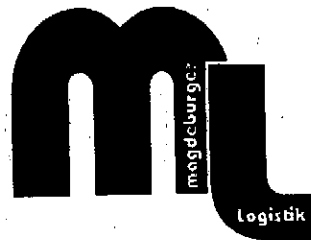


14. Wissenschaftliche Fachtagung

# Sustainable Logistics

Magdeburg, 26. - 27. Februar 2009



Logistik aus technischer und ökonomischer Sicht

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktion und Logistik  
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Management Science

## Optimierung von Leerfahrten im Schienengüterverkehr

Alexandra Saur, Stephan Zelewski, Matthias Klumpp

Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement (PIM)

Universität Duisburg-Essen

### 1 Einleitung

Die Verfasser beschäftigen sich in der vorliegenden Arbeit mit der intelligenten Bündelung von Einzelwagenverkehren für schienengebundene Gütertransporte. Es wird ein quantitatives Entscheidungsmodell entwickelt, mit dessen Hilfe bei Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) eine Reduktion der Leertonnenkilometer aufgezeigt werden kann. Leertonnenkilometer resultieren zum einen aus den zu geringen Transportmengen im *Einzelwagenverkehr*. Bei diesem Verkehr werden einzelne Wagen oder kleine Wagengruppen mit unterschiedlichen Versand- oder Zielorten [10] – und nicht alle Wagen eines Zuges wie im *Ganzzugverkehr* – bis zu ihrer jeweiligen Beladungskapazität gefüllt. Zum anderen entstehen die Leertonnenkilometer durch Leerfahrten vom oder zum Kunden, bei denen die maximale Beladungsmöglichkeit und damit die Kapazität der Wagen nur auf einer Wegstrecke ausgenutzt wird. Eine der Fahrtstrecken fährt die Lokomotive dabei mit leeren Wagen zum oder vom jeweiligen Haltepunkt. Die Leerfahrten gilt es durch eine „intelligente“ Bündelung zu optimieren, d.h. im Hinblick auf die transportierten Gütermengen („Tonnen“) und die gefahrenen Strecken („Kilometer“) so weit wie möglich zu reduzieren. Die Zielsetzung der Leertonnenkilometerreduzierung steht im Einklang mit vielfältigen *umweltpolitischen* Forderungen und Erkenntnissen [2, 4, 5], vor allem auch vor dem Hintergrund der aktuellen Bemühungen um überzeugende Konzepte für „Green Logistics“ [18, 19, 22].

Das Problem der Optimierung von Leerfahrten ist im Hinblick auf die Bündelung von Kundennachfragen und die Zusammenstellung von Touren der EVU innerhalb der betriebswirtschaftlichen Tourenplanung anzusiedeln. In der einschlägigen Fachliteratur – vor allem auf dem Gebiet des Operations Research – existieren Modelle zum Beispiel von FALKENSAMMER, von BORNDÖRFER sowie von PANKRATZ aus dem Bereich der Tourenplanung für EVU als State of the Art zur Annäherung an eine Lösung des vorliegenden *Realproblems*, die Reduzierung der Leertonnenkilometer [1, 7, 23]<sup>1</sup>. Jedoch existiert bisher noch kein Modell, das die Problematik der Leertonnenkilometerreduzierung im speziellen Kontext der Bündelung von Einzelwagenverkehren mehrerer miteinander kooperierender EVU behandelt hat. Konventionelle Tourenplanungsmodelle des Operations Research scheitern bereits daran, dass in ihnen im Allgemeinen eine Tour für ein „atomares“ mobiles Objekt – z.B. einen Lkw, einen „Hand-

<sup>1</sup> Siehe als Grundlagenüberblick auch: [3]; bzw. für einen Literaturüberblick: [9].

lungsreisenden“ oder im Falle des Schienengüterverkehrs einen Ganzzug – geplant wird<sup>2</sup>. Bei Einzelwagenverkehren stellt sich hingegen ein wesentlich komplexeres Optimierungsproblem, weil eine Traktionseinheit – die Lokomotive – mit einer variablen Anzahl von Güterwagen unter der Beachtung einer Vielzahl von Restriktionen kombiniert werden muss. Zu diesen Restriktionen zählen beispielsweise die maximal zulässige Güterzuglänge, die zurzeit experimentell auf 1.000 m erhöht wird, die zulässigen Gesamtgewichte der einzelnen eingesetzten Güterwagen sowie die maximale Traktionskraft der jeweils eingesetzten Lokomotiven. Erschwerend kommt beispielsweise hinzu, dass ein einzelnes EVU über verschiedenartige Lokomotiven verfügen kann. In der Praxis kommt es vor, dass nicht alle Transportstrecken von jedem Lokomotivtyp befahren werden können („Elektrifizierung“). Im hier betrachteten Realproblem kooperieren mehrere EVU miteinander, um in der Lage zu sein aus Einzelwagenverkehren einzelner EVU mit nur unwirtschaftlich zu erfüllenden Transportvolumina Ganzzüge gemeinsam zusammenzustellen, die sich wirtschaftlich betreiben lassen. Die zuvor – nur exemplarisch angerissenen – Einflussgrößen, die es bei einer „intelligenten“ Bündelung von Einzelwagenverkehren zu berücksichtigen gilt, übersteigen die Komplexität von konventionellen Modellen des Operations Research für die Tourenplanung – auch im Rahmen des Schienengüterverkehrs – deutlich. Sie erfordern eine neuartige, auf das Realproblem der Leertonnenkilometerreduzierung bei Einzelwagenverkehren in EVU-Kooperationen zugeschnittene Modellstruktur. Die Grundzüge einer solchen Modellstruktur werden im hier vorgelegten Beitrag erläutert.

Das Optimierungsmodell wird im Rahmen des Verbundprojektes MAEKAS, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), entwickelt, getestet und in Abhängigkeit von den Testergebnissen auch implementiert: Drei regionale EVU aus dem Ruhrgebiet und ein international aufgestelltes EVU mit Sitz der Muttergesellschaft in der Schweiz als überregionaler Partner haben sich in einem Verbund als ein „Virtuelles Unternehmen der zweiten Generation“ zusammengeschlossen, um mit Hilfe dieser Kooperation ihre Wettbewerbsfähigkeit am Markt für schienengebundene Gütertransporte nachhaltig zu stärken. Die Zielgruppe des Verbundprojektes bilden vor allem kleine und mittelgroße Unternehmen, die noch über passive Gleisanschlüsse verfügen, derzeit ihre Transporte aber über die Straße abwickeln. Zudem fokussiert sich das Projekt auf Unternehmen, die bereits einen Teil ihrer Transporte mit der Bahn abwickeln und in Betracht ziehen, ihre Bahntransporte auszuweiten [26].

Aus der Kooperation im Verbundprojekt ergeben sich neben zahlreichen wirtschaftlichen Vorteilen, wie der Reduzierung der Leertonnenkilometer, auch positive *ökologische Aspekte*. Dazu gehören insbesondere eine Verringerung der durch die Transporte verursachten CO<sub>2</sub>-

und NO<sub>x</sub>-Schadstoffemissionen sowie des Energieverzehrs. Diese Reduzierungseffekte sind im Rahmen sowohl aktueller als auch in Zukunft an Bedeutung gewinnender, umweltorientierter Logistikkonzepte („Sustainability“, „Green Logistics“) insbesondere für den Schienengüterverkehr wichtig, da hier häufig Kapazitätsrestriktionen, die sich zumindest kurzfristig nicht überwinden lassen, eine weitere Verkehrsverlagerung ohne die vorgenannten Reduzierungseffekte verhindern würden [15]. Somit wird neben der Effizienzsteigerung bei *bestehenden* Schienentransporten im Rahmen einer „Second-round-Betrachtung“ sogar die Möglichkeit eröffnet, *zusätzliche* Güterverkehre von der Straße auf die Schiene zu verlagern und damit Schadstoffemissionen sowie Energieverzehr weiter zu verringern. Das Optimierungsmodell, das in diesem Beitrag skizziert wird, kann daher in Richtung *intermodaler* Verkehre erweitert werden, um dort z.B. die gesamte Menge von Schadstoffemissionen bzw. den gesamten Energieverzehr mehrerer Verkehrsträger gemeinsam zu erfassen und „kombiniert“ zu reduzieren [12].

## 2 Modellierung

### 2.1 Überblick über die allgemeine Modellstruktur

Das Ziel der Tourenplanung hängt vom Zweck der Planung ab [25]. Typische Ziele der Tourenplanung sind die Minimierung der Transportkosten, die Minimierung der gesamten Transportstrecke oder -zeit, die Minimierung der Anzahl eingesetzter Fahrzeuge sowie die Minimierung der gesamten Flottengröße. Die Reduzierung von *Leertonnenkilometern* in Einzelwagenverkehren, wie sie im hier vorgestellten Optimierungsmodell aus der kombinierten Perspektive von Wirtschaftlichkeits- und Umweltorientierung verfolgt wird, findet sich in der einschlägigen Fachliteratur wegen ihrer traditionellen Fokussierung auf reine Kosten- oder Zeitaspekte nur äußerst selten. Darüber hinaus muss bei der Lösung eines Tourenplanungsproblems durch Erstellung eines Tourenplans eine Vielzahl von Restriktionen beachtet werden [25]. Auf die besonderen Restriktionen, die es im Rahmen von Einzelwagenverkehren zu beachten gilt, wurde bereits einleitend eingegangen. Sie werden in konventionellen Modellen des Operations Research für Tourenplanungsprobleme nicht berücksichtigt.

Das Standardproblem der Tourenplanung, das unter dem Begriff Vehicle Routing Problem (VRP) zusammengefasst wird, stellt ein Eindepot-Tourenplanungsproblem dar [20]. Bei ihm ist nur ein Fahrzeug – wie z.B. ein einzelner Lkw – vorgesehen, das von einem Depot aus alle Transporte zu und von Kunden durchführt. Diese VRP-Struktur wird dem Realproblem des Verbundprojektes MAEKAS in keiner Weise gerecht, weil jedes der kooperierenden EVU über mindestens ein eigenes Depot für seine Lokomotiven und Güterwagen verfügt. Daher muss auf eine Erweiterung des Tourenplanungsproblems zurückgegriffen werden, die als Mehrdepot-Tourenplanungsproblem oder Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)

<sup>2</sup> Als Beispiele für Modellierungen im Schienenverkehr siehe u.a. [11, 16, 17], jedoch ohne Betrachtung von Einzelwagenverkehren und Leertonnenkilometern.

bekannt ist [6]. In dieser Verallgemeinerung des Standardproblems der Tourenplanung bedient eine Flotte von Fahrzeugen – hier: von Lokomotiven und Güterwagen [26] – die Kunden nicht mehr nur von einem Depot, sondern von mehreren Depots aus, die jeweils einem EVU zugeordnet sind.

## 2.2 Leerfahrten

Für den Begriff „Leerfahrt“ gibt es in der Fachliteratur zum Schienengüterverkehr keine allgemein akzeptierte Begriffsdefinition. Deshalb ist es vor der Reduzierung von Leerfahrten bei EVU wichtig, eine Arbeitsdefinition für eine Leerfahrt festzulegen. Leerfahrten lassen sich grundsätzlich in vier verschieden eng oder weit gefasste Verständnisse definieren.

Eine Leerfahrt *im engsten Sinne* liegt vor, wenn eine Lokomotive ohne Güterwagen verkehrt. Dieser seltene Fall einer sogenannten „Lokzug-Fahrt“ kann z.B. eintreten, wenn Güterwagen zunächst bei Kunden auf deren Werksgeländen beladen werden, bevor die beladenen Güterwagen von einem EVU mit seiner Lokomotive abgeholt werden. Eine Leerfahrt *im engeren Sinne* findet statt, falls eine Lokomotive mit Güterwagen verkehrt, aber diese Güterwagen vollkommen unbeladen sind. Solche Leerfahrten erfolgen, wenn die Lokomotive eines EVU mit leeren Güterwagen vom Depot des EVU zu einem Kunden fährt, um auf dem Werksgelände des Kunden die Güterwagen beladen zu lassen. Von einer Leerfahrt *im weiteren Sinne* wird gesprochen, wenn die gewichts- oder volumenbezogen definierten Ladungskapazitäten der Güterwagen eines Güterzugs durch die tatsächlich transportierten Ladungsgewichte bzw. Ladungsvolumina nicht vollständig ausgeschöpft werden, sodass ein Teil der Güterwagen „leer bleibt“. Schließlich liegt eine Leerfahrt *im weitesten Sinne* vor, falls die Güterwagen eines Güterzugs die Traktionskraft der jeweils eingesetzten Lokomotive oder die maximal zulässige Güterzuglänge nicht vollständig ausnutzen. Dieser Fall tritt ein, wenn die tatsächlich transportierten Ladungsgewichte aller Güterwagen eines Güterzugs zuzüglich ihrer Eigengewichte im unbeladenen Zustand das maximal zulässige Gesamtgewicht übersteigt, für dessen Fortbewegung („Traktion“) eine Lokomotive ausgelegt ist, oder wenn die Summe der Längen „über Puffer“ aller Güterwagen eines Güterzugs so klein ist, dass im Hinblick auf die maximal zulässige Güterzuglänge von z.B. 1.000 m mindestens ein weiterer Güterwagen dem betroffenen Güterzug hinzugefügt werden könnte.

In der betrieblichen Praxis werden, wie ausführliche Interviews mit den Kooperationspartnern des Verbundprojektes MAEKAS unterstreichen, Leerfahrten in der Regel nur im engsten Sinne, zuweilen auch im engeren Sinne berücksichtigt. Leerfahrten im weiteren oder sogar im weitesten Sinne werden von den EVU dagegen überhaupt nicht erfasst. Folglich fehlt den EVU grundsätzlich ein Einblick in das Potenzial derjenigen Transportmengen („Tonnen“) und Transportstrecken („Kilometer“), die von Güterzügen auf ihren Touren durch die Reduzierung von Leertonnenkilometern zusätzlich bewältigt werden könnten. Dazu kommt einerseits die

Reduzierung von Leerfahrten im weiteren Sinne in Betracht, indem die Ladungskapazitäten bereits vorgesehener Güterwagen in größerem Umfang ausgenutzt werden. Andererseits ist es ebenso möglich, durch die Reduzierung von Leerfahrten im weitesten Sinne zusätzliche Güterwagen in die bereits vorgesehenen Güterzüge aufzunehmen. Um diese zwei zusätzlichen Reduzierungspotenziale für Leertonnenkilometer zu identifizieren, die bislang weder in der betrieblichen Praxis noch in üblichen Modellen des Operations Research für Tourenplanungsprobleme berücksichtigt wurden, werden im Verbundprojekt MAEKAS spezielle Modellvarianten vom MDVRP-Typ entwickelt, die darauf zugeschnitten sind, Einsparungspotenziale für Leertonnenkilometer im Rahmen von Leerfahrten im weiteren und weitesten Sinne aufzudecken. Im hier vorgelegten Beitrag wird nur auf den Fall der Leerfahrten im weiteren Sinne eingegangen. Dem noch komplexeren Fall von Leerfahrten im weitesten Sinne werden sich spätere Publikationen widmen.

Fahrende Lokomotiven und angekoppelte Güterwagen sind Inventar der EVU, das gegenwärtig für Transportaufträge auf den Schienen verwendet wird. Es steht also nicht ungenutzt im Depot, sondern ist in Betrieb. Das „stehende“ Inventar erstreckt sich dagegen auf die ungenutzte Kapazität des Fuhrparks, die eigentlich für Gütertransporte verwendet werden könnte. Diese Nichtnutzung vorhandener Transportpotenziale ist ineffizient und sollte, wenn möglich, vermieden werden. Für die Reduzierung der Leerfahrten und – vor allem – der damit verbundenen Leertonnenkilometer mittels einer intelligenten Bündelung von Einzelwagenverkehren wird im Folgenden nur auf das fahrende Inventar eingegangen. Auch in der Fachliteratur wird überwiegend nur auf fahrende Lokomotiven und angekoppelte Güterwagen eingegangen [13].

Durch die Kooperation mehrerer EVU können beispielsweise die nicht genutzten Kapazitäten eines EVU den übrigen Partnern angeboten werden. Voraussetzung ist, dass die verfügbaren Güterwagen und Lokomotiven für den jeweiligen Transportauftrag aufgrund ihrer Beschaffenheit geeignet sind. Den EVU wird dadurch die Möglichkeit geschaffen, Aufträge und potenzielle Kunden anzunehmen, die ansonsten in kapazitätsknappen Situationen von einem einzelnen EVU hätten abgelehnt werden müssen. Im Ergebnis handelt es sich also um eine „Win-Win-Situation“, da sowohl das EVU, welches sein Inventar zur Verfügung stellt, als auch das EVU, welches die freie Kapazität seines Kooperationspartners nutzen darf, Vorteile aus der Übereinkunft erzielen. Zum einen kann das erste EVU seine ansonsten nicht genutzte Kapazität höher auslasten, was ihm zusätzliche Deckungsbeiträge aus „Ausgleichszahlungen“ oder „Gutschriften“ seines Kooperationspartners verschafft. Zum anderen kann das zweite EVU die ansonsten abgelehnten Transportaufträge doch entgegennehmen und – nach Abzug der vorgenannten „Ausgleichszahlungen“ oder „Gutschriften“ – entsprechende Deckungsbeiträge generieren.

Durch diese Form des Austauschs an Fuhrpark-Inventar werden sowohl das Vertrauen zwischen den Kooperationspartnern als auch ihr kooperatives Denken gestärkt und gefestigt.

Darüber hinaus führt der Austausch des Fuhrpark-Inventars auch zu einem Anstieg der Deckungsbeiträge und gleichzeitig zu einer Steigerung der Effizienz der Transportdurchführung. Beides entspricht dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit und letztlich auch die Wettbewerbsfähigkeit der kooperierenden EVU nachhaltig zu stärken.

### 2.3 Modellstruktur

#### 2.3.1 Transportnetzwerk

Ein Transportnetzwerk  $TN = (KN, KA)$  besteht einerseits aus der Knotenmenge  $KN = \{HP_n | n = 1, \dots, N\}$  mit  $HP_n$  als einem Haltepunkt für Güterzüge sowie mit  $N \in \mathbb{N}_+$  und  $N \geq 2$  für die Anzahl  $N$  aller Haltepunkte im Transportnetzwerk. Andererseits umfasst die Kantenmenge  $KA = \{s_{i,j} | i \in \{1, \dots, N\} \wedge j \in \{1, \dots, N\}\}$  mit  $KA \subseteq (KN \times KN \setminus id)$  sämtliche Eisenbahntrassen, die als Verbindungsstrecken  $s_{i,j}$  jeweils zwei Haltepunkte  $HP_i$  und  $HP_j$  im Transportnetzwerk unmittelbar miteinander verknüpfen. Die Länge  $sl_{i,j}$  jeder Verbindungsstrecke  $s_{i,j}$  kann einer Verbindungsmatrix  $VM$  entnommen werden.

#### 2.3.2 Kapazitätsangebot

Das Kapazitätsangebot im Transportnetzwerk wird durch diejenigen Fuhrpark-Ressourcen determiniert, über die ein  $EVU_e$  in seinem Depot  $DEP_e$  im Haltepunkt  $HP_m$  verfügt:

Lokomotiven:

- $A$ : Anzahl der Lokomotivtypen  $LT_a$  mit  $a = 1, \dots, A$  (exemplarisch für  $EVU_1$ :  $A = 2$ )
- $zk_{lok,a}$ : Zugkraft einer Lokomotive vom Typ  $LT_a$  in [to]
- $gl_{lok,a}$ : Gesamtgewicht der Lokomotive vom Typ  $LT_a$  in [kg]
- $anz_{lok,a,e}$ : Anzahl der Lokomotiven vom Typ  $LT_a$ , über die das  $EVU_e$  im Depot  $DEP_e$  verfügt

Güterwagen:

- $C$ : Anzahl der Güterwagentypen  $WT_c$  mit  $c = 1, \dots, C$  (exemplarisch:  $C = 2$ )
- $lk_{wag,c}$ : Ladungskapazität eines Güterwagens vom Typ  $WT_c$  in [to].
- $gb_{wag,c}$ : Gesamtgewicht eines Güterwagens vom Typ  $WT_c$  bei voller Beladung in [to].
- $anz_{wag,c,e}$ : Anzahl der Güterwagen vom Typ  $WT_c$ , über die das  $EVU_e$  im Depot  $DEP_e$  verfügt

#### 2.3.3 Kapazitätsnachfrage

Die Kapazitätsnachfrage wird durch die Transportnachfragen potenzieller Kunden determiniert, die in den Knoten des Transportnetzwerks über Gleisanschlüsse verfügen. Jede Transportnachfrage beinhaltet einen Start- und einen Endhaltepunkt. Darüber hinaus wird unterschieden zwischen der Gütermenge, die im Starthaltepunkt  $HP_i$  aufgenommen werden muss (Güterbeladungsmenge  $gmb_{wag,c,i}$ ), und der Gütermenge, die im zugehörigen Endhaltepunkt  $HP_j$  abgeliefert werden muss (Güterentladungsmenge  $gme_{wag,c,i,j}$ ). Die Transportgewichte im Start- und Endhaltepunkt müssen immer gleich groß sein. Formal lässt sich diese Integritätsbedingung darstellen als:

$$\forall c \in \{1, \dots, C\} \forall i \in \{1, \dots, N\} \forall j \in \{1, \dots, N\}: \quad (1)$$

$$(gmb_{wag,c,i} > 0 \wedge gme_{wag,c,i,j} > 0) \rightarrow gmb_{wag,c,i} = gme_{wag,c,i,j}$$

#### 2.3.4 Touren

Die Tourenmenge  $TM_e$  eines  $EVU_e$  ist die Menge aller Touren  $T_{e,q}$ , die von einem Depot des  $EVU_e$  mit  $e = 1, \dots, E$  aus durchgeführt werden können (potenzielle Touren). Dabei bezeichnet  $E$  mit  $E \in \mathbb{N}_+$  die Anzahl aller  $EVU$ , die in einem Transportnetzwerk miteinander kooperieren (im Verbundprojekt MAEKAS gilt:  $E = 4$ ). Für die Touren  $T_{e,q}$  mit  $q = 1, \dots, Q_e$  eines  $EVU_e$  ist die Anzahl  $Q_e$  aller Touren maßgeblich, die mit dem Fuhrpark des  $EVU_e$  grundsätzlich realisiert werden können ( $Q_e \in \mathbb{N}_+$ ). Im hier vorgestellten Tourenplanungsmodell wird vereinfachend angenommen, dass diese Anzahl  $Q_e$  der Anzahl aller Lokomotiven entspricht, über die das  $EVU_e$  verfügt. Diese Prämisse lässt sich derart interpretieren, dass alle Lokomotiven des  $EVU_e$  im relevanten Planungszeitraum einsatzbereit sind und jede Lokomotive höchstens einmal eingesetzt wird, um im relevanten Planungszeitraum auf einer Tour einen Güterzug „anzuführen“.

#### 2.3.5 Entscheidungsvariablen

Die *tourpositionsbezogenen* Entscheidungsvariablen  $x_{e,q,p,n}$  geben jeweils an, ob sich an der  $p$ -ten Position der Tour  $T_{e,q}$  mit  $p = 1, \dots, N+1$  der Haltepunkt  $HP_n$  aus dem zugrunde liegenden Transportnetzwerk  $TN$  befindet oder nicht:

$$x_{e,q,p,n} = \begin{cases} 1, & \text{wenn an der Position } p \text{ der Tour } T_{e,q} \\ & \text{der Haltepunkt } HP_n \text{ vorhanden ist} \\ 0, & \text{wenn an der Position } p \text{ der Tour } T_{e,q} \\ & \text{der Haltepunkt } HP_n \text{ nicht vorhanden ist} \end{cases} \quad (2)$$

Die *lokomotivenbezogenen* Entscheidungsvariablen  $y_{lok,a,e,q}$  stehen für die Zuordnung von Lokomotiven des Typs  $LT_a$  zu Touren  $T_{e,q}$  eines  $EVU_e$ :

$$y_{lok.a.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn eine Lokomotive des Typs } LT_a \text{ der Tour } T_{e,q} \\ & \text{für das EVU}_e \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{wenn keine Lokomotive des Typs } LT_a \text{ der Tour } T_{e,q} \\ & \text{für das EVU}_e \text{ zugeordnet wird} \end{cases} \quad (3)$$

Die *güterwagenbezogenen* Entscheidungsvariablen  $y_{wag.c.e,q}$  erfassen die Zuordnung von Güterwagen des Typs  $WT_c$  zu Touren  $T_{e,q}$  eines EVU<sub>e</sub>:

$$y_{wag.c.e,q} = \begin{cases} w, & \text{wenn } w \text{ Güterwagen des Typs } WT_c \text{ mit } w \in \mathbb{N}_+ \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ für das EVU}_e \text{ zugeordnet werden} \\ 0, & \text{wenn kein Güterwagen des Typs } WT_c \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ für das EVU}_e \text{ zugeordnet wird} \end{cases} \quad (4)$$

Darüber hinaus sind *haltepunktbezogene* Entscheidungsvariablen  $z_{wag.c.i.e,q}$  und  $zz_{wag.c.i.j.e,q}$  erforderlich, um das Be- bzw. Entladen von Güterwagen an den Haltepunkten einer Tour  $T_{e,q}$  auszudrücken:

$$z_{wag.c.i.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn im Haltepunkt } HP_i \text{ der Tour } T_{e,q} \text{ Güterwagen des Typs } WT_c \\ & \text{mit einer Gütermenge } gmb_{wag.c,i} \text{ beladen werden} \\ 0, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (5)$$

$$zz_{wag.c.i.j.e,q} = \begin{cases} 1, & \text{wenn im Haltepunkt } HP_j \text{ aus Güterwagen des Typs } WT_c \text{ diejenige} \\ & \text{Gütermenge } gmc_{wag.c,i,j} \text{ entladen wird, mit welcher der Güterzug} \\ & \text{der Tour } T_{e,q} \text{ im Haltepunkt } HP_i \text{ beladen wurde} \\ 0, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (6)$$

In der hier präsentierten Modellvariante ist es also nur möglich, einen Güterzug auf einer Tour  $T_{e,q}$  mit einer „unteilbaren“ Gütermenge an einem Haltepunkt  $HP_i$  zu beladen, die in derselben Quantität an einem eindeutig zugeordneten Haltepunkt  $HP_j$  zu entladen ist. Die darüber hinaus gehende Option, eine Gütermenge, mit der ein Güterzug am Haltepunkt  $HP_i$  beladen wurde, an mehreren Haltepunkten „gesplittet“ zu entladen, bleibt später zu entwickelnden Modellvarianten vorbehalten.

### 2.3.6 Restriktionen

(R1) Die Anzahl  $anz_{lok.a.e}$  der Lokomotiven vom Typ  $a$  und die Anzahl  $anz_{wag.c.e}$  der Güterwagen vom Typ  $c$ , die einem EVU<sub>e</sub> für die Durchführung seiner Touren  $T_{e,q}$  als Fuhrpark grundsätzlich zur Verfügung stehen, werden durch die Anzahlen  $y_{lok.a.e,q}$  und  $y_{wag.c.e,q}$  der auf den Touren  $T_{e,q}$  tatsächlich eingesetzten Lokomotiven bzw. Güterwagen nicht überschritten:

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall a \in \{1, \dots, A\}: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{lok.a.e,q} \leq anz_{lok.a.e} \quad (7)$$

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall c \in \{1, \dots, C\}: \sum_{q=1}^{Q_e} y_{wag.c.e,q} \leq anz_{wag.c.e} \quad (8)$$

(R2) Mit den folgenden Integritätsbedingungen wird sichergestellt, dass alle Gütermengen entsprechend den Transportnachfragen in den Haltepunkten einer jeden Tour  $T_{e,q}$  korrekt be- und auch wieder entladen werden. Wenn Güterwagen vom Typ  $WT_{wag,c}$  eines Güterzugs, der die Tour  $T_{e,q}$  durchführt, am Haltepunkt  $HP_i$  mit der Gütermenge  $gmb_{wag,c,i}$  beladen werden, muss das aktuelle Ladungsgewicht  $lg_{wag.c.e,q,p}$  der betroffenen Güterwagen vom Typ  $WT_{wag,c}$  dieses Güterzugs an derjenigen Position  $p$  der Tour  $T_{e,q}$  um die Gütermenge  $gmb_{wag,c,i}$  erhöht werden, an der sich der Starthaltepunkt  $HP_i$  für die zu transportierende Gütermenge  $gmb_{wag,c,i}$  bei der Durchführung der Tour  $T_{e,q}$  befindet. Diese Position  $p$  ist durch die Gleichung  $i \bullet x_{e,q,p,i} = i$  festgelegt, weil die tourpositionsbezogenen Entscheidungsvariablen  $x_{e,q,p,i}$  nur für genau eine Position  $p$  der Tour  $T_{e,q}$  am Haltepunkt  $HP_i$  den Wert  $x_{e,q,p,i} = 1$  annehmen und dadurch die Gleichung  $i \bullet 1 = i$  erfüllen. Darüber hinaus muss das aktuelle Ladungsgewicht  $lg_{wag.c.e,q,p}$  der betroffenen Güterwagen vom Typ  $WT_{wag,c}$  des Güterzugs der Tour  $T_{e,q}$  in derjenigen Position  $p'$  der Tour  $T_{e,q}$ , an der sich bei der Durchführung der Tour  $T_{e,q}$  der Endhaltepunkt  $HP_j$  für die zu transportierende Gütermenge  $gmb_{wag,c,i}$  mit  $gmb_{wag,c,i} = gmc_{wag,c,i,j}$  befindet, um die Gütermenge  $gmc_{wag,c,i,j}$  verringert werden. Unter diesen Voraussetzungen lassen sich die Ladungsgewichte  $lg_{wag.c.e,q,p}$  aller Güterwagen der Typen  $WT_{wag,c}$  an jeder Position  $p$  einer Tour  $T_{e,q}$  unter Beachtung aller Entscheidungen hinsichtlich des Be- und Entladens desjenigen Güterzugs, der die Tour  $T_{e,q}$  durchführt, wie folgt erfassen (Be- und Entladungsrestriktionen):

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall q \in \{1, \dots, Q_e\} \forall c \in \{1, \dots, C\}: lg_{wag.c.e,q,0} = 0 \quad (9)$$

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall q \in \{1, \dots, Q_e\} \forall c \in \{1, \dots, C\} \forall p \in \{1, \dots, N+1\}: \\ lg_{wag.c.e,q,p} = lg_{wag.c.e,q,p-1} + \left( \sum_{n=1}^N x_{e,q,p,n} \left[ z_{wag.c.e,q} \square gmb_{wag,c,n} - \left( \sum_{i=1}^N zz_{wag.c.i.n,e,q} \square gmc_{wag,c,i,n} \right) \right] \right) \quad (10)$$

(R3) Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass aus den Güterwagen des Typs  $WT_{wag,c}$ , die am Starthaltepunkt  $HP_i$  mit der Gütermenge  $gmb_{wag,c,i}$  beladen wurden (nicht beladen wurden), die Gütermenge  $gmc_{wag,c,i,j}$  mit  $gmc_{wag,c,i,j} = gmb_{wag,c,i}$  an genau einem zugehörigen Endhaltepunkt  $HP_j$  wieder entladen wird (nicht entladen wird):

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall q \in \{1, \dots, Q_e\} \forall c \in \{1, \dots, C\} \forall i \in \{1, \dots, N\} \forall j \in \{1, \dots, N\}: \\ z_{wag.c.i.e,q} - zz_{wag.c.i.j.e,q} = 0 \quad (11)$$

(R4) Weiterhin muss sichergestellt sein, dass die Ladungsgewichte  $lg_{wag.c.e,q,p}$  die Ladungskapazität  $lk_{wag,c}$  des betroffenen Güterwagentyps  $WT_{wag,c}$  unter Berücksichtigung der Anzahl

$y_{wag,c,e,q}$  der auf einer Tour  $T_{e,q}$  tatsächlich eingesetzten Güterwagen niemals überschreiten (Kapazitätsrestriktionen):

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall q \in \{1, \dots, Q_e\} \forall c \in \{1, \dots, C\} \forall p \in \{1, \dots, N+1\}: \quad (12)$$

$$lg_{wag,c,e,q,p} \leq y_{wag,c,e,q} \cdot lk_{wag,c}$$

(R5) Für jede Position  $p$  einer geplanten Tour  $T_{e,q}$  muss gewährleistet sein, dass die Zugkraft  $zk_{lok,a}$  („Traktion“) der eingesetzten Lokomotive des Typs  $LT_a$  für die angekoppelten Güterwagen unter Berücksichtigung ihrer Eigengewichte (zulässige Gesamtgewichte  $lg_{wag,c}$  abzüglich der Ladungskapazitäten  $lk_{wag,c}$ ) und ihrer aktuellen Ladungsgewichte  $lg_{wag,c,e,q,p}$  in der jeweils betrachteten Tourposition  $p$  ausreicht:

$$\forall e \in \{1, \dots, E\} \forall q \in \{1, \dots, Q_e\} \forall p \in \{1, \dots, N+1\}: \quad (13)$$

$$\left( \sum_{c=1}^C y_{wag,c,e,q} \cdot g(g_{wag,c} - lk_{wag,c}) + lg_{wag,c,e,q,p} \right) \leq \left( \sum_{a=1}^A y_{lok,a,e,q} \cdot gzk_{lok,a} \right)$$

### 2.3.7 Zielfunktion

Es wird hier nur der Fall betrachtet, dass die *Leerfahrten im weiteren Sinne* aller EVU „optimiert“ werden sollen, die – wie z.B. im Verbundprojekt MAEKAS in der Gestalt eines Virtuellen Unternehmens der zweiten Generation – miteinander kooperieren. Dazu muss die Zielfunktion für das Formalziel spezifiziert werden, die Leertonnenkilometer LTKG zu minimieren, die bei allen geplanten Touren  $T_{e,q}$  für alle kooperierenden EVU<sub>e</sub> anfallen. Für dieses Formalziel gilt:

$$LTKG = \sum_{e=1}^E \sum_{q=1}^{Q_e} LTK_{e,q} \rightarrow \min! \quad (14)$$

mit den Leertonnenkilometern  $LTK_{e,q}$  einer Tour  $T_{e,q}$ :

$$LTK_{e,q} = \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{e,q,p,i} \cdot x_{e,q,p+1,j} \cdot sl_{i,j} \cdot \underbrace{LT_{e,q,p}}_{\substack{\text{„Leertonnen“ auf dem } p\text{-ten Tourabschnitt} \\ \text{zwischen den Haltepunkten} \\ \text{HP}_i \text{ und HP}_j \text{ in [to]}}} \quad (15)$$

Länge des  $p$ -ten Tourabschnitts zwischen den Haltepunkten  $HP_i$  und  $HP_j$  in [km]

mit:

$$LT_{e,q,p} = \left( \sum_{c=1}^C y_{wag,c,e,q} \cdot lk_{wag,c} - lg_{wag,c,e,q,p} \right)$$

nicht genutzte Ladungskapazität des Güterzugs („Leertonnen“) auf dem  $p$ -ten Tourabschnitt zwischen den Haltepunkten  $HP_i$  und  $HP_j$  in [to]

## 3 Optimierung mit realen Transportdaten

### 3.1 Ausgangssituation

Für eine Modellierung auf der Basis von realen Betriebsdaten<sup>3</sup> werden ein Netzwerk und Transportaufträge wie folgt verwendet:

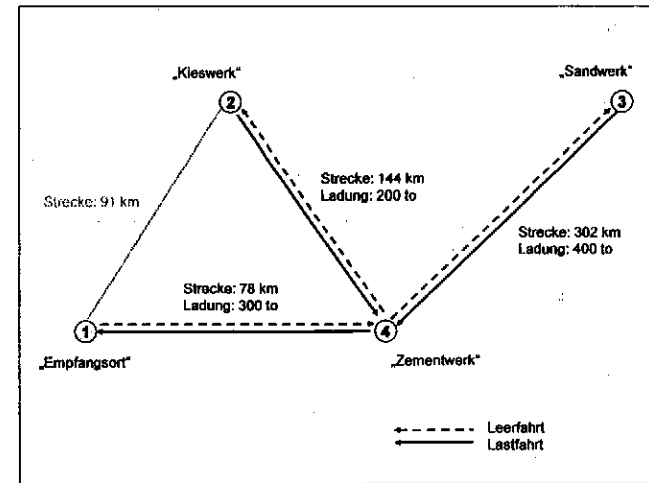


Abbildung 1: Schienennetzwerk und Transportproblematik

Bei einer Zementproduktion werden Kies vom Haltepunkt  $HP_2$  (200 Tonnen) und Sand vom Haltepunkt  $HP_3$  (400 Tonnen) benötigt sowie der fertige Zement aus dem Zementwerk im Haltepunkt  $HP_4$  (300 Tonnen) zum Empfangsort (Haltepunkt  $HP_1$ ) transportiert. Es stehen die in der vorstehenden Abbildung benannten Strecken als *Schienentransportnetz* zwischen den vorgenannten Haltepunkten zur Verfügung. Der Übersichtlichkeit halber werden im Folgenden die Haltepunkte  $HP_n$  nur noch mit ihrem kennzeichnenden Index „n“ angesprochen, also z.B. als „Haltepunkt 4“ anstatt als Haltepunkt  $HP_4$ . Daraus ergeben sich die nachfolgende Entfernungsmatrix sowie die Angaben der drei Transportaufträge für die spezifischen Beladungsmengen ( $gmb_{wag,c,i}$ ) und Entlademengen ( $gme_{wag,c,i}$ ). In den spezifischen Beladungs- und Entladungsmatrizen sind die Tonnagen für die Ausführung der drei notwendigen Transportaufträge enthalten. Dies zeigt beispielweise, dass für Auftrag 1 in Haltepunkt 2 genau 200 Tonnen aufzunehmen und in Haltepunkt 4 zu entladen sind.

<sup>3</sup> Die realen Betriebsdaten wurden aus Geheimhaltungsgründen durch einen unbekanntem Faktor verändert. Die Gesamtstruktur der Transportproblemstellung ist jedoch vollständig erhalten geblieben.

Tabelle 1: Entfernungsmatrix des Praxisbeispiels

Strecke (km)	Haltepunkt 1	Haltepunkt 2	Haltepunkt 3	Haltepunkt 4
Haltepunkt 1	0	91	380	78
Haltepunkt 2	91	0	446	144
Haltepunkt 3	380	446	0	302
Haltepunkt 4	78	144	302	0

Tabelle 2: Beladungsmatrix

Beladung (to)	Haltepunkt 1	Haltepunkt 2	Haltepunkt 3	Haltepunkt 4
Auftrag 1	0	200	0	0
Auftrag 2	0	0	400	0
Auftrag 3	0	0	0	300

Tabelle 3: Entladungsmatrix

Entladung (to)	Haltepunkt 1	Haltepunkt 2	Haltepunkt 3	Haltepunkt 4
Auftrag 1	0	0	0	200
Auftrag 2	0	0	0	400
Auftrag 3	300	0	0	0

Es wird davon ausgegangen, dass die Aufträge 1 und 2 durch ein Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU<sub>1</sub>) durchgeführt werden und der Auftrag 3 durch ein weiteres Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU<sub>2</sub>). Dadurch werden drei Touren mit je einem der Aufträge durch die Lokomotiven der beiden beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen durchgeführt.

### 3.2 Modellierung der Ausgangssituation

Die zuvor skizzierte Ausgangssituation der beiden Eisenbahnverkehrsunternehmen wurde mit Hilfe des Optimierungsmodells, dessen Grundstruktur im Abschnitt 2 ausführlicher erläutert wurde, formalsprachlich erfasst sowie auf Basis der mathematischen Modellierungs- und Optimierungssoftware LINGO (Version 11.0) computergestützt implementiert.

Tabelle 4: Transportdurchführung ohne Kooperation der EVU

	Leerkilometer	Leertonnenkilometer	Lastkilometer	Lasttonnenkilometer
EVU <sub>1</sub> (Auftrag 1 & 2)	446 km	149.600 tkm	446 km	149.600 tkm
EVU <sub>2</sub> (Auftrag 3)	78 km	23.400 tkm	78 km	23.400 tkm
Summe	524 km	173.000 tkm	524 km	173.000 tkm

In der hier gebotenen Kürze können das formalsprachliche Optimierungsmodell und seine LINGO-Implementierung nicht wiedergegeben werden, sind aber in einem entsprechenden

Arbeitsbericht des Verbundprojekts MAEKAS einschließlich ausführlicher Lösungsreports dokumentiert [27]. Für die Ausgangssituation, in der die beiden Eisenbahnverkehrsunternehmen nicht miteinander kooperieren, ergibt sich die nachfolgend tabellarisch dargestellte Transportdurchführung mit den jeweiligen Leerkilometer und Leertonnenkilometern sowie Lastkilometer und Lasttonnenkilometern.

### 3.3 Theoretische Optimierung bei Kooperation

Geht man nun davon aus, dass die beiden Eisenbahnverkehrsunternehmen miteinander kooperieren und eine gemeinsame Tourenplanung durchführen, lässt sich eine verbesserte Tourenplanung mit weniger Leertonnenkilometern berechnen, die in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist: Die Strecken (1-2), (2-4), (4-3), (3-4) sowie (4-1) werden nun in einer Tour von einer Lokomotive durchlaufen. Dabei können die Teilstrecken (4-3) und (3-4) auch als gesonderte Tour z.B. mit einer zweiten Lokomotive durchgeführt werden.

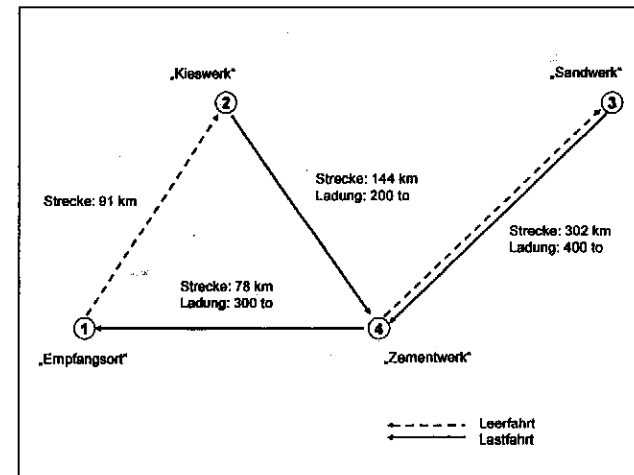


Abbildung 2: Theoretische Optimierung der Kooperation

Aus dieser Kooperation der beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Leer- und Leertonnenkilometer sowie Last- und Lasttonnenkilometer.

Tabelle 5: Transportdurchführung mit Kooperation der EVU

	Leerkilometer	Leertonnenkilometer	Lastkilometer	Lasttonnenkilometer
EVU <sub>1</sub> (Auftrag 1 & 3)	91 km	27.300 tkm	222 km	52.200 tkm
EVU <sub>2</sub> (Auftrag 2)	302 km	120.800 tkm	302 km	120.800 tkm
Summe	393 km	148.100 tkm	524 km	173.000 tkm

### 3.4 Optimierung in der betrieblichen Praxis

In der betrieblichen Praxis der Projektpartner bei MAEKAS wurde eine weitere, aufschlussreiche Lösung der hier betrachteten Transportproblematik entwickelt, welche vor allem einen zusätzlichen, bisher noch nicht modellierten Entscheidungsparameter beachtet: Vielfach wird im Transport- und Logistikbereich eine hohe Flexibilität gefordert, um beispielsweise auf Nachfrage- und damit Beschaffungs- oder Produktionsmengenschwankungen schnell reagieren zu können. Daher wird in der Betriebspraxis versucht, einen der eingesetzten Güterzüge (Lokomotive und leere Güterwagen) möglichst immer im Kieswerk bereitzuhalten, um den wichtigen Rohstoff Kies schnellstmöglich in die Zementproduktion nachliefern zu können.

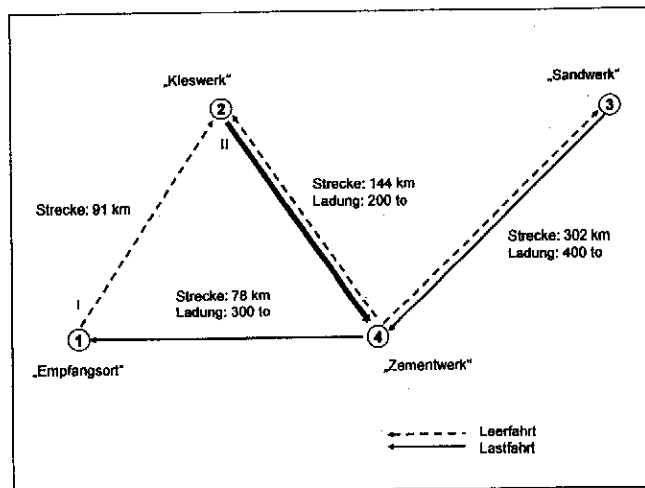


Abbildung 3: Praktische Optimierung der Kooperation mit zusätzlichem Entscheidungsparameter

Daher werden zwei Züge – in Abbildung 3 mit „I“ und „II“ bezeichnet – eingesetzt, die auf der Strecke (2-4) zur Einsparung von Personalkosten auch gekoppelt werden können (Betrieb mit zwei Lokomotiven). Dabei durchläuft der erste Zug (I) die bekannte optimale Tour, während

der zweite Zug (II) zwischen den Haltepunkten 2 und 4 pendelt. Durch die Verbindung der vier Standorte und den flexiblen Umlauf von leeren Güterwagen und von Lokomotiven wird in dieser Praxislösung versucht, Sonderleerfahrten vor allem in nachfragestarken Zeiten zu verhindern (*Flexibilitätszielsetzung*) [27].

Tabelle 6: Transportdurchführung mit Kooperation der EVU und praktischer Optimierung

	Leerkilometer	Leertonnenkilometer	Lastkilometer	Lasttonnenkilometer
EVU <sub>1</sub> (Auftrag 1A, 2&3)	393 km	148.100 tkm	524 km	173.000 tkm
EVU <sub>2</sub> (Auftrag 1B)	144 km	28.800 tkm	144 km	28.800 tkm
Summe	537 km	176.900 tkm	668 km	201.800 tkm

Vergleicht man nun die drei hier vorgestellten Lösungsvarianten, wie in Tabelle 7 verdeutlicht, so ergibt sich, dass zwar die Lösung 2 – wie theoretisch modelliert – die geringsten Leertonnenkilometer und auch bei den zusätzlichen drei dargestellten Ergebnisdimensionen die bestmöglichen Werte aufweist. Allerdings besitzt die Lösung 2 im Vergleich zur Lösung 3 nicht die in der Praxis geforderte Flexibilität, da bei der Lösung 2 eine Tour immer im Haltepunkt 1 starten muss und damit ein Zeitverlust gegenüber der Lösung 3 mit einem in Haltepunkt 2 stationierten Leerzug eintritt.

Tabelle 7: Vergleich der Lösungsvarianten

	Leerkilometer	Leertonnenkilometer	Lastkilometer	Lasttonnenkilometer
Lösung 1 (Ausgangssituation)	524 km	173.000 tkm	524 km	173.000 tkm
Lösung 2 (theoretische Optimierung)	393 km	148.100 tkm	524 km	173.000 tkm
Lösung 3 (praktische Optimierung) <sup>4</sup>	537 km	176.900 tkm	668 km	201.800 tkm

## 4 Zusammenfassung

Im Zuge der ökonomischen und ökologischen Optimierung von Schienengüterverkehren ergeben sich insbesondere in der Kooperation von EVU interessante Aspekte einer Reduktion von Leerfahrten und entsprechend Leertonnenkilometern. Diese können gleichzeitig ökonomische Zielsetzungen (Effizienzsteigerung) und ökologische Zielsetzungen wie beispielsweise

<sup>4</sup> Unter der Voraussetzung eingeschränkter Vergleichbarkeit, da bei diesem Einsatz zweier Züge eine höhere Betriebsleistung (Lasttonnenkilometer) erbracht wird.

se die Reduktion von Energieverbrauch und Schadstoffemission realisieren. Daher ist die hier vorgestellte erste formale Modellierung dieser Entscheidungs- und Kooperationssituation von besonderer Bedeutung für die Logistikpraxis – gleichzeitig wird jedoch auch offensichtlich, dass die Modellbildung weite Bereiche der in der Betriebspraxis notwendigen Überlegungen (z.B. Wagen-Vorratshaltung für nachfragestarke Zeiten) und Zielgrößen (z.B. Zielsetzung der Transportflexibilität) noch nicht implementieren kann – was in der Folge eine deutliche Komplexitätssteigerung der in der Zukunft notwendigen Modelle erwarten lässt.

**Förderhinweis:** Das Verbundprojekt MAEKAS wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) innerhalb des Rahmenkonzepts „Intelligente Logistik im Güter- und Wirtschaftsverkehr“ gefördert und vom Projektträger Mobilität und Verkehr, Bauen und Wohnen (PT MVBW), der TÜV Rheinland Consulting GmbH, betreut. Die Mitglieder des Projektteams danken für die großzügige Unterstützung ihrer Forschungs- und Transferarbeiten. Nähere Informationen zum Projekt finden sich im Internet unter der URL „www.maekas.wiwi.uni-due.de“.

## Literaturverzeichnis

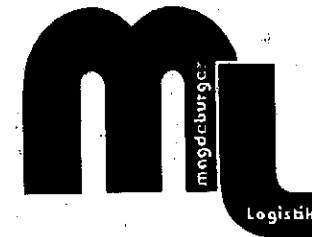
- [1] Borndörfer, R., M. Grötschel, S. Lukac, K. Mitusch, T. Schlechte, S. Schultz und A. Tanner (2005). An Auctioning Approach to Railway Slot Allocation. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB)-Report 05-45.
- [2] Bundesregierung (Bundesrepublik Deutschland) (2008). Masterplan Güterverkehr und Logistik. Eigenverlag, Berlin.
- [3] Canen, A.G. und N.D. Pizzolato (1994). The Vehicle Routing Problem. In: *Logistics Information Management*, Vol. 7, No. 1, S. 11-13.
- [4] Eickmann, C. (2002). Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Methoden zum Vergleich im Straßen- und Schienenverkehr. In: *EI – Eisenbahningenieur*, Vol. 53, No. 9, S. 116-122.
- [5] Eisenkopf, A. (2006). Ökonomische Instrumente für einen umweltverträglichen Verkehr – Machbarkeit und Wirksamkeit. In: *Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis*, Vol. 15, No. 3, S. 21-30.
- [6] Engeler, K. (2002). Mehrdepot-Tourenplanung mit Zeitfenstern. Josef Eul Verlag GmbH, Lohmar.
- [7] Falkensammer, C. (2006). Entwicklung einer Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der mittelfristigen Leistungstiefenplanung von Systemverkehrsanbietern. Dissertation, Johannes Kepler Universität Linz, Linz.
- [8] Fladnitzer, M. (2006). Vertrauen als Erfolgsfaktor virtueller Unternehmen: Grundlagen, Rahmenbedingungen und Maßnahmen zur Vertrauensbildung. Gabler Verlag, Wiesbaden.
- [9] Giaglis, G.M., I. Minis, A. Tatarakis und V. Zeimpekis (2004). Minimizing logistics risks through real-time vehicle routing and mobile technologies – Research to date and future trends. In: [Zeitschriftenname?], Vol. 34, No. 9, S. 749-764.
- [10] Heimerl, G., H. Weigelt und P. Zipf (1997). Zugbildung. In: H. Bloech und G.B. Ihde (Hrsg.) *Vah lens großes Logistiklexikon*, Verlag Beck, Verlag Franz Vahlen, München, S. 1295.
- [11] Holmberg, K, M. Joborn und J.T. Lundgren (1998). Improved Empty Freight Car Distribution. In: *Transportation Science*, Vol. 32, No. 2. S. 163-173.
- [12] IFEU/SGKV (2001). Vergleichende Analyse von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßengüterverkehr und Kombinierten Verkehr Straße/Schiene. Eigenverlag, Frankfurt am Main / Genf.
- [13] Ireland, P., R. Case, J. Fallis, C. van Dyke, J. Kuehn und M. Meketon (2004). The Canadian Pacific Railway Transforms Operations by Using Models to Develop Its Operating Plans. In: *Interfaces*, Vol. 34, No. 1, S. 5-14.
- [14] Joborn, M., T.G. Crainic, M. Gendreau, K. Holmberg und J.T. Lundgren (2004). Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways. In: *Transportation Science*, Vol. 38, No. 2, S. 121-134.
- [15] Jones Lang Lasalle (2008). Freight transport: Road versus Rail – Modal changes ahead? Eigenverlag, London / Hamburg.
- [16] Kroon, L., D. Huisman und G. Maróti (2007). Railway Timetabling from an Operations Research Perspective. *Econometric Institute report EI Nr. 22*, Rotterdam.
- [17] Kuo, C., G.M. Nicholls (2007). A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad. In: *Omega*, Nr. 35 (2007), S. 472-485.
- [18] Lange, C. und M. Pianowski (2008): Nachhaltigkeitsberichterstattung und Integriertes Controlling, in: Isenmann, R. und J.M. Gómez (Hrsg.): *Internetbasierte Nachhaltigkeitsberichterstattung*, Berlin, S. 141-155.
- [19] Lange, C. und A. Kucenbuch (2006): Integrated Controlling Based on Material- and Energy-Flow-Analysis, in: Wagner, B. und S.ENZLER (Hrsg.): *Material Flow Management – Improving Cost Efficiency and Environmental Performance*, Heidelberg, New York, S. 91-129.
- [20] Laporte, G. (2007). What you should know about the Vehicle Routing Problem. In: *Naval Research Logistics*, Vol. 54, S. 811-819.
- [21] Mühlhans, E. (1997). Ansätze zur Kostensenkung im Eisenbahngüterverkehr. In: *Internationales Verkehrswesen*, Vol. 49, No. 6, S. 300-306.

- [22] Noche, B. (2003), Auswirkungen des Betriebs von Distributionszentren auf den Verkehr, in: Innovative Forschung und Lehre im Dienste einer nachhaltigen und integrierten Verkehrspolitik, Fachmesse "transport logistic", 20. - 24. Mai 2003, München, Sonderausgabe der Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V., Berlin 2003, ISBN 3-933392-72-1, S. 165 - 177 Schriftenreihe.
- [23] Pankratz, G. (2005). Dynamic vehicle routing by means of genetic algorithm. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 35, No. 5, S. 362-383.
- [24] Slager, B. und L. Kapteijns (2004). Implementation of cargo revenue management at KLM. In: Journal of Revenue and Pricing Management, Vol. 3, No. 1, S. 80-90.
- [25] Vahrenkamp R. (2005). Logistik – Management und Strategien. 5. Aufl., Verlag R. Oldenbourg, München / Wien.
- [26] Zelewski, S., A. Saur und M. Klumpp (2008). Co-operative Rail Cargo Transport Effects. MAEKAS Projektbericht Nr. 2, Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement, Universität Duisburg-Essen, Essen.
- [27] Zelewski, S. und A. Saur (2009). Vermeidung von Leerfahrten für Eisenbahnverkehrsunternehmen durch „intelligente“ Nachfragebündelung – eine Beurteilung der ökonomischen und ökologischen Effizienz. MAEKAS Projektbericht Nr. 6, Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement, Universität Duisburg-Essen, Essen.

## 14. Wissenschaftliche Fachtagung

# Sustainable Logistics

Magdeburg, 26. - 27. Februar 2009



Logistik aus technischer und ökonomischer Sicht

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktion und Logistik  
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Management Science