Allein der Einsatz eines mathematischen Vorschlagssystems könnte zu einem gleichmäßigeren Betrieb – zumindest bei den Routineaufträgen – beitragen, so daß tendenziell weniger Engpässe zu erwarten wären. Unter dieser Annahme sind mit Industriebahnen verschiedene Zielvorstellungen angesprochen worden.

Es entspricht der momentanen manuellen Disposition, daß Lokomotiven nicht zu früh zur Auftragsbearbeitung geschickt werden, um Wartezeiten zu vermeiden. Außerdem sind sämtliche Leerfahrten als unproduktiv anzusehen und daher so gering wie möglich zu halten. Der vom entwickelten Modell gemachte Vorschlag ist so gehalten, daß unter Berücksichtigung *aller dem System bekannten Daten* die Warte- bzw. Leerfahrtzeiten *minimal* sind. Das bedeutet, daß bezüglich des Zielkriteriums der Minimierung unproduktiver Zeiten nicht besser gefahren werden kann, wenn die Situation unverändert bleibt. Da allerdings laufend neue Aufträge eingehen, könnte immer dann, wenn Lokomotiven ihre Auftragsbearbeitung abgeschlossen haben, ein neuer Vorschlag generiert werden. Dies würde die freie Lokomotive nach dem Wissen zu diesem Zeitpunkt *optimal* einplanen. Selbstverständlich könnte zur Nutzung eines größeren Optimierungspotentials mit der Erzeugung eines Vorschlags

gewartet werden, bis weitere Lokomotiven frei werden, wenn es die betriebliche Situation zuläßt.

Natürlich sollte der Begriff des *Vorschlags* wörtlich genommen werden. Der Disponent wird weiterhin sowohl bezüglich der zu verwendenden Daten (wie Zeiten usw.) als auch bezüglich der Entscheidungen (wie Auftragszuordnungen) „das letzte Wort“ haben. Dies ist nicht nur aus psychologischer Sicht sinnvoll, sondern unverzichtbar in unvorhergesehenen Situationen, die schnelles Handeln erzwingen. Auch wenn dem Disponenten alle nur möglichen Freiheiten bei der Charakterisierung eines Auftrags gegeben werden, sollte er durch (akzeptable!) *automatische Vorgaben* weitest möglich entlastet werden.

### 3 Überblick über das mathematische Modell

Unser Modell – eine Variante des *Pickup and Delivery Problems mit Zeitfenstern* – ist so konzipiert, daß *sämtliche* vom Disponenten (oder wahlweise vom System) gemachten Vorgaben (hinsichtlich festen Zuordnungen, Fertigstellungszeiten o.ä.) berücksichtigt, d.h. eingehalten werden. Erst wenn eine oder mehrere Vorgaben nicht erfüllt werden *können*, wird eine Warnung ausgegeben, gegebenenfalls mit einer Angabe des Grundes. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die Arbeitsschritte *Auftragsbündelung* und *Auftragszuordnung* nicht *nacheinander* durchgeführt werden. Vielmehr geschehen diese beiden Schritte gleichzeitig, so daß kein Optimierungspotential verschenkt wird.

Bei Planungsaufgaben wie der vorliegenden Lokomotiven-Disposition, bei der eine optimale Lösung einige Rechenzeit in Anspruch nehmen kann, wird im allgemeinen nicht beliebig lange auf einen Vorschlag gewartet werden können. Es hat sich daher ein zweistufiges Vorgehen durchgesetzt, das im folgenden kurz beschrieben werden soll. Nachdem sich ein elektronisches Vorschlagssystem im laufenden Betrieb etabliert hat, rückt die bisherige manuelle Disposition in den Hintergrund. Damit dem dann auf den Computer angewiesenen Disponenten auch in Extremsituationen *sofort* ein Vorschlag zur Verfügung steht, generiert man im allgemeinen binnen Sekunden eine Lösung, die eine „nur zufriedenstellende“ oder „nur gute“, aber nicht notwendigerweise „beste“ Qualität hat. Die Qualität ist normalerweise vergleichbar mit der manuellen Disposition. Auf diese Lösung kann stets zurückgegriffen werden. Erlaubt es die betriebliche Situation und kann noch weitere Zeit gewartet werden, bis ein Dispositions-vorschlag benötigt wird, so verbessert das System die bisher bekannte beste Lösung ständig, bis schließlich ein optimaler Vorschlag gefunden wird. So können Wartezeiten zur Verbesserung der Vorschläge genutzt werden, ohne daß dies dem Disponenten sichtbar wird. Er greift zu *jedem Zeitpunkt* auf den bis dato besten berechneten Vorschlag zu, ohne daß dieser besonders angefordert werden müßte. Auf diese Weise läßt sich das Vertrauen in das Vorschlagssystem bzw. dessen Zuverlässigkeit erheblich steigern.

Hier soll vereinfacht dargestellt werden, nach welchen Prinzipien die eingesetzten mathematischen Verfahren arbeiten. Es entspricht mathematischer Vorgehensweise, zunächst genau festzulegen, welche Charakteristika eine für den Disponenten akzeptable Lösung auszeichnen. Prinzipiell könnte man in einer konkreten Situation *sämtliche* mögliche Vorschläge aufschreiben. Da mit einer begrenzten Anzahl von Lokomotiven und einer begrenzten Anzahl von Aufträgen gearbeitet wird, gibt es auch nur eine begrenzte – wenn auch unvorstellbar große – Anzahl möglicher Vorschläge. Theoretisch könnten all diese Vorschläge gemäß den Zielvorstellungen bewertet und der beste Vorschlag akzeptiert werden. Ein solches Vorgehen würde bei heutigen Planungsaufgaben eine unvermittelbar lange Zeit in Anspruch nehmen, so daß Verfahren entwickelt worden, die zwar *im Prinzip* jeden möglichen Vorschlag begutachten, dies jedoch *implizit* auf Basis einer kleinen Auswahl aller Vorschläge. Bei der Bewertung solcher Vorschläge sind mathematische Regeln aufgestellt worden, mit deren Hilfe

ein Großteil von Lösungen gar nicht erst betrachtet werden muß, weil von vornherein feststeht, daß der entsprechende Vorschlag nicht auf eine optimale Lösung führen *kann*. Der entwickelte Software-Prototyp verwendet für die spezielle Problematik der Lokomotiv-Zuordnung einen solchen, aus den Charakteristika einer erlaubten Lösung abgeleiteten Regelsatz. Wir verweisen für Details auf [1].

Wie bereits erwähnt, sollen Aufträge – sofern sinnvoll – bei der Ausführung miteinander verknüpft, *gebündelt*, werden. Bei einem spurgeführten Verkehrsmittel ist jedoch nicht jede beliebige Kombination geeignet, weil eventuell (zu) großer Rangieraufwand im Verhältnis zu dem erzielten Nutzen anfällt. Bei der Erzeugung möglicher Fahrtrouten für Lokomotiven wurden drei *Bündelungstypen* berücksichtigt. Der bisherige Regelfall ist die *Direktfahrt*. Hier findet keine Bündelung des Auftrags mit einem anderen statt, der Auftrag wird in seinem Startgleis begonnen und ohne Unterbrechung in seinem Zielgleis beendet. Eine tatsächliche Bündelung findet dagegen bei den anderen Typen statt. Bei der *einschließenden Bündelung* wird ein Auftrag in seinem Startgleis begonnen und in seinem Zielgleis beendet, jedoch verläuft die Fahrt über Start- und Zielgleis eines weiteren Auftrages, so daß dieser zweite Auftrag „im Vorbeifahren“ erledigt wird. Prinzipiell kommen für eine solche Verknüpfung sämtliche Aufträge in Frage, für die dies nicht ausdrücklich verboten oder durch Nebenbedingungen wie Gewichte, Fertigstellungszeiten oder ähnliches verhindert wird. Ob eine erlaubte Verknüpfung auch sinnvoll ist, richtet sich lediglich nach den genannten Zielvorstellungen, Leerfahrt- und Wartezeiten so kurz wie möglich zu gestalten. Dies wird vom Vorschlagssystem selbständig entschieden gemäß den im mathematischen Modell abgelegten Regeln. Sehr ähnlich ist die Verknüpfung im dritten Fall, der *überlappenden Bündelung*. Hier wird der zuerst begonnene Auftrag auch zuerst beendet, bevor zum Zielgleis des zweiten Auftrags gefahren wird. Diese Variante ist in den meisten Fällen mit erhöhtem Rangieraufwand verbunden, so daß sie weniger in Betracht gezogen werden sollte.

Ein Beispiel soll an dieser Stelle veranschaulichen, welche „Sicht der Dinge“ das mathematische Modell auf die Auftragsverknüpfung hat. Im Modell werden Start- und Zielgleise nicht als tatsächliche örtliche Gegebenheiten, sondern lediglich als *logischer Anfangs-* und *Endpunkt* eines Auftrages gesehen. So muß keine tatsächliche Fahrt stattfinden, um zwei solche Punkte miteinander zu verbinden. Die überlappende Bündelung findet zum Beispiel statt, wenn eine Lokomotive betankt wird (Start Auftrag 1), der Lokrangierführer währenddessen seine Pause beginnt (Start Auftrag 2), das Betanken beendet wird (Ziel Auftrag 1) und anschließend die Pause bis zum Ende durchgeführt wird (Ziel Auftrag 2), sofern diese Verknüpfung nicht verboten ist. Das System verfügt über eine übersichtliche und verwechslungsfreie Ausgabe solcher Auftragsbündel.

## 4 Von der Mathematik in die Praxis

Angewandte Mathematik und auf ihr aufbauende Dispositionssysteme können den erfahrenen Disponenten nicht ersetzen, wohl aber unterstützen und dadurch entlasten. Routinetätigkeiten können dem System überlassen und müssen nur noch stichprobenartig vom Disponenten überprüft werden, der seine Konzentration auf Wesentliches und Besonderheiten lenken kann. Der Anteil der Nicht-Routinetätigkeiten ist bei Werks- und Industriebahnen enorm, könnte aber durch den zu erwartenden *gleichmäßigeren Betrieb* beim Einsatz der vorgestellten Methoden verringert werden. Die Qualität der Lokomotivzuweisung hängt gegenwärtig enorm von Erfahrung und Motivation des Disponenten ab. Dies hat unter anderem zur Konsequenz, daß nach Ausscheiden eines Disponenten aus seiner Tätigkeit eine aufwendige Einarbeitungsphase für unerfahrene Disponenten notwendig wird, die durch den Einsatz des vorgeschlagenen Systems erheblich reduziert werden könnte.

Obwohl die Entwicklung eines mathematischen Modells für ein praktisches Problem sehr um-

fangreich sein kann, ist dessen Anteil an einem marktreifen Produkt beinahe marginal, zumindest was die Sichtbarkeit für den Anwender angeht. Wir wollen an dieser Stelle daher einige Aspekte anfügen, die bei der Umsetzung des entwickelten Modells in Bezug auf die *Akzeptanz* neuer Technologien zu berücksichtigen sind. Sogenannte *Black-Box*-Methoden, die mit nicht allgemein nachvollziehbaren Verfahren, noch dazu von traditionell gewachsener Entscheidungsfindung abweichend Dispositionsvorschläge generieren, stoßen leicht auf Ablehnung. Die Vorschläge einer Software sehen in ihrer Struktur oft erheblich anders als die „gewohnten“ aus. Ein solches System wird besonders kritisch betrachtet und muß sich *behaupten*. Aus diesem Grund sollte auf die Bedürfnisse der Disponenten verstärkt eingegangen, in Schulungen Stärken und Schwächen des neuen Systems ausführlich diskutiert werden. Von weitaus größerer Bedeutung ist allerdings, das die idealistische Weltsicht eines Mathematikers durch die Erfahrungen der Praktiker ergänzt werden muß. Die im täglichen Betrieb verwendeten Daten sind keinesfalls immer so vollständig und konsistent wie in unserem Modell angenommen. Daten können unzuverlässig sein, weil sie nur auf Teilinformationen beruhen und geschätzt sind. Daher müssen gewisse Fehlertoleranzen in das Modell aufgenommen werden, damit dem Disponenten *in jeder Situation* ein Vorschlag gemacht wird, auch wenn es vom mathematischen Standpunkt aus bezüglich der verwendeten Daten überhaupt keinen zulässigen Vorschlag gibt. Eng damit verbunden ist die Tatsache, daß geringfügige Änderungen in den Daten erhebliche Auswirkungen auf den generierten Vorschlag haben können. Das Abwägen zwischen beweisbarer Optimalität und Robustheit der Lösungen sollte daher zugunsten der Zuverlässigkeit des Systems entschieden werden. Es ist darüberhinaus ratsam, dem Disponenten einige veränderbare Parameter des Modells an die Hand zu geben. Durch spielerischen Umgang mit diesen Parametern können oftmals Abläufe simuliert oder identifiziert werden, die weiteres Optimierungspotential freilegen. Es sollte nicht verschwiegen werden, daß eine Vorschlagskomponente selbstverständlich in eine (existierende) graphische Bedieneroberfläche einer Informations- und Dispositionssoftware integriert werden und den höchsten Benutzerkomfort bieten muß, so daß dem softwaretechnologischen Aspekt an einem Gesamtprodukt die größte Bedeutung zukommt.

## 5 Fazit

Selbst wenn eine computergestützte Vorschlagskomponente nicht für sämtliche denkbaren Szenarien eine akzeptable Lösung anbieten wird, so können Disponenten zumindest von Routineaufgaben entlastet werden, um sich ganz auf schwer beherrschbare Situationen konzentrieren zu können. Von einer *gleichbleibenden* und *garantierten* Qualität der Disposition ganz abgesehen, könnten so Dispositionsbereiche für einzelne Disponenten vergrößert werden. Der Disponent erhält mehr Zeit für die Kommunikation mit dem Kunden und den Disponenten der DB AG. Es ist zu hoffen, daß durch einen effizienteren Ressourceneinsatz auf lange Sicht Lokomotiven eingespart werden können, die momentan zur Befriedigung von Bedarfsspitzen vorgehalten werden müssen.

## Literatur

- [1] M.E. Lübbecke. *Engine Scheduling by Column Generation* (Arbeitstitel). Dissertation, Abteilung für Mathematische Optimierung, Technische Universität Braunschweig, 2000. In Vorbereitung.
- [2] M.E. Lübbecke und U.T. Zimmermann. Informationen zum BMBF-Projekt erhältlich unter der URL <http://www.math.tu-bs.de/mo/projects/gup/>, 1997–2000.