

INHALT DES HEFTES:

- |   |           |
|---|-----------|
| Das Verkehrsangebot als Basis zur<br>Berechnung der Mobilität im Stadtverkehr<br>Von Dirk Vallée, Aachen  | Seite 255 |
| Versteigerungen von Bewilligungen für<br>den internationalen Straßengüterverkehr<br>Von Wilfried Puwein, Wien   | Seite 268 |
| Verkehrswege, Raumnutzung, Sozialprodukt<br>und Staatshaushalt: Zum ökonomietheoretischen<br>Horizont infrastruktureller<br>Verbesserungen für Beförderungsprozesse<br>Von Erhard Moosmayer, Bonn | Seite 276 |
| Logistische Lösungen von<br>Transportproblemen durch ein Werkzeug<br>der Künstlichen Intelligenz<br>Von Mounir AL-Daas, Dresden   | Seite 298 |

Manuskripte sind zu senden an die Herausgeber:  
Prof. Dr. Herbert Baum  
Prof. Dr. Rainer Willeke  
Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln  
50923 Köln

Verlag – Herstellung – Vertrieb – Anzeigen:  
Verkehrs-Verlag J. Fischer, Paulusstraße 1, 40237 Düsseldorf  
Telefon: (02 11) 9 91 93-0, Telefax (02 11) 6 80 15 44  
Telex 8 586 633 vvfj

Einzelheft DM 21,25 – Jahresabonnement DM 78,15  
zuzüglich MwSt und Versandkosten

Für Anzeigen gilt Preisliste Nr. 10 vom 1. 1. 1994

Erscheinungsweise: vierteljährlich

*Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages nicht gestattet, photographische Vervielfältigungen, Mikrofilme, Mikrophotos u. ä. von den Zeitschriftenheften, von einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen.*

## Das Verkehrsangebot als Basis zur Berechnung der Mobilität im Stadtverkehr

VON DIRK VALLÉE, AACHEN

v. sm c  
v. st b  
s

### 1. Einleitung und Zielsetzung

#### 1.1 Definition der Mobilität

Das Wort Mobilität bedeutet im weitesten Sinne des Wortes „Beweglichkeit“ bzw. „Bereitschaft zum Ortswechsel“. In der Verkehrswissenschaft wird der Begriff für die „Maßzahl der realisierten Ortsveränderungen einer Person in einem festgelegten Zeitraum“ (i. d. R. ein Tag), in der Einheit [Wege/Person · Tag] verwendet. Dieses gilt insbesondere für den Stadtverkehr, auf den sich diese Arbeit beschränkt.

Soll die Beweglichkeit bzw. das Mobilitätsverhalten einer Gruppe von Individuen beschrieben werden, reicht allein die Anzahl der durchgeführten Ortswechsel nicht zur Beschreibung. Zusätzlich ist auch eine Maßzahl für die Beteiligung der Mitglieder der Gruppe an den Ortsveränderungen erforderlich. Ferner ist eine Betrachtung der Länge der zurückgelegten Wege erforderlich.

Daraus ergeben sich für eine ganzheitliche Betrachtung des Mobilitätsverhaltens folgende Komponenten:

- Anzahl der Wege
- Verkehrsbeteiligung
- Länge der Wege

Bei der Betrachtung der Anzahl der Wege ist es wichtig, nicht nur – wie häufig gemacht – die Anzahl der Fahrten mit dem Pkw oder dem öffentlichen Personennahverkehr zu berücksichtigen, sondern alle Wege, also auch die zu Fuß oder die mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege. Diese Forderung muß erhoben werden, um Substitutionen von Wegen zu Fuß oder mit dem Fahrrad durch Fahrten mit motorisierten Verkehrsmitteln oder umgekehrt erfassen zu können. Durch die Berechnung der Mobilität lassen sich Verkehrsmengen und der induzierte Verkehr berechnen.

#### 1.2 Kausalitäten des Mobilitätsverhaltens

Die Maßzahl Mobilität beschreibt die beobachtete Anzahl der Ortsveränderungen, also das beobachtete Mobilitätsverhalten. Verhalten ist in der Psychologie als „Reaktion auf Reize“ definiert und ist das Ergebnis von Bedürfnissen und Chancen. Daher ist es für eine Quantifizierung des Mobilitätsverhaltens erforderlich, die Reize zu erfassen.

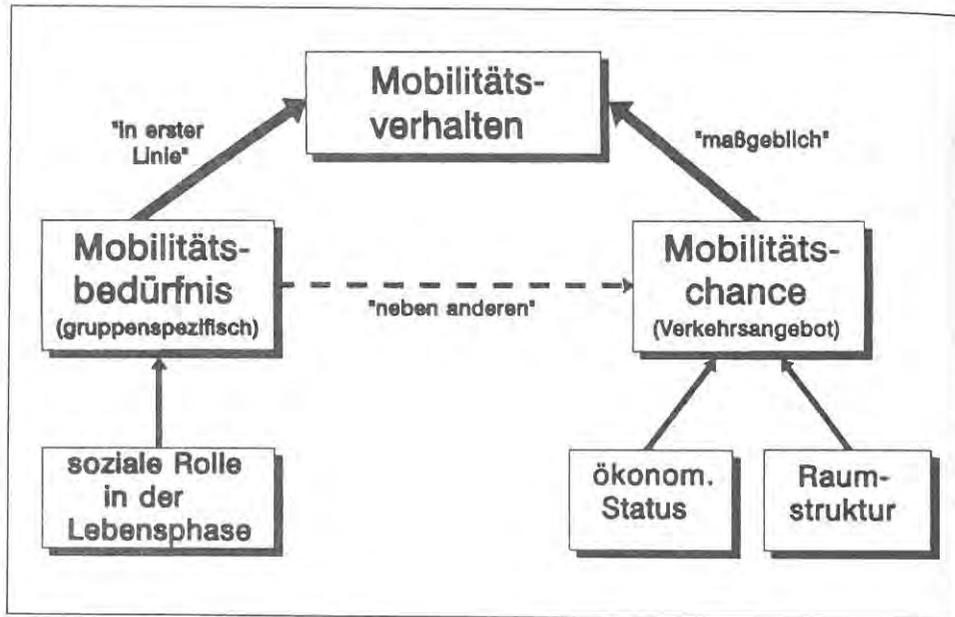
---

*Anschrift des Verfassers:*

Dr.-Ing. Dirk Vallée  
Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen  
Mies-van-der-Rohe-Straße 1  
52072 Aachen

Hautzinger et al. haben sich intensiv mit den Ursachen des Mobilitätsverhaltens auseinandergesetzt. Die Untersuchungen führten zu 6 Thesen, deren Inhalt in Abbildung 1 graphisch aufbereitet ist.

Abbildung 1: Kausalitäten des Mobilitätsverhaltens



nach Hautzinger et al.<sup>1)</sup>

Demnach<sup>1)</sup> „bestehen mehr oder weniger offenkundige und bisher in unterschiedlichem Maße empirisch belegte Wirkungszusammenhänge:

1. Das Mobilitätsverhalten einer Person hängt in erster Linie von gruppenspezifischen Mobilitätsbedürfnissen ab; kennzeichnend für die Gruppenzugehörigkeit ist die soziale Rolle in der Lebensphase.
2. Das Mobilitätsverhalten einer Person wird maßgeblich von ihren Mobilitätschancen geprägt; bessere Mobilitätschancen bedeuten tendenziell mehr Wege (Aktivitäten), größere Aktionsräume und geringere Zeitaufwände.
3. Das Mobilitätsverhalten einer Person wird von der Raumstruktur beeinflusst; im Sinne eines Stadt-Land-Gefälles liegen im ländlichen Raum die Zahl der Wege (Aktivitäten) einer Person unter dem Durchschnitt, die zurückgelegten Distanzen und die aufzuwendenden Wegezeiten über dem Durchschnitt.
4. Die Mobilitätschancen (Pkw-Verfügbarkeit) werden ihrerseits neben anderen Faktoren (z.B. ökonomischer Status) vom Mobilitätsbedarf beeinflusst.

5. Die Mobilitätschancen hängen weiterhin von der Raumstruktur ab; das niedrigere öffentliche Verkehrsangebot im ländlichen Raum wird durch höhere Motorisierungsgrade teilweise kompensiert.
6. Die einzelnen Komponenten des Mobilitätsverhaltens (Wegezahl, Distanz, Zeitaufwand) bilden eine Art Gleichgewichtssystem; während Wegezahl (Aktivitätenhäufigkeit) und Zeitaufwand relativ stabile Größen sind, paßt sich das Individuum über die Wegelänge (Größe des Aktionsraumes) an die individuellen Mobilitätschancen an<sup>1)</sup>

Die soziale Rolle in der Lebensphase (z.B. Schüler, Hausfrau, Berufstätiger, Rentner) ist eine stabile Größe. Demnach können die Mobilitätsbedürfnisse des einzelnen als stabil angesehen werden. Bisherige Berechnungsmodelle zur Quantifizierung von Verhalten basieren auf den Unterschieden zwischen den Bevölkerungsgruppen. Sie bedürfen einer sehr aufwendigen Datenermittlung in Form von Zählungen zur Kalibrierung der Modelle. Ziel dieses Ansatzes soll sein, ein neues Berechnungsverfahren zu erstellen, daß auf den Gemeinsamkeiten bei der Gesamtheit der Bevölkerung bzgl. der subjektiven Empfindung der Zeit- und Kostenkomponenten der Verkehrswiderstände basiert.

Die Mobilitätschancen (z.B. Pkw-Verfügbarkeit, Motorisierungsgrad, öffentliches Verkehrsangebot) werden wiederum von der Raumstruktur und dem ökonomischen Status beeinflusst. Die genannten Größen lassen sich unter dem Begriff Verkehrsangebot zusammenfassen, wobei die Raumstruktur und der ökonomische Status im weitesten Sinne dazu gehören. Wenn der Begriff Mobilitätschance aber das Verkehrsangebot meint, ist daraus der Schluß zu ziehen, daß das Mobilitätsverhalten ganz wesentlich vom Verkehrsangebot beeinflusst wird. Das Verkehrsangebot und dessen subjektive Empfindung ist im Verkehrswiderstand nach Walther<sup>2)</sup> quantifiziert.

### 1.3 Der Gesamtsystem-Widerstand

Der Verkehrswiderstand nach Walther berücksichtigt in einem Wert zeitliche und monetäre Aufwendungen für einen Weg. Er beinhaltet alle Angebotskomponenten der einzelnen Verkehrsmittel, als da wären<sup>2)</sup>

- mot. IV:
- Fußweg von der Wohnung zum Pkw
  - Beförderungszeit / -geschwindigkeit
  - Parkplatzsuchzeit
  - Fußweg vom Pkw zum Ziel
  - geschwindigkeitsabhängiger Benzinverbrauch
  - Benzinpreis
  - Pkw-Betriebskosten (ohne Steuer, Versicherung, Wertverlust)
  - Pkw-Besetzungsgrad (nach neuesten Erkenntnissen nicht statisch, sondern von den monetären Widerstandskomponenten abhängig)
- ÖPNV:
- die Art des Verkehrsmittels
  - Zu- und Abgangswege (örtliche Verfügbarkeit)
  - Bedienungshäufigkeit (zeitliche Verfügbarkeit)
  - Beförderungszeit / -geschwindigkeit
  - Umsteigenotwendigkeit / -zeit
  - Tarifniveau / -struktur

Fußgänger- und – Siedlungsstruktur (Großstadt, Kleinstadt, ländliches Gebiet)  
 Fahrradverkehr: – Topographie (Flachland, Bergland)  
 – Wegenetze (Radwegenetz, Fußwegenetz)

maßgebendes Einkommen der Bevölkerung

Die Berücksichtigung des Einkommens ist zur korrekten Bestimmung der aus den Kosten herrührenden monetären Widerstandskomponenten erforderlich. Zudem findet durch die Berücksichtigung des Einkommens der ökonomische Status der betrachteten Bevölkerung Eingang in den Widerstand.

Der Widerstand wird prinzipiell für einen speziellen Weg mit einem bestimmten Verkehrsmittel gebildet. Er läßt sich unter Berücksichtigung aller zurückgelegten Wege mit allen zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln zum Gesamtsystem-Widerstand zusammenfassen. Dieser Gesamtsystem-Widerstand stellt somit einen Indikator für die Qualität des Verkehrsangebotes in einem Untersuchungsgebiet dar.

Die zurückgelegten Wege finden über die Wegweitenhäufigkeitsverteilung Eingang in den Gesamtsystem-Widerstand. Ebenso beinhaltet die Wegweitenhäufigkeitsverteilung ein Kriterium für den Einzugsbereich der Untersuchung. Die Abgrenzung des Einzugsbereiches ist im Hinblick auf die erforderliche Berücksichtigung der Länge der Wege von Bedeutung.

Im allgemeinen wird die Unterscheidung zwischen Nahverkehr und Fernverkehr an der Grenze 50 km vorgenommen. Wege unter 50 km Länge werden zum Nahverkehr gerechnet, solche über 50 km Länge gelten als Fernverkehr. Diese synthetische Festlegung für alle Untersuchungsgebiete ist unzweckmäßig, insbesondere für vergleichende Betrachtungen von Untersuchungsgebieten verschiedener Größe und zentralörtlicher Bedeutung. Eine sinnvolle Abgrenzung muß die gewachsene Größe des Raumes und das Verhalten der darin am Verkehr teilnehmenden Personen berücksichtigen. Aus diesem Grunde wird die Größe der Untersuchungsgebiete dergestalt festgelegt, daß 90% aller Wege bis 50 km Berücksichtigung finden. Untersuchungsgebiete anderer Ausdehnung bedürfen einer gesonderten Betrachtung.

Der Gesamtsystem-Widerstand beinhaltet das Verkehrsangebot und den ökonomischen Status der Bevölkerung, welcher wiederum Rückschlüsse auf die Bevölkerungsstruktur zuläßt. Durch die Berücksichtigung der Wegweitenhäufigkeitsverteilung beinhaltet der Gesamtsystem-Widerstand auch die Raumstruktur, die Verteilung der Aktivitätenglegenheiten und die Länge der Wege. Damit sind alle von *Hautzinger et al.*<sup>1)</sup> beschriebenen Einflüsse auf das Mobilitätsverhalten mit dem Gesamtsystem-Widerstand erfaßt.

## 2. Hypothese

### 2.1 Das Widerstandsbudget als Basis zur Mobilitätsbestimmung

Die zu beweisende Hypothese lautet:

*Die Mobilität ist vom Verkehrsangebot determiniert und als Ausschöpfungsgrad eines Widerstandsbudgets berechenbar. Dieses Budget wird als für alle gleich angenommen.*

$$\text{Mobilität der Mobilen} = \frac{\text{Widerstandsbudget}}{\text{Gesamtsystem-Widerstand}}$$

Als ausschöpfendes Element des Widerstandsbudgets muß demnach der Gesamtsystem-Widerstand verwendet werden, also der Indikator für die Qualität des Verkehrsangebotes. Die Mobilität der Mobilen ist demnach das Ergebnis unterschiedlicher Mobilitätschancen in unterschiedlichen Gebieten.

Der theoretische Ansatz erfolgt in Anlehnung an die häufig verwendeten Zeit- und Kostenbudgets, deren Existenz vielfach vermutet wird, aber bisher nicht eindeutig nachweisbar ist (vgl. z. B. 4)). Ferner ist aus der hier verwendeten Widerstandsdefinition zu belegen, daß die genannten Budgets nicht als simultane Budgets verwendet werden können. Wegen der gleichzeitigen Wirkung von zeitlichen und monetären Widerstandskomponenten und deren gegenseitiger Substitutionsmöglichkeit kann nur ein Widerstandsbudget, welches gewissermaßen eine Zusammenfassung des Zeit- und des Kostenbudgets darstellt, existieren.

### 2.2 Bestimmung der Größe des Widerstandsbudgets

Aus bekannten Werten für die Mobilität der Mobilen und den Gesamtsystem-Widerstand wird das Widerstandsbudget berechnet. Die dazu verwendete Gleichung lautet

$$\text{Widerstandsbudget} = \text{Gesamtsystem-Widerstand} \cdot \text{Mobilität der Mobilen}$$

Zur Anwendung dieser Gleichung wurden aus Befragungen bekannte Werte für die Mobilität der Mobilen verwendet. Des weiteren wurden aus vorliegenden Untersuchungen bekannte Gesamtsystem-Widerstände verwendet. Die verwendeten Gesamtsystem-Widerstände können als zuverlässig gelten, da bei ihrer Bestimmung vielfältige Plausibilitätskontrollen durch Vergleich von Berechnungs- zu Befragungsergebnissen angestellt wurden. Dazu gehören unter anderem:

- der Modal-Split
- die Reisweitenhäufigkeitsverteilungen der einzelnen Verkehrsmittel
- die mittleren Reiseweiten der einzelnen Verkehrsmittel
- die mittleren Unterwegszeiten der einzelnen Verkehrsmittel
- der Umsteigeranteil im Netz des ÖPNV
- der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch im MIV

Tabelle 1: Gesamtsystem-Widerstände verschiedener Untersuchungsgebiete

Stadt	Jahr	Gesamtsystem-Widerstand	Mobilität der Mobilen	Widerstandsbudget
Aachen	1990	42,091	4,00	168,4
Berlin	1989	50,539	3,26	164,8
Bonn	1990	41,485	3,92	162,6
Stuttgart	1981	46,597	3,61	168,2

Aus den genannten Werten errechnet sich ein arithmetischer Mittelwert für das Widerstandsbudget von 166 Widerstandseinheiten bei einer Standardabweichung von 2,8 Widerstandseinheiten. Der mit der Einwohnerzahl in den Untersuchungsgebieten gewichtete Mittelwert für das Widerstandsbudget beträgt 165,3 Widerstandseinheiten. Demzufolge wird das Widerstandsbudget im weiteren zu 165 Widerstandseinheiten angenommen.

Daraus folgt, daß die Mobilität der Mobilen aus der Gleichung

$$\text{Mobilität der Mobilen} = \frac{165}{\text{Gesamtsystem-Widerstand}}$$

für Untersuchungsgebiete berechenbar ist, die 90% aller Wege bis 50 km Entfernung berücksichtigen.

Liegt eine andere Wegeweitenhäufigkeitsverteilung zugrunde, bedarf es der Einführung eines Korrekturgliedes  $k$ . Dieses Korrekturglied ist der Quotient der mittleren Wegeweite der betrachteten Wegeweitenhäufigkeitsverteilung durch die mittlere Wegeweite der Häufigkeitsverteilung, die 90% aller Wege bis 50 km Entfernung berücksichtigt. Damit wird eine allgemeine Berechnung der Mobilität im Stadtverkehr mit folgender Gliederung möglich:

$$\text{Mobilität der Mobilen} = k \cdot \frac{165}{\text{Gesamtsystem-Widerstand}}$$

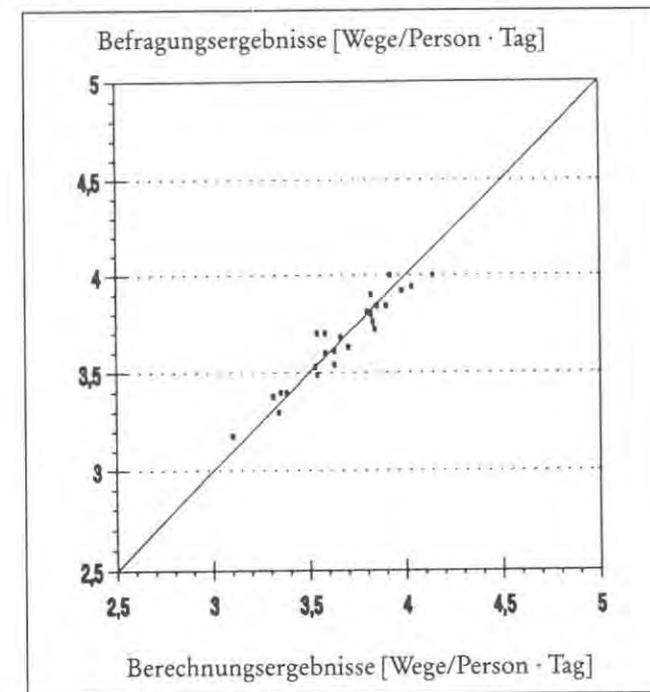
Dieser vergleichsweise einfache Ansatz kann nur deshalb gemacht werden, weil die verwendete Widerstandsformulierung davon ausgeht, daß für die Modellierung des Stadtverkehrs die Gemeinsamkeiten bei der Gesamtheit der Bevölkerung bezüglich der subjektiven Empfindung der Zeit- und Kostenkomponenten der Verkehrswiderstände ganz offensichtlich signifikanter sind als die bekannten Unterschiede der Einflüsse sogenannter verhaltenshomogener soziodemographischer Gruppen.

### 2.3 Beweis der Hypothese

Ein theoretischer Beweis der Hypothese ist nicht möglich. Auch Befragungen zur Quantifizierung des Widerstandsbudgets scheiden aus, da der Widerstand subjektiven Empfindungen unterworfen ist. Insofern kann der Beweis nur anhand einer Vielzahl von Beispielen erfolgen.

Zu diesem Zweck wurden 26 Untersuchungsgebiete verschiedener Infrastrukturausstattung, Größe und Struktur analysiert. Für alle Untersuchungsgebiete waren die ortsspezifischen Wegeweitenhäufigkeitsverteilungen aus Befragungen bekannt, und es wurden 90% aller Wege bis 50 km Entfernung berücksichtigt. Nach der Abbildung des Verkehrsangebotes kann der Gesamtsystem-Widerstand bestimmt werden. Anschließend wurde aus dem Widerstandsbudget und dem Gesamtsystem-Widerstand die Mobilität der Mobilen berechnet. Der Vergleich der Berechnungs- mit den Befragungsergebnissen<sup>3)</sup> untermauert die aufgestellte Hypothese (Korrelationskoeffizient  $r = 0,9542$ , Bestimmtheitsmaß  $r^2 = 0,9105$ , Restvarianz = 0,0049).

Abbildung 2: Vergleich der Berechnungs- und Befragungsergebnisse



Bei diesen Untersuchungen wurden die ortsspezifischen Wegeweitenhäufigkeitsverteilungen als interne exput-Größen aus Befragungen verwendet. Sensitivitätsanalysen<sup>3)</sup>, bei denen typische Wegeweitenhäufigkeitsverteilungen für Groß-, Mittel- oder Kleinstädte aus der KONTIV verwendet wurden, verschlechtern die Ergebnisse des Vergleichs nur unwesentlich. Des weiteren konnten auch für extremal gute und extremal schlechte Verkehrsangebote plausible Ergebnisse für die berechneten Mobilitäten nachgewiesen werden.

Damit können die Hypothese der Abhängigkeit der Mobilität der Mobilen von der Qualität des Verkehrsangebotes und die Größe des Widerstandsbudgets untermauert werden und im Sinne eines Induktionsbeweises als bewiesen angesehen werden.

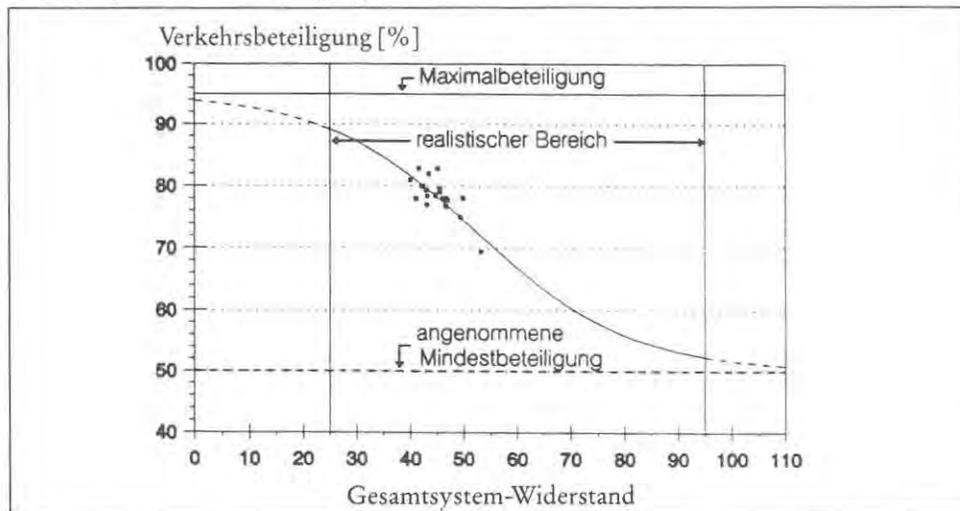
### 2.4 Abschätzung der Verkehrsbeteiligung

Neben der Länge der Wege und der Anzahl der Wege wurde eingangs die Verkehrsbeteiligung als weitere wichtige Mobilitätskomponente benannt. Diese meint die grundsätzliche Verkehrsteilnahme, unabhängig vom benutzten Verkehrsmittel. Wenn die Mobilität insgesamt von der Qualität des Verkehrsangebotes bestimmt ist, muß dieses folglich auch für die Verkehrsbeteiligung gelten. Also muß auch die Verkehrsbeteiligung mit Hilfe des Gesamtsystem-Widerstandes berechenbar sein.

Eine Bestimmung der Verkehrsbeteiligung ist wegen der mangelhaften Datengrundlage nicht möglich. Daher wird eine Abschätzung vorgenommen, bei der die Existenz einer Mindest- und einer Maximalbeteiligung unabhängig von der Qualität des Verkehrsangebotes angenommen wird. Des weiteren wird davon ausgegangen, daß die Verkehrsbeteiligung mit steigendem Gesamtsystem-Widerstand sinkt und zwischen den Grenzwerten einer logistischen Entwicklung gehorcht. Die maximale Verkehrsbeteiligung kann bei realistischer Betrachtung den theoretischen Höchstwert 100% nicht erreichen, da Kranke, Alte, Kleinkinder und Häftlinge ganz oder teilweise immobil sind. Daher ist von einer maximalen Verkehrsbeteiligung von ca. 92%, auf jeden Fall weniger als 95%, auszugehen. Diagnostizierte Maximalwerte liegen bei 87,3% (KONTIV 82, 24-29 Jahre), 87,4% (KONTIV 82, voll Berufstätige in großen Mittelzentren in hoch verdichteten Regionen > 50000 EW, z.B. Moers, Neuss, Unna) bzw. 89,9% (KONTIV 89, 25-35 Jahre).

Die Mindestverkehrsbeteiligung kann den theoretischen Mindestwert 0% nicht erreichen, da eine Gesellschaft ohne Ortsveränderungen mindestens zur Nahrungsmittelversorgung, zur Berufsausübung und zur Ausbildung nicht lebensfähig ist. Die Erwerbstätigen sind in Industriegesellschaften mindestens 40% der Gesamtbevölkerung, die 6- bis 16jährigen Personen (Schüler) machen bei einer normalen Alterspyramide mindestens 10% der Bevölkerung aus. Unter der Annahme, daß die zur Nahrungsmittelversorgung erforderlichen Wege von diesen ohnehin am Verkehr beteiligten Personengruppen mit erledigt werden und dadurch für die anderen Personen keine Ortsveränderungen erforderlich werden, ergibt sich eine Mindestbeteiligung von 50%. Diagnostizierte Minimalwerte liegen für Personen über 71 Jahre in ländlichen Gebieten bei 45,1% (KONTIV 76) bzw. 51,0% (KONTIV 82), für Personen über 71 Jahre im Bundesdurchschnitt bei 48,2% (KONTIV 76), 55,6% (KONTIV 82), 67,6% (KONTIV 89), bzw. für Personen über 80 Jahre im Bundesdurchschnitt bei 55,36% an Werktagen und 52,03% an Sonntagen.

Abbildung 3: Verkehrsbeteiligung



Aus den bekannten Werten für die Verkehrsbeteiligung und den Gesamtsystem-Widerständen von 20 Untersuchungsgebieten sowie den oben gezeigten Grenzwerten wurde folgende Funktion bestimmt:

$$\text{Verkehrsbeteiligung} = 0,5 + \frac{0,45}{1 + e^{-3,6291 + 0,0691 \cdot \text{Gesamtsystem-Widerstand}}}$$

Der Summand 0,5 berücksichtigt dabei die untere Grenze der Verkehrsbeteiligung, der Nenner 0,45 ist die Differenz der Maximalbeteiligung und der angenommenen Mindestbeteiligung. Die angenommene Mindestbeteiligung ist für die Bestimmung der Koeffizienten im Exponenten der logistischen Entwicklung von höchst untergeordneter Bedeutung.

### 3. Anwendungsbereiche

#### 3.1 Berechnung von Verkehrsmengen

Nachdem alle Komponenten der Mobilität in Abhängigkeit vom Gesamtsystem-Widerstand, und damit von der Qualität des Verkehrsangebotes, berechenbar geworden sind, läßt sich ebenfalls die häufig verwendete Größe „Mobilität aller“ berechnen. Diese ist das Produkt der Mobilität der Mobilen mit der Verkehrsbeteiligung. Die Multiplikation der Mobilität aller mit der Personenzahl führt schließlich zur Bestimmung der Verkehrsmengen. Dieses läßt sich sowohl für eine makroskopische Untersuchung eines gesamten Untersuchungsraumes zur Entwicklung von Strategiekonzepten als auch für mikroskopische Untersuchungen einzelner Verkehrszellen oder Verkehrsbeziehungen durchführen.

Des weiteren lassen sich nunmehr alle in der *standardisierten Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des Öffentlichen Personennahverkehrs* genannten Einflußfaktoren<sup>5)</sup> berechnen. Zu nennen sind

- die Mobilität in motorisierten Fahrten (IV und ÖV) je Einwohner und Werktag
- der ÖV-Anteil an den werktäglichen Personenfahrten
- mittlere Beförderungsweiten im IV und ÖV
- mittlere ÖV-Beförderungszeiten (Zeiten im Fahrzeug) unter Berücksichtigung der ortsspezifischen Qualität des Verkehrsangebotes im ÖV und im IV
- mittlere Reisezeiten im IV und ÖV (Tür zu Tür unter Einschluß aller Teilreisezeiten)
- der mittlere Zeitaufwand (Zeitbudget) je Person und Werktag für motorisierte Fahrten, die bisher nur aus Befragungen gewonnen werden konnten.

#### 3.2 Definition des induzierten Verkehrs

Neben der Bestimmung der Verkehrsmengen ist ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich die Berechnung des induzierten Verkehrs. Als induzierte Verkehre sind solche Ortsveränderungen definiert, die vor einem bestimmten Zeitpunkt oder einer angebotsrelevanten Maßnahme nicht stattgefunden haben (positiv induzierter Verkehr; Verkehrszuwachs) oder danach nicht mehr durchgeführt werden (negativ induzierter Verkehr; Verkehrsverzicht). Induzierte Verkehre sind also eine Veränderung der Mobilität als Folge einer Veränderung des Verkehrsangebotes.

Als Folge von Angebotsänderungen bei einzelnen Verkehrsmitteln ändern sich deren Widerstände für einen Weg. Solche Widerstandsänderungen haben einen anderen Modal-Split und einen anderen Gesamtsystem-Widerstand zur Folge. Der geänderte Gesamtsystem-Widerstand führt zu anderen Mobilitätskennwerten, also zu induziertem Verkehr. Durch die geänderte Mobilität aller (Wegeanzahl und Verkehrsbeteiligung) beschreiben die beiden Modal-Splits jedoch unterschiedliche Verkehrsvolumina, so daß sie nicht miteinander vergleichbar sind. Daraus folgt, daß jeweils eine Betrachtung des stattfindenden und des potentiellen Verkehrs (Potentialaufteilung genannt) erforderlich ist.

Die Potentialaufteilung ist die konsequente Erweiterung des 4-fach-Split des stattfindenden Verkehrs um den „Nicht-Verkehr“ zu einer ganzheitlichen Betrachtung des gesamten potentiellen Verkehrs<sup>3)</sup>. Diese Erweiterung ist zulässig, da die ermittelten Mobilitätskennwerte Mittelwerte für alle betrachteten Personen sind. Bei der Potentialaufteilung wird unterstellt, daß eine Person, sobald sie mobil wird, die gleiche durchschnittliche Wegeanzahl durchführt wie eine vorher schon mobile Person. Für die Anwendung ist jedoch vornehmlich die Veränderung der Anzahl der mit den einzelnen Verkehrsmitteln durchgeführten Wege und unter Umständen die Veränderung der Verkehrsleistung bei den Verkehrsmitteln interessant. Zur Beantwortung dieser Frage wird die Wegebilanz verwendet.

Die Wegebilanz besteht aus dem Modal-Split des stattfindenden Verkehrs und der Mobilität aller. Das Produkt aus der Mobilität aller und dem Modal-Split-Anteil ergibt die Anzahl der Wege je Verkehrsmittel. Die Veränderung dieser Menge deckt die Veränderung der Wegeanzahl bei den einzelnen Verkehrsmitteln auf. Dieses Verfahren soll nun zur Verdeutlichung anhand eines realen Beispiels demonstriert werden.

### 3.3 Berechnungsbeispiel zum induzierten Verkehr

Das Beispiel bezieht sich auf Veränderungen im Verkehr in der Stadt Aachen zwischen den Jahren 1986 und 1988. In diesen Zeitraum fielen folgende Veränderungen der relevanten verkehrsbestimmenden Parameter:<sup>2)</sup>

- Anstieg des Haushaltsnettoeinkommens von 3384,- DM auf 3906,- DM
- Anstieg des BAFöG-Satzes von 690,- DM auf 710,- DM
- Einführung der netzweit gültigen, übertragbaren AachenKarte
- Steigerung der Betriebsleistung im ÖPNV
- Anstieg der mittleren Parkplatzsuchzeit durch Anwohnerparkzonen
- Rückgang der Benzinpreise von 0,95 DM/l auf 0,92 DM/l
- Anstieg der Pkw-Grundkosten von 0,1495 DM/km auf 0,155 DM/km.

Aufgrund dieser Maßnahmen verändern sich die Kenngrößen der Mobilität wie folgt:

Tabelle 2: Kenngrößen der Mobilität in Aachen

	OHNE-Fall 1986	MIT-Fall 1988	Veränderung
Gesamtsystem-Widerstand	55,575	54,904	-0,671
Mobilität der Mobilen	3,77	3,82	+0,05
Verkehrsbeteiligung	70,68%	71,15%	+0,47
Mobilität aller	2,66	2,72	+0,06

Die Summe des induzierten Verkehrs beträgt demnach

$$\frac{2,72 - 2,66}{2,66} \cdot 100 = +2,26\%$$

Aus dem Modal-Split des stattfindenden Verkehrs und der Verkehrsbeteiligung läßt sich nun die Potentialaufteilung bestimmen.

Tabelle 3: Modal-Split des stattfindenden Verkehrs für Aachen 1986 und 1988

	zu Fuß	Fahrrad	ÖPNV	MIV		Σ
Split 1986	30,25%	7,46%	13,40%	48,89%		100%
Split 1988	30,01%	7,37%	14,14%	48,48%		100%

Tabelle 4: Potentialaufteilung für Aachen 1986 und 1988

	zu Fuß	Fahrrad	ÖPNV	MIV	Nicht-Verkehr	Σ
1986	21,38%	5,27%	9,47%	34,56%	29,32%	100%
1988	21,35%	5,24%	10,07%	34,49%	28,85%	100%
Veränd.	-0,03	-0,03	+0,60	-0,07	-0,47	0,00

Der Nicht-Verkehr stellt das Komplement der Verkehrsbeteiligung zu 100% dar. Seine Änderung um 0,47%-Punkte bedeutet, daß der Anteil der mobilen Verkehrsbevölkerung (Einwohner und Einpendler) um den entsprechenden Anteil größer geworden ist.

Die Änderungen der Verkehrsmengen bei den einzelnen Verkehrsmitteln aus Verlagerung und induziertem Verkehr zeigt die Wegebilanz.

Tabelle 5: Wegebilanz für Aachen 1986 und 1988

	zu Fuß	Fahrrad	ÖPNV	MIV	Nicht-Verkehr	$\Sigma$
1986	30,25%	7,46%	13,40%	48,89%	–	100%
1988	30,01%	7,37%	14,14%	48,48%	–	100%
266 Wege	80,47	19,84	35,65	130,05	–	266
272 Wege	81,62	20,05	38,46	131,87	–	272
Veränd.	+1,15	+0,21	+2,81	+1,82	-5,99	0
rel. Veränd.	+1,43%	+1,06%	+7,88%	+1,40%	–	–

Es zeigt sich als Folge der getroffenen Maßnahmen ein deutlicher Zuwachs der Fahrtenanzahl im ÖPNV. Das Berechnungsergebnis von 7,88% deckt sich unter Berücksichtigung der Genauigkeitsgrenzen von Zählungen sehr gut mit dem entsprechenden Zählergebnis von ca. 7%. Der Zuwachs wird durch die Attraktivitätssteigerung des Angebotes im ÖPNV hervorgerufen und resultiert aus Wanderungsgewinnen von den anderen Verkehrsmitteln, aus Neuverkehr vorher immobilier Personen und aus Mehrverkehr nach wie vor mobiler Personen. Hinzu kommen Verdrängungseffekte vom MIV aufgrund der dortigen Angebotsverschlechterung.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Hypothese, die Mobilität der Mobilen [Wege/Person · Tag] sei vom Verkehrsangebot bestimmt und mit Hilfe der Qualität des Verkehrsangebotes aus einem Widerstandsbudget bestimmbar, bewiesen werden konnte. Der Indikator für die Qualität des Verkehrsangebotes ist durch den Gesamtsystem-Widerstand gegeben. Auch die Mobilitätskomponente Verkehrsbeteiligung ist vom Gesamtsystem-Widerstand abhängig. Damit läßt sich die Mobilität aller als Produkt aus der Mobilität der Mobilen und der Verkehrsbeteiligung berechnen. Diese bildet die Basis zur Quantifizierung des induzierten Verkehrs, der als Mobilitätsänderung infolge von Angebotsänderungen definiert ist, mit Hilfe der Potentialaufteilung und der Wegebilanz.

Als nächster Schritt ist die Berechnung der Verkehrsverteilung in Arbeit. Dadurch wird eine geschlossene Lösung mit Hilfe der berechneten Wegweitenhäufigkeitsverteilung möglich. Zu diesem Zweck wird das verkehrszellenbezogene Angebot in Widerstände umgesetzt. Die daraus entstehenden zellspezifischen Gesamtwiderstände bilden die Grundlage zur Berechnung der zellspezifischen Mobilität mit den hier vorgestellten Methoden.

#### Literatur

- 1) *Hautzinger, H., Kessel, P., Baur, R.*; PROGNOSE AG, Basel  
Mobilitätschancen unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen  
Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Bonn, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 310, 1980
- 2) *Walther, K.*  
Maßnahmenreagibler Modal-Split im städtischen Personenverkehr – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung –  
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen (VIA), Aachen, Heft 45, 1991
- 3) *Vallée, D.*  
Das Verkehrsangebot als Basis zur Berechnung der Mobilität im Stadtverkehr  
Dissertation an der RWTH Aachen  
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen (VIA), Aachen, Heft 49, 1994
- 4) *Kocks Consult GmbH; Zumkeller, D., Poeck, M., Zahavi, Y.*  
Verkehr und Stadt als Interaktionsmechanismus (VUSI)  
Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Nr. 16.39.101/78, Bonn, 1978
- 5) *Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.)*  
Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personenverkehrs Bonn, 1988

#### Abstract

This study develops a method to determine the complex indicators "mobility" [trips/person day] and "Traffic-Participation" in urban traffic. The research is based on a new understanding of the "Traffic Resistance", introduced by Walther. With the help of the Traffic Resistance it is possible to integrate the traffic supply in all its details into the "Gesamtsystem-Widerstand", an indicator of traffic supply quality in a research area, normally a town or city.

The study proposes the hypothesis of an existing Traffic-Resistance Budget for tripmakers. The mobility of tripmakers can be determined as exhaustion of the Traffic-Resistance Budget by the Gesamtsystem-Widerstand, which also determines traffic-participation. From tripmakers' mobility and traffic-participation the mobility of all people can be determined as product of these indicators. Thereupon the quantification of induced traffic (defined as the modification of mobility resulting from modification of the Transportation System Supply) is possible. The calculation works by extending the modal-split of occurring traffic to the "non-traffic" into an integrated view of occurring and potentially traffic.

## Versteigerungen von Bewilligungen für den internationalen Straßengüterverkehr

VON WILFRIED PUWEIN, WIEN

### Das Problem

Mit 1. Jänner 1993 wurden für Straßengütertransporte zwischen den EU-Staaten die Mengenrestriktionen abgeschafft. Die Kabotage wird ab 1. Juli 1998 vollständig liberalisiert. Der Lkw-Verkehr von EU-Mitgliedstaaten mit Drittländern wird aber weiterhin durch bilaterale Abkommen geregelt. Auf der Basis dieser Abkommen werden dem Fuhrgewerbe Fahrbewilligungen (Kontingente) ausgestellt. Nach einem EU-Beitritt von Österreich, Finnland, Schweden und Norwegen verbleiben als für den Lkw-Verkehr relevante Drittländer nur mehr die Schweiz sowie die Staaten Ost- und Südosteuropas. Der EU-Verkehr mit Drittländern bündelt sich in den Ostregionen Deutschlands und in Österreich. Die damit verbundenen Umweltbelastungen erregen den Unmut der Bevölkerung. Der Widerstand der Tiroler gegen das Anschwellen des Transitverkehrs im Inntal hat bereits zu deutlichen Reaktionen der österreichischen Bundesregierung geführt. Im Transitabkommen mit der EU wurde die Zahl der Transitfahrten von Lkw aus der EU auf dem Niveau von 1991 eingefroren. Auch in Deutschland könnten Proteste der entlang der Transitstraßen wohnenden Bevölkerung zu einer restriktiveren Kontingentpolitik führen. Steigende Transportnachfrage und gleichbleibende Kontingente lassen zunehmende Engpässe im Straßengüterverkehr durch Österreich und nach Drittländern erwarten.

Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wäre eine effiziente Nutzung der knappen Transportressourcen anzustreben. Kontingente werden derzeit nicht nach ökonomischen Effizienzkriterien vergeben, sondern überwiegend nach dem Prinzip der „wohlerworbenen Rechte“. Die begünstigten Transportunternehmen können dabei einen von der Knappheit der Kontingente abhängigen Gewinn lukrieren. Dies scheint aus ökonomischer Sicht wenig befriedigend. Ein freier Wettbewerb um die Kontingente würde ein dem knappen Angebot entsprechendes Preissignal setzen, das den optimalen Einsatz der Transportkapazitäten gewährleistet. Außerdem könnten die Renten der Frächter abgeschöpft werden.

*Anschrift des Verfassers:*  
Dr. Wilfried Puwein  
Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung  
Postfach 91  
A-1103 Wien

## 1. Bilaterale und multilaterale Abkommen regeln grenzüberschreitenden Straßengüterverkehr

Die gewerbsmäßige Beförderung von Gütern mit außerhalb der EU zugelassenen Kraftfahrzeugen ist in den meisten EU-Staaten kontingentiert. Die Kontingente verteilt jeweils die nationale Behörde. Es sind Kontingente für Einzelfahrten und Dauerbewilligungen vorgesehen. Im Regelfall basieren die Kontingente auf bilateralen Verträgen nach dem Gegenseitigkeitsprinzip.

Multilaterale Verträge bestehen im Rahmen der Europäischen Verkehrsministerkonferenz (CEMT). Der sogenannte „CEMT-Ausweis“ berechtigt den Besitzer auf ein Jahr zum grenzüberschreitenden fuhrgewerblichen Straßengüterverkehr. Er gilt auch für den Drittlandverkehr (z.B. ein Transport von Belgien nach Ungarn durch einen deutschen Frächter), nicht aber für den Kabotageverkehr (z.B. ein Transport von Budapest nach Sopron durch einen deutschen Frächter). CEMT-Ausweise werden jährlich von den nationalen Behörden an fuhrgewerbliche Unternehmen verteilt. Deutschland verfügt derzeit über 513, Österreich über 27 CEMT-Ausweise. Soll mit den Ausweisen eine möglichst hohe Wertschöpfung (Dienstleistungsexport) erzielt werden, ist ein häufiger Einsatz der CEMT-Ausweise im Drittlandverkehr oder im Wechselverkehr anzustreben, wenn dadurch viele bilaterale Kontingente eingespart werden (so benötigt ein deutscher Frächter, der nicht über einen CEMT-Ausweis verfügt, für einen Transport in die Türkei: Öko-Punkte für den Österreich-Transit, Kontingente für Slowenien, Kroatien, Jugoslawien, Bulgarien und die Türkei).

Den Transitverkehr durch Österreich von in der EU und in Österreich zugelassenen Fahrzeugen regelt bis zum EU-Beitritt Österreichs das Transitabkommen<sup>1)</sup>. Nach dem EU-Beitritt Österreichs bleibt das Transitabkommen in Kraft, da es mit einigen Abänderungen als Protokoll Nr. 9 Bestandteil des Beitrittsabkommens 1994 ist. Das Abkommen gilt auch für Transitfahrten österreichischer Fahrzeuge für Nicht-EU-Staaten. Die Zahl der Lkw-Fahrten bleibt über die Laufzeit der Regelung (gemäß Protokoll Nr. 9 längstens bis Ende 2003) auf dem Niveau des Jahres 1991 beschränkt. Ursprünglich wurden 1,264.000 Fahrten für EU-Staaten und 211.100 für in Österreich zugelassene Lkw vereinbart. Die Transitregelung beruht auf dem Stickoxidausstoß der eingesetzten Kraftfahrzeuge, der mit Öko-Punkten bewertet wird. Die von Österreich herausgegebenen Öko-Punkte werden entsprechend der Verteilung der Transitfahrten im Jahr 1991 auf Österreich und die EU-Staaten aufgeteilt. In Österreich z.B. können Interessenten (heimisches Fuhrgewerbe, Werkverkehr) Öko-Punkte bei den Landesregierungen bzw. im Bundesministerium für öffentliche Wirtschaft und Verkehr beantragen. In Deutschland hat der Bundesminister für Verkehr das bayrische Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für den Güterverkehr mit der Ausgabe der Öko-Punkte für deutsche Unternehmen beauftragt. Den Antragstellern in Österreich und in Deutschland werden die Öko-Punkte im wesentlichen entsprechend den in den Vorperioden durchgeführten Fahrten zugeteilt.

1) Beschluß (92/577/EWG) des Rates vom 27. November 1992 über den Abschluß des Abkommens zwischen der EWG und der Republik Österreich über den Güterverkehr im Transit auf Schiene und der Straße.

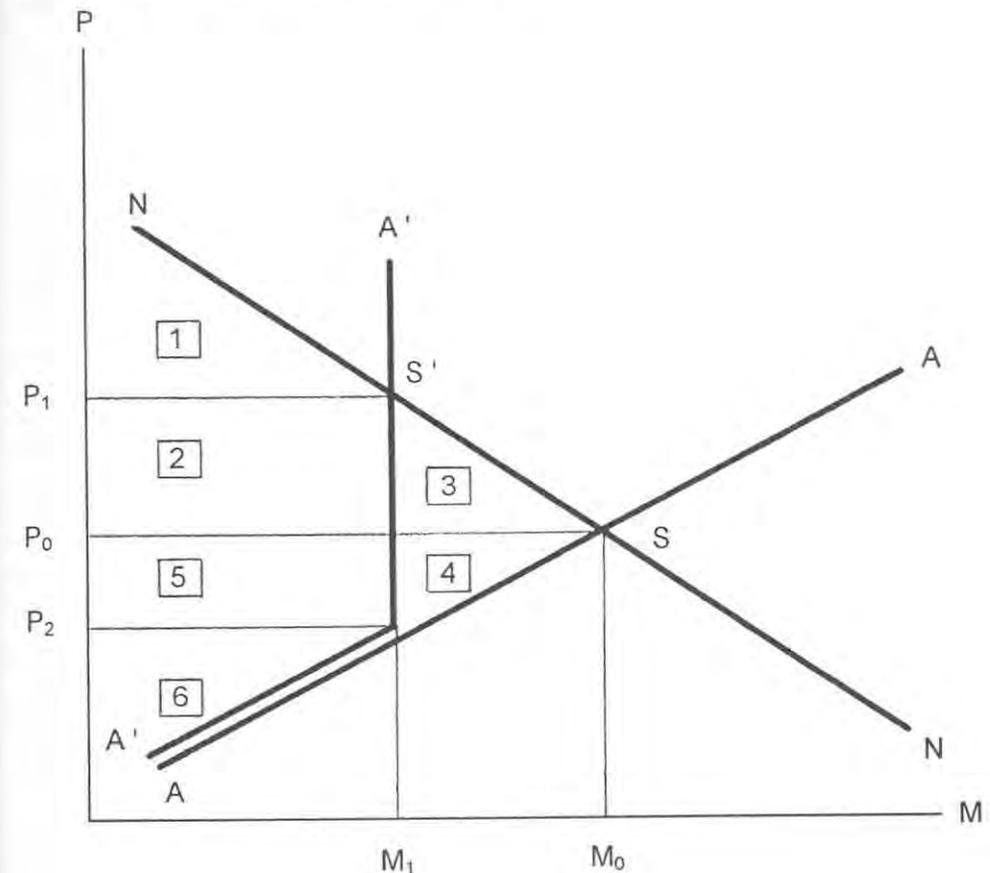
## 2. Renten für die Besitzer der Kontingente

Die Vergabe von Kontingenten ist in den meisten Ländern durch eher formale Verfahren geregelt. In Österreich müssen die Unternehmer Kriterien der fachlichen Eignung und betrieblichen Leistungsfähigkeit des Güterbeförderungsunternehmens für grenzüberschreitende Transporte erfüllen. Vorrangig werden Unternehmer mit Kontingenten beteiligt, die bereits in der Vergangenheit regelmäßige Beförderungen von, nach oder durch die Partnerländer durchgeführt haben. Dieses „Prinzip der wohlverworbene Rechte“ gilt auch für die Öko-Punkte und die CEMT-Ausweise. Der Transportmarkt wird so durch „arrivierte“ Frächter beherrscht, neu hinzukommende dynamische Unternehmer haben aufgrund der Kontingentvergabe nur geringe Chancen, in den Markt einzudringen. Mangelnder Wettbewerb ist in der Regel mit einer geringen Effizienz der Ressourcennutzung verbunden.

Sind die Transportkontingente knapp, können die Beteiligten von dem durch die Verknappung des Transportangebotes gestiegenen Transportpreis profitieren. Die Verursacher der Lärm- und Schadstoffemissionen erhalten so eine zusätzliche Rente. Wie es zu diesen Renten kommt, läßt sich im Modell darstellen: Durch die Kontingentierung der Lkw-Fahrten entstehen sogenannte Wohlfahrtskosten. Die Wohlfahrtskostenanalyse baut auf dem von Marshall<sup>2)</sup> entwickelten Konzept der Konsumenten- und Produzentenrente auf. Über die Veränderung der Renten kann man die Wohlfahrtskosten der Maßnahmen erfassen. Abbildung 1 illustriert die ökonomischen Zusammenhänge. Dabei ist AA die Angebotskurve der Frächter und NN die Nachfragekurve der Verlager. Im Schnittpunkt S der beiden Kurven ergeben sich die Gleichgewichtsmenge für Transporte  $M_0$  und der Gleichgewichtspreis für diese Transporte von  $P_0$ . Die Fläche oberhalb des Gleichgewichtspreises bis zur Nachfragekurve NN ist die Rente der Verlager. Es ist ein Nutzengewinn jener Verlager, die mehr bezahlt hätten als den Preis  $P_0$ . Die Rente der Frächter ist die Fläche unter dem Gleichgewichtspreis  $P_0$  bis zur Angebotskurve AA. Es ist dies der Gewinn aller jener Frächter, die auch schon bei geringeren Transportpreisen Aufträge angenommen hätten. Bei Abbildung 1 besteht die Rente der Verlager aus den Flächen 1 + 2 + 3, die Rente der Frächter aus den Flächen 4 + 5 + 6. Wird nun durch die Kontingentierung die Zahl der Fahrten auf die Menge  $M_1$  begrenzt, so ist A'A' die neue Angebotskurve. Im Schnittpunkt S' der Angebotskurve A'A' mit der Nachfragekurve NN ergibt sich ein Transportpreis  $P_1$ . Bei dem höheren Preis verlieren die Verlager Renten im Ausmaß der Flächen 2 und 3. Die Frächter verlieren wohl die Fläche 4 von ihrer Produzentenrente, gewinnen aber die Fläche 2 hinzu. Die Transporte im Ausmaß von  $M_1$  hätten Frächter schon zum Preis von  $P_2$  durchgeführt. Durch die Kontingentierung können sie jedoch den Preis  $P_1$  erzielen. Die Besitzer von Kontingenten erhalten dadurch eine Kontingentrente im Ausmaß der Flächen 2 + 5. Die Wohlfahrtskosten, die letztlich durch die Maßnahme entstehen, entsprechen den Flächen 3 und 4. Die Verlierer bei einer Kontingentierung sind also generell die Verlager sowie jene Frächter, die keine Kontingente bekommen. Gewinner sind nicht nur die glücklichen Frächter, denen Kontingente zugeteilt wurden, sondern auch die Bewohner von Regionen, für die sich durch den verringerten grenzüberschreitenden Güterverkehr die Umweltqualität verbessert.

2) Marshall, A., Handbuch der Volkswirtschaftslehre, 1. Band, Stuttgart-Berlin, 1905.

Abbildung 1: Entstehung der Kontingentrente



## 3. Wettbewerb bei der Vergabe der Kontingente

Das gegenwärtige System der Vergabe von Kontingenten ist wenig befriedigend:

- Es verzichtet auf Marktmechanismen, durch die über den Preis der „beste Wirt“ für die knappe Ressource Transportkapazität gefunden werden könnte.
- Es schöpft allfällige Kontingentrenten nicht ab.

Eine Möglichkeit, den effizientesten Nutzer von Kontingenten zu finden, sind Versteigerungen. Der Unternehmer, der glaubt, aus der Transportbewilligung einen höheren Gewinn erwirtschaften zu können als seine Konkurrenten, wird mehr bieten. Das Kaufangebot richtet sich nach der Differenz zwischen erwartetem Transportpreis und den Produktionskosten für die Transportleistung.

Hohe Transportpreise und eine relativ preisunempfindliche Nachfrage bestehen im Straßengüterverkehr für Transporte von hochwertigen Gütern, für Transporte, die eine rasche Verfügbarkeit des Transportmittels, große Pünktlichkeit und kurze Transportzeiten erfordern, für Spezialtransporte und für Transportfälle, in denen ein konkurrierender Bahntransport mit hohen An- und Abfuhr- sowie Umladekosten verbunden ist. Die Produktivität der eingesetzten Arbeitskräfte und Fahrzeugnutzlasten bestimmt hauptsächlich den Unterschied der Kosten der Frächter.

Kontingente (ebenso Öko-Punkte und CEMT-Ausweise) sind viele, jeweils identische Objekte, die gleichzeitig angeboten werden sollen. Die traditionellen Auktionsverfahren (die „Englische Auktion“ beginnt mit einem Mindestpreis, die „Holländische Auktion“ geht von einem Höchstpreis aus, der bis zum Preis des Erstangebots gesenkt wird) sind eher für die Versteigerung von Einzelobjekten oder Partien von Objekten geeignet und werden öffentlich abgeführt. Bei öffentlichen Verfahren kann es erfahrungsgemäß leicht zu Absprachen unter den Bietern kommen.<sup>3)</sup>

Auktionen für viele identische Objekte werden in der Regel als Ausschreibungsverfahren mit schriftlichen Angeboten durchgeführt. Beispiele dafür sind die Wertpapierpensionsgeschäfte der Deutschen Bundesbank, die Versteigerung von Treasury Bills und Treasury Bonds durch das Finanzministerium der USA, Elektrizitätsauktionen in England und die geplanten Versteigerungen von Verschmutzungsrechten.<sup>4)</sup>

Hier stehen grundsätzlich zwei Verfahren zur Verfügung:

Im Bestpreisverfahren (sealed-bid auction) erhält der Höchstbieter die gewünschte Menge zu dem von ihm gebotenen Preis. Dieses Verfahren schöpft ähnlich der „Holländischen Auktion“ die Renten der Nachfrager ab. Die Rente entspricht der Differenz zwischen dem Preis, den der Käufer für das Objekt geboten hat, und dem Preis, zu dem das letzte identische Objekt verkauft wurde (Markträumungspreis, Gleichgewichtspreis). Die Differenzen zwischen den von einzelnen Käufern gebotenen Preisen ergeben sich aus den unterschiedlichen Nutzenerwartungen.

Das Einheitspreisverfahren (vickrey auction) sucht den Gleichgewichtspreis, zu dem das gesamte Angebot verkauft ist (der Markt geräumt ist). Das Verfahren sei anhand eines Beispiels erklärt: Angeboten werden 1.000 Kontingente für grenzüberschreitende Gütertransporte. Die Frächter werden eingeladen, Preis und Zahl der gewünschten Kontingente schriftlich zu nennen. Die 1.000 Kontingente werden, beginnend mit dem höchsten Preisangebot, auf die Frächter verteilt. Als Preis für alle Kontingente gilt das Preisangebot für das 1.001. Kontingent. Der Preis befindet sich so im Pareto-Optimum. Im Einheitspreisverfahren wird letztlich nur die Kontingentrente abgeschöpft, die Produzentenrente bleibt den Frächtern erhalten. Theoretische Überlegungen und Experimente haben gezeigt, daß

3) Feldman, A., Mehra, R., "Auctions", IMF Staff Papers, 1993, 40(3), S. 485-511.

4) Bolle, F., „Effiziente Auktionen für viele identische Objekte“, Referat bei der Jahrestagung 1992 des Vereins für Socialpolitik in Oldenburg vom 30. 9. bis 2. 10. 1992.

dennoch das Einheitspreisverfahren höhere Einnahmen bringt als ein Verfahren, bei dem der jeweils gebotene Preis zu zahlen ist.<sup>5)</sup> In Singapur sind die Pkw-Zulassungspapiere nach diesem System zu erwerben. Es würde sich auch für die Vergabe von Landrechten in der Luftfahrt (Slots) anbieten.

#### 4. Realisierung eines Ausschreibungsverfahrens für Kontingente

Unter den beschriebenen Verfahren scheint das Einheitspreisverfahren für die Vergabe der Kontingente besonders geeignet. Nach dem gegenwärtigen Stand der bilateralen und multilateralen Straßengüterverkehrsabkommen könnten die nationalen Behörden nur Kontingente und CEMT-Ausweise für Fahrten im Ausland sowie Öko-Punkte für Transitfahrten durch Österreich an heimische Unternehmer vergeben. Zur Umsetzung eines wettbewerbsorientierten Vergabemodells sind nicht nur die damit verbundenen Rechtsprobleme zu lösen, auch grundsätzliche ökonomische Probleme sind zur Kenntnis zu nehmen:

- Im grenzüberschreitenden Verkehr stehen die heimischen mit ausländischen Frächtern im Wettbewerb. Bei der Feststellung ihres Preisangebotes für Kontingente haben sie daher zu berücksichtigen, ob die von nationalen und ausländischen Behörden für bestimmte Transporte ausgegebenen Kontingente im fraglichen Zeitraum knapp werden könnten, weil sich nur dann eine Kontingentrente ergäbe.
- Müssen einseitig die heimischen Frächter Kontingente ersteigern (d.h. nur ihnen wird die Kontingentrente abgeschöpft), so erwächst ihnen daraus ein gewisser Wettbewerbsnachteil. Die ausländischen Frächter könnten nämlich ihre Kontingentrente weiterhin vollständig lukrieren und ihre relativ bessere Ertragslage zur qualitativen Verbesserung ihres Transportangebotes, zum Aufbau oder Ankauf von Unternehmen im Partnerland oder zur Abstützung von Niedrigtarifangeboten in Perioden nützen, in denen die Kontingente nicht knapp sind.
- Die Wettbewerbsverzerrung könnte nur behoben werden, wenn in- und ausländische Frächter für den Erwerb der Kontingente gleichgestellt sind. Dazu müßte die herrschende Regelung des grenzüberschreitenden Straßengüterverkehrs europaweit grundlegend geändert werden. Anstelle bilateraler Quoten wären länderweise die Zahl der Kontingente für Lkw-Fahrten über Landesgrenzen festzulegen und der Erwerb der Kontingente international auszuschreiben. Frächter, die z.B. Transporte zwischen Deutschland und Rumänien durchführen wollten, hätten Kontingente in Deutschland, Österreich, Ungarn und Rumänien zu ersteigern. Zudem sollten, als Voraussetzung für den fairen Wettbewerb beim Erwerb der Kontingente, die kostenwirksamen Rahmenbedingungen (Besteuerung, Arbeitsrecht, Sicherheitsnormen) des internationalen Straßengüterverkehrs harmonisiert werden.

5) Milgrom, P., "Auctions and Bidding: A Primer", Journal of Economic Perspectives, 1989, 3(3), S. 3-22.

- Aus theoretischer Sicht wäre eine internationale Ausschreibung der Kontingente bei harmonisierten Wettbewerbsbedingungen die „beste“ Lösung. Angesichts der zu erwartenden Schwierigkeiten, die herrschenden Regelungen zu ändern, scheint aber als „zweitbeste“ Lösung lediglich die einseitige Versteigerung der Kontingente an heimische Frächter gangbar. Durch die Abschöpfung der Kontingentrente wären diese zwar etwas benachteiligt, doch bliebe ihnen bei voller Auslastung der Bewilligungen der Marktanteil von 50% gesichert.

Ein Ausschreibungs- und Vergabeverfahren könnte grob skizziert so aussehen:

Die nationale Behörde bietet heimischen Frächtern sowie den Betreibern von Werkverkehr Kontingente (ebenso Öko-Punkte und CEMT-Ausweise) an. Das Angebot könnte sich auch an Verlader richten, die so erworbene Bewilligungen dann an die von ihnen beauftragten Frächter weitergeben.

Ein Teil der Kontingente wird einmal jährlich angeboten, der andere Teil in kürzeren (monatlichen) Abständen. Im Zuge der Jahresvergabe sollten vor allem Frächter (oder Verlader) ihren Jahresbedarf für absehbare regelmäßige Transporte decken. Die kurzfristigeren Termine könnten sich zu einer Form von Spotmärkten entwickeln.

Die Zuteilung der Kontingente an die Bewerber beginnt mit dem Höchstpreisangebot. Als Preis gilt für alle Kontingente das Preisangebot des ersten Bewerbers, der keinen Zuschlag mehr erhält.

Zu klären sind außerdem Fragen der Höchstzahl von Kontingenten pro Bewerber (Unternehmen), der Gültigkeitsdauer von monatlich ausgegebenen Kontingenten, der Rückgabe von nicht benötigten Kontingenten und der Kontrolle. Die verladende Wirtschaft wird vor allem daran interessiert sein, daß sich die Kontingente nicht auf wenige Frächter konzentrieren, die dann durch erhöhte Frachtpreise Oligopolrenten abschöpfen könnten.

Mit den Einnahmen aus der Vergabe der Kontingente sollten Maßnahmen zur Verringerung der Belastungen für Anrainer der Fernstraßen gefördert werden.

## 5. Abschließende Beurteilung

Eine Ausschreibung der Kontingente hat verschiedene Auswirkungen: Zunächst sei hervorgehoben, daß ein Ausschreibungsverfahren die Transportkosten gegenüber einer freien Vergabe der Kontingente nicht erhöht. Der Transportpreis wird nämlich durch die Zahl der ausgegebenen Kontingente bestimmt, das Ausschreibungsverfahren schöpft nur eventuelle Renten der Frächter ab. Damit ergeben sich auch keine zusätzlichen negativen Auswirkungen auf den internationalen Handelsverkehr. Nachteile aus der Regelung haben lediglich jene Frächter, die bisher bei der Verteilung der Bewilligungen bevorzugt wurden.

Die Argumente gegen die Einführung von Wettbewerbsmomenten zitieren gerne den „ruinösen Wettbewerb“. Sicher werden neue, in den Markt für grenzüberschreitende Straßengütertransporte eindringende Unternehmen für Bewegung sorgen. Leistungsstarke Frächter werden sich aber weiterhin behaupten.

### Mit einer Versteigerung

- ergeben sich bessere Chancen für leistungsfähige Frächter, am grenzüberschreitenden Güterverkehr teilzunehmen und damit die Voraussetzung für eine effiziente Nutzung von knappen Transportkapazitäten,
- werden Renten, die den Frächtern aus knappen Kontingenten erwachsen, abgeschöpft und können zur Neutralisierung externer Kosten des Straßengüterverkehrs eingesetzt werden.

### Abstract

The trans-EU-boundary trucking is still regulated in bilateral treaties. The permitted number of transit trips of trucks registered in Austria and in the EU was capped at the 1991 level in Austria's transit treaty with the EU. A restrictive quota policy with respect to trucking permits will cause occasional capacity bottlenecks. The permits will be in high demand by trucking firms, since transport rates will increase as a result of scarce supply. In the past permits have been distributed free of charge according to the "established interest" rule: firms which already in the past had carried out regular transport activities to or through the respective partner countries have received priority treatment. In this way the road transport business has come to be dominated by a number of firms which have been in the business for a long time. It was nearly impossible for new dynamic firms to enter the market. In general, this lack of competition leads to low efficiency. One way to determine who is the most efficient user of a permit would be to auction off the permits. A firm which expects to obtain higher profit from a permit than its competitors would be willing to offer a higher price. A sealed bid auction could be a uniform price auction with the rent going to the public hand. These auction revenues could be used to finance measures to reduce environmental damages caused by trucks.

## Verkehrswege, Raumnutzung, Sozialprodukt und Staatshaushalt: Zum ökonomietheoretischen Horizont infrastruktureller Verbesserungen für Beförderungsprozesse

VON ERHARD MOOSMAYER, BONN

v. st. a  
v. f. k. b  
s

Die beobachtende Vernunft des Menschen befähigt ihn, sich zu den Resultaten seiner eigenen Aktivitäten, seiner Kooperation mit anderen und des gesellschaftlichen Umganges mit der Natur affirmativ oder kritisch zu verhalten. Dabei schweift seine Reflexion gleichsam mühelos von der Gegenwart in Vergangenheit und Zukunft, nach links und rechts, vorwärts und rückwärts. Auch alle humanen Handlungen spielen sich in enger Verbundenheit mit Zeit und Raum ab. Das trifft etwa auf Bewegungen von Personen und von Gütern zu. Einmal eignet Beförderungsvorgängen jeweils eine bestimmte Dauer. Zeit beansprucht jedoch auch alles, was sie indirekt in Gang setzen. Zum anderen kommen Beförderungsvorgänge irgendwo her, und sie sollen irgendwo hin. Außerdem können sie auch insoweit indirekte Folgen zeitigen, als sie räumliche Gegebenheiten verändern. Während zwar auch andere Instrumente als verkehrliche zum Beispiel die Dynamik einer Volkswirtschaft beeinflussen können, diese jedoch ausnahmslos Effekte mit zeitlicher Dimension hervorbringen, entspringen nicht alle räumlichen Effekte räumlichen Absichten, die sich allerdings auch mit verkehrsfremden Instrumenten verfolgen lassen. So stehen Beförderungsvorgänge zur Zeit in einer Mengenvereinigungs-, zum Raum indessen in einer Mengendurchschnittsbeziehung.

### 1. Spatiale Relevanz des Verkehrswesens

Die Kategorie der Zeit und jene des Raums verharren ihrerseits nicht voneinander isoliert. Stattdessen bedarf die ökonomische Evolution in jedem ihrer Stadien einer ganz bestimmten Raumordnung. Nicht von ungefähr konnte die Volkswirtschaft Stufe um Stufe eine Leiter emporklimmen, die an die Überwindung von Räumen ansteigende Ansprüche stellte: Von der Naturalwirtschaft (Eigenversorgung, Tausch) über die Geldwirtschaft zur Kreditwirtschaft griff sie vom einzelnen Privathaushalt über die Kommune und die Region zum Staat und zum globalen Handel immer weiter aus. Wie hätte sie das ohne Beförderung von Personen, Gütern und Informationen vollbringen können? Gewiß ging und geht die Kolonisation des Raums nicht beliebig vor sich. Vielmehr mußte und muß sie sich an räumlichen Bedingungen orientieren, die die Lage gewerblicher Betriebe zwischen Quellen von Vorprodukten, Fertigwaren und Endverbrauch mitbestimmen. Diese Bedingungen gliedern sich in natürliche und kulturelle. Zu den natürlichen Standortfaktoren gehören verkehrliche und außerverkehrliche, etwa einerseits Flüsse, Seen, Meere und Topographien, andererseits Klima und geologische Determinanten im weitesten Sinne, zu den kulturellen etwa einerseits Fahrzeugtypen, Wegebeschaffenheit und Stationsdichte, andererseits Produktions-

technik sowie die Verfügbarkeit tüchtiger Arbeitskräfte und verwertbarer Roh- und Hilfsstoffe. Natürliche und juristische Personen berücksichtigen derartige Prädiktoren, wenn sie für die Stätten der Herstellung von (Sach- und/oder Dienst-) Leistungen, die sie begehren, mithin für Wohn-, Besorgungs-, Bildungs-, Kultur- und Arbeitsstätten, nach optimalen Standorten fahnden, d.h. nach Standorten, die ihnen die geringsten Kosten (in weitestem Sinne, vor allem aber unter Berücksichtigung der räumlichen Dispersion von Lagerstätten, Konsumtion, Agglomerationen, Erwerbspersonen und Transportokkasionen) verursachen. Die Geschichte der Menschheit veranschaulicht ebenso wie die Gegenwart, daß sich natürliche Bedingungen kultivieren lassen. Fingiert, daß alle außerverkehrlichen konstant bleiben, können offenbar technische und organisatorische Fortschritte im Verkehrswesen, die Beförderungskosten senken oder größere Entfernungen überwinden und Absatz- und Beschaffungsmärkte zugunsten von Massen- oder Großserienproduktion mit fallendem Stückaufwand ausdehnen, die Lage optimaler Standorte beeinflussen. Jedes Stadium der technischen und organisatorischen Entwicklung im Verkehrswesen und außerhalb seiner kennt ein Optimum der Vorteile, die interregionale Differenzierung, Spezialisierung und Koordinierung der individuellen und der kollektiven Wohlfahrt beschieren, die mithin sowohl diesseits als auch jenseits eines solchen Optimums hinter ihrem Potential zurückbleibt. Für die praktische Verkehrspolitik erweist es sich als äußerst wichtig, sich diese fast triviale Einsicht stets aufs neue zu vergegenwärtigen. Denn nur dann leuchtet die Erkenntnis ein, daß sich sogar Maßnahmen, die Beförderungsvorgänge verteuern, empfehlen, wenn sie zugleich eine überkompensierende Verbilligung außerverkehrlicher Prozesse beschieren, und umgekehrt sich Maßnahmen verbieten, die Beförderungsvorgänge verbilligen, wenn sie zugleich eine überkompensierende Verteuerung außerverkehrlicher Prozesse zufügen. Das gesamte Verkehrswesen läßt sich als Innovation begreifen, die sich ereignete und die existiert, weil sie in der Volkswirtschaft mehr Ressourcen für zusätzliche Leistung oder für zusätzliche „Muße“ entbindet als beansprucht. Funktionsfähiger Wettbewerb sorgt dafür, daß die Vergütung, die es empfängt, auf die Dauer und im Durchschnitt ihren Kosten entspricht. Der vom Verkehrswesen in historischer Dynamik gestiftete Ersparnisüberschuß kann ebenso als „Sozialnutzen“ gelten, wie aus struktureller Unvollkommenheit von Verkehrsmärkten resultierende Unterdeckung von Beförderungsaufwand zur Gewährleistung eines ausreichend großen Sozialprodukts beizutragen vermag. Sinngemäß gleiches trifft mutatis mutandis für den Wandel der intermodalen Verkehrsstruktur zu. Es kann zu folgenschweren Irrtümern der Verkehrspolitik führen, das Verkehrswesen nach wie vor mehr oder weniger isoliert zu betrachten, anstatt es mental in gesamtwirtschaftliche Kreisläufe einzuordnen. Um die heutige Situation moderner Volks- und Verkehrswirtschaften adäquat einzuschätzen, lohnt es sich obendrein, sich wenigstens in groben Zügen in Erinnerung zu rufen, wie es zu ihnen kam. In einer Marktwirtschaft gehorcht die Entwicklung des Verkehrswesens ganz überwiegend gleichsam objektiven Impulsen, die die Bevölkerung und die Synergetik dezentraler Steuerungsinstanzen aussenden und die der Staat lediglich auf indirektem Wege ordnungs- und investitionspolitisch beeinflusst und beeinflussen darf. Im wesentlichen muß er auch seine verkehrspolitischen Aktivitäten an der größtenteils autonomen Entwicklung der Volkswirtschaft und des Verkehrswesens ausrichten. Diese Entwicklung verlief nicht so, wie sie verlief, weil mächtige Interessenverbände dafür sorgten, sondern umgekehrt hängt die Macht von Interessenverbänden davon ab, wie sich Produktionsstrukturen und Besiedlungsformen entwickeln.

## 2. Innovationen, Strukturwandlungen und Verkehrswesen

Niveau und intermodale Zusammensetzung des Bedarfs an Beförderungsleistungen folgen Veränderungen im Verkehrswesen selbst und solchen in der übrigen Volkswirtschaft (die hier Produktion und Distribution von Leistungen ebenso umfassen möge wie biologische, soziale und migratorische Merkmale der Bevölkerung). Veränderungen, die sich im Verkehrswesen selbst ereignen, spiegeln die Erfindung neuer Antriebe und neuer Gefäße wider (Räder und animalische Energien, Gewässer- und Windkräfte, Dampfkraft, Verbrennungsmotore, Propellerantrieb, Düsenantrieb bzw. Segel- und Treidelschiffe, Dampfschiffahrt, Motorschiffe, Schleppschiffahrt, Schubschiffahrt; Tragbahnen, von Tieren gezogene Droschken und Fuhrwerke, mit Benzin oder Dieselstoff betriebene Autos und Lastkraftwagen; Lokomotiven mit Kohle-, Diesel- und Elektroantrieb; Segel-, Propeller- und Düsenflugzeuge; Rohrleitungen zum Transport flüssiger und verflüssigter Stoffe). Veränderungen im übrigen Produktionsbereich verkörpern sich in innovativen Herstellungsverfahren und Erzeugnissen (Werkzeuge, Maschinen, Automaten, Roboter bzw. Verdrängung von Kohle durch Mineralöl, Erdgas, Kernkraft und Sonnenenergie, von Metallen und von Holz durch Kunststoffe, von Wolle durch synthetische Fasern, von Primär- durch Sekundärenergie, schriftliche Informationen durch digitalisierte u. dgl. m.).

Diese Veränderungen im Verkehrswesen und in der übrigen Volkswirtschaft haben sowohl zeitliche als auch räumliche Konsequenzen: Einmal beschleunigen sie Beförderungsvorgänge, zum anderen schwächen sie die Bedeutung natürlicher Standortfaktoren für die Beanspruchung von Flächen (Beispiel: Anders als Eisenerze lassen sich Kunststoffe ubiquitär „an Ort und Stelle“ gewinnen, d. h. dort, wo ihre Verarbeitung erfolgt). Die Auswirkungen solcher Konsequenzen für das Verkehrswesen beruhen vor allem darauf, daß der Anteil von fixen und von variablen Elementen an den („internen“) Beförderungskosten von Verkehrszweig zu Verkehrszweig schwankt, so daß sich der eine eher dazu eignet, große Einzelladungen über weite, andere hingegen eher dazu, kleine über kurze Entfernungen zu befördern und der Wettbewerb auf Verkehrsmärkten sich verschärft, wo es darum geht, große Einzelladungen über kurze oder kleine über weite Entfernungen zu befördern. Hinzu kommt, daß die technischen und die organisatorischen Fortschritte im Verkehrswesen und in der übrigen Volkswirtschaft das Wachstum des Sozialprodukts beschleunigen. Der Anstieg von Kontrakt- und von Residualeinkommen aber, die private Haushalte und Unternehmen empfangen, weckt Wünsche nach besseren Wohn- und Betriebslagen. Im großen und ganzen finden sich heutzutage Gebäude privater und öffentlicher Administration, gewerblichen Spezialhandels, kollektivkulturellen Angebots und mit Mietwohnungen von unteren und von oberen Einkommenschichten in Stadträndern, Wohnhäuser mit einem Geschloß bis zu dreien und Zentren der massenhaften Versorgung mit Gütern des alltäglichen Bedarfs sowie für Wohnungseinrichtung und Freizeitbeschäftigung „auf der grünen Wiese“.

Großräumlich kennzeichnet Deutschland eine polyzentrische Struktur mit einer topographisch weiten Streuung vielfältiger Wirtschaftsschwerpunkte, teilweise erheblichen Disparitäten im Hinblick auf Besiedlungsdichte sowie Wirtschaftskraft und Lebensqualität. So erfahren auch in der Personenbeförderung junge Verkehrsmittel massive Unterstützung

von quasi-objektiven Trends: Dünne, weitmaschige Verkehrsströme machen den Betrieb mit spurgebundenen Fahrzeugen intraregional unrentabel. Dies hauptsächlich in der Personenbeförderung und das Bestreben der „verladenden Wirtschaft“, eigene Lagerhaltung zu minimieren und deshalb die kontinuierliche An- und Ablieferung kleiner Partien einer diskretionären von großen vorzuziehen, in der Güterbeförderung begünstigt den Kraftwagen zu Lasten von Konkurrenten.

Das ordnungspolitische Postulat, erst für gleiche Wettbewerbsbedingungen zu sorgen, nährt sich hauptsächlich aus dem Phänomen, daß die „betriebswirtschaftlich“ von der Entwicklung der Produktions- und der Beförderungstechnik begünstigten Verkehrszweige in höherem Umfang als ihre Konkurrenten nicht nur solche Kosten verursachen, die das praktische Verhalten von Anbietern und Nachfragern auf Verkehrsmärkten beeinflussen, sondern darüber hinaus „externalisierte“ Unfall- und /oder Umweltschäden. (Übrigens zeigt sich am Beispiel des Zusammenhangs zwischen Einkommenshöhe und Besiedlungsform die mindestens relative Autonomie bestimmter Phänomene, die manch einer voreilig auf der Sollseite des Personenkraftwagens verbucht: Stellt man sich utopisch vor, daß die Eisenbahn ein dünn besiedeltes Gebiet „um jeden Preis“ ebenso dicht erschließt wie das faktisch das Auto kann, so darf als wahrscheinlich gelten, daß sich dann nicht viel weniger wohlhabende Einwohner ihren Traum vom eigenen Reihenhaus erfüllen.)

Alles in allem führt die Entwicklung des Verkehrswesens und der übrigen Volkswirtschaft eine bestimmte Form der Raumbeanspruchung herbei. Verträgt sie sich, die sich gleichsam dem „unsichtbaren“ Walten „ungezügelter Marktkräfte“ verdankt, mit einschlägigen Zielen der Bevölkerung? Diese Ziele laufen ganz allgemein darauf hinaus, daß überall zwar nicht gleichartige, wohl aber gleichwertige Lebensbedingungen obwalten sollen. Die Theorie von Raumordnung und regionaler Evolution bietet Modelle an, die je nachdem, welche empi-

Abbildung 1: Allokative Staatsaufgaben



Anmerkung zur Abbildung  
Vielfalt der Wirkungen von Straßenbauinvestitionen (Verbilgung der Personen- und der Güterbeförderung, Minderung der Häufigkeit und der Schwere von Unfällen, Entlastung der Umwelt, Beiträge zur regionalen Wirtschaftsentwicklung und zur räumlich gerechten Wohlstandsverteilung) als Beispiel praktischer Anwendung: Ausdehnung der „Bürgerbeteiligung“ auf alle Betroffenen statt Beschränkung auf Anwohner.

rischen Daten für ihre Anwendung in Betracht kommen („Kalibrierung“), enthüllen, ob ein konkretes Gebiet ohne staatliche Gegensteuerung zu einem Optimum oder zu einem Pessimium tendiert („Konvergenz“ versus „Divergenz“, „Gleichgewicht“ versus „Polarisation“). Hier manifestiert sich eine konkrete Ausprägung des abstrakten Postulats, ordnungspolitisch eine zweckadäquat optimale Mischung aus kompetitiven und regulativen Funktionsmechanismen zu installieren (vgl. Abb. 1). Praktisch läßt sich die Bundesregierung unabhängig von parlamentarischen Mehrheitsverhältnissen von der Einsicht leiten, daß es insofern Fälle gibt, in denen sich eine aktive Raumordnungs- bzw. Regionalpolitik empfiehlt. Das schlägt sich auch in der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) nieder.

### 3. Räumliche Wirkungen im Kontext der BVWP

#### 3.1 Entwicklung der BVWP

Nach der Gründung der Bundesrepublik Deutschland blieben die Planungen für die verschiedenartigen Bundesverkehrswege zunächst nach wie vor weitgehend voneinander getrennt. Nach zwei Dezennien hatte aber ein stürmischer Wirtschaftsaufschwung dazu geführt, daß Unternehmen und private Haushalte alles in allem über hohe Einkünfte verfügten, die den Zwang lockerten, sich auf bestimmte Lebensstile und Produkte zu beschränken. Zugleich verlangsamte sich allmählich das Wachstum des Sozialprodukts, während der Wandel von Besiedlungs- und Produktionsstrukturen nicht aufhörte, sich zu beschleunigen. Infolgedessen verschärfte sich die Gefahr von Fehlinvestitionen auch für die öffentliche Hand. Deshalb schickte sich die Bundesregierung Ende der sechziger Jahre an, die Planungen der Bundesverkehrswege enger miteinander zu koordinieren. Die so zustande kommenden Bundesverkehrswegepläne gelten jeweils für mindestens ein Jahrzehnt und erfahren alle fünf Jahre eine Aktualisierung.

#### 3.2 Prinzipien der BVWP

##### 3.2.1 Konformität mit Demokratie und Marktwirtschaft

Marktwirtschaft zeichnet sich dadurch aus, daß die Steuerung der Beschaffungs-, Produktions- und Absatzprozesse so weit wie möglich dezentral erfolgt. Das Bestreben, im Wettbewerb existentiell mindestens ausreichend gut abzuschneiden, zwingt private Haushalte wie private Unternehmen dazu, anzubieten, was angemessen zu entgelten sich Nachfrage bereit findet. Offenheit der Märkte vereitelt dabei wenigstens auf die Dauer monopol- oder -monopsonistische Ausbeutung: Gewinne ziehen Konkurrenten an, während Verluste sie vertreiben. Dieser Mechanismus verbürgt in Verbindung mit raschem Informationsfluß und rascher Reaktion auf erfolgsbedeutsame Änderungen hohe Systemeffizienz. Auch viele einzelne Steuerungsinstanzen sehen sich jedoch oft zu sorgfältiger Vorbereitung von Entscheidungen über Investitionen mit langen Betriebsdauern genötigt. Das verträgt sich mit Marktwirtschaft durchaus. Deren Gegenpol bildet nicht Planung, sondern zentraler Dirigismus. Gewiß gab und gibt es dirigistische Planung. Richtet sich aber Planung nach individuellen Bedürfnissen, anstatt diese ohne Not zu regulieren, steht sie mit Marktwirtschaft und

Demokratie in Einklang. Um quantifizierte Projektwirkungen zu bewerten, verwendet die BVWP deshalb Indikatoren, die individuelle Bedürfnisse der potentiell begünstigten und jene der potentiell belasteten Einwohner so unverzerrt wie irgend möglich widerspiegeln, nämlich faktische oder simulierte Wettbewerbspreise.

##### 3.2.2 Ökonomische Dominanz

Vielfältige Natur- und Kulturwissenschaften liefern Erkenntnisse, die es ermöglichen, die mannigfachen Eigenschaften von Roh- und Hilfsstoffen, Werkzeugen und Maschinen, Arbeitskräften und Fertigungserzeugnissen zweckadäquat zu beurteilen. Auf Grund solcher Urteile fallen – und zwar unvermeidlicherweise bei unterschiedlichem Grad an Vollständigkeit der eingeholten Informationen – Entscheidungen über Konsum und Produktion.

Eine Abwägung physisch ganz heterogener Eigenschaften setzt aber eine dimensionale Homogenisierung voraus. Bei ihr handelt es sich um nichts anderes als um einen ökonomischen Prozeß, der mithin materiellen wie immateriellen Aspekten Rechnung tragen muß und kann. Auch die BVWP macht sich diese Reichweite des Ökonomischen zunutze. Erteilt beispielsweise die Ingenieurwissenschaft Auskunft über den spezifischen Treibstoffverbrauch von Motoren, die Psychologie über die individuelle Einschätzung von Arbeits- und Freizeit, die mathematische Statistik über die Unfallwahrscheinlichkeit bestimmter Wegetypen, die Physik über die Abhängigkeit des Schallpegels von Verkehrsstärke und -mischung, die Chemie über die stoffliche Zusammensetzung emittierter Abgase, die Medizin über zumutbare Schwellen der Belastbarkeit von Menschen gegenüber Lärm und Schmutz sowie die Biologie über die Sensibilität von Fauna und Flora, so schlagen sich all diese Erkenntnisse letztlich in dem ökonomischen Aufwand nieder, den Einwohner auf sich nehmen, um Beförderungsleistungen nachzufragen, anzubieten oder zu erdulden.

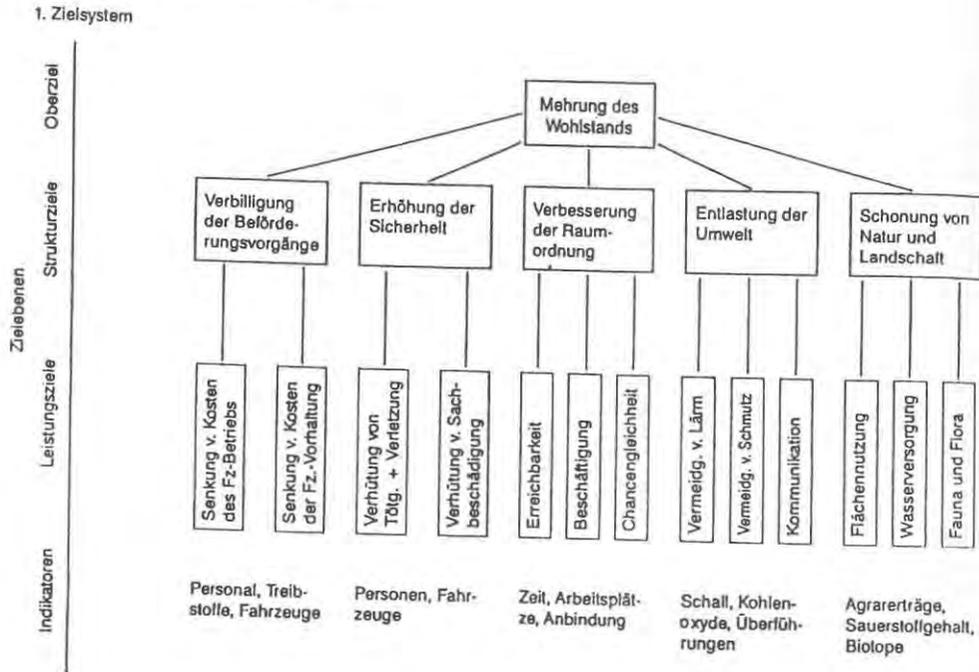
##### 3.2.3 Multieffektuale Balance

Ebenso wie die anderen öffentlichen und privaten Aktivitäten sollen auch Maßnahmen an verkehrlicher Infrastruktur humane Wohlfahrt mehren. Dazu sollen sämtliche der verschiedenartigen Projektwirkungen beitragen. Schon insoweit gebührt ihnen in der BVWP prinzipiell gleicher Rang. Das hat zur wichtigen Folge, daß in ihr es nicht in Betracht kommt, Projekte nicht nach all ihren bekannten Wirkungsarten zu beurteilen, sondern nur nach einigen von ihnen. Für eine in diesem Sinne umfassende Abwägung, ohne die übrigens nicht zuletzt die Verwaltungsgerichtsbarkeit keinem Verkehrswegebau mehr zustimmt, spricht außerdem, daß Ressourcen, die bestimmte Wirkungsarten hervorbringen können, sich im allgemeinen auch (direkt oder indirekt) dazu eignen, andere zu erzielen. So gelten Vergeudung von Arbeitskraft für Kompensation vorschnellen Fahrzeugverschleißes, Verschwendung von Treibstoffen, übermäßiger Verbrauch knapper Zeit für zu langsame Reisen, unbedingte Verletzungen, Beeinträchtigung der Erwerbsfähigkeit durch Lärm oder giftige Abgase sowie Unterbeschäftigung durch Verzicht auf finanzierbare und volkswirtschaftlich rentable Verkehrswegebauten in förderungsbedürftigen Regionen gleichermaßen als wohlfahrtmindernd. Im nicht besonders realistischen, aber doch erhellenden Extremfall beschwört eine Beschränkung darauf, alle einschlägig verfügbaren Ressourcen für Umweltschutz zu verwenden, die Gefahr herauf, eine Bevölkerung dem Unfall-, Hunger- und/oder Erfrierungstod auszuliefern.

3.3 Instrumente der BVWP

Der verkehrszweigübergreifenden Koordination und Integration ökonomischer Systemanalysen von Projekten der BVWP dienen ein allgemeingültiges Zielsystem, vergleichbare Kapazitätsmaße infrastrukturellen Angebots, gemeinsame Prognosen der Nachfrage nach Beförderungsleistungen sowie einheitliche Quantifizierungs- und Evaluierungsmethoden, wozu auch eine einheitliche Skontierungsrate und eine einheitliche Kostenstrukturierung gehören (vgl. Abbildungen 2, 3 und 4).

Abbildung 2: Entscheidungskriterien



Vor- und Nachteile von Verkehrswegeprojekten zeigen sich am Vergleich zwischen zwei Zuständen. Der eine enthält neben dem ohnehin vorhandenen Angebot an verkehrlicher Infrastruktur das Resultat von Maßnahmen zur Erneuerung von Verkehrswegen sowie verkehrsinfrastrukturelle Erweiterungsbauten, die ohne weiteres als dringlich gelten können („Referenzfall“), der andere außerdem solche, denen neue Untersuchungen bescheinigen sollen, ob sie mehr Vor- als Nachteile zu verheißen („Planfall“).

Läßt man all die Maßnahmen Revue passieren, die dafür in Betracht kommen, verkehrliche Infrastruktur für verschiedene Beförderungsmittel zu verbessern, so scheint es sich auf den ersten Blick um ein schier unübersehbare Vielfalt zu handeln. Für bewertungstechnische Zwecke genügt jedoch ein begrenzter Umfang an Projekttypen, die eine Richtschnur dafür

Abbildung 3: Projektbewertung in der Fortschreibung des Bundesverkehrswegeprogramms

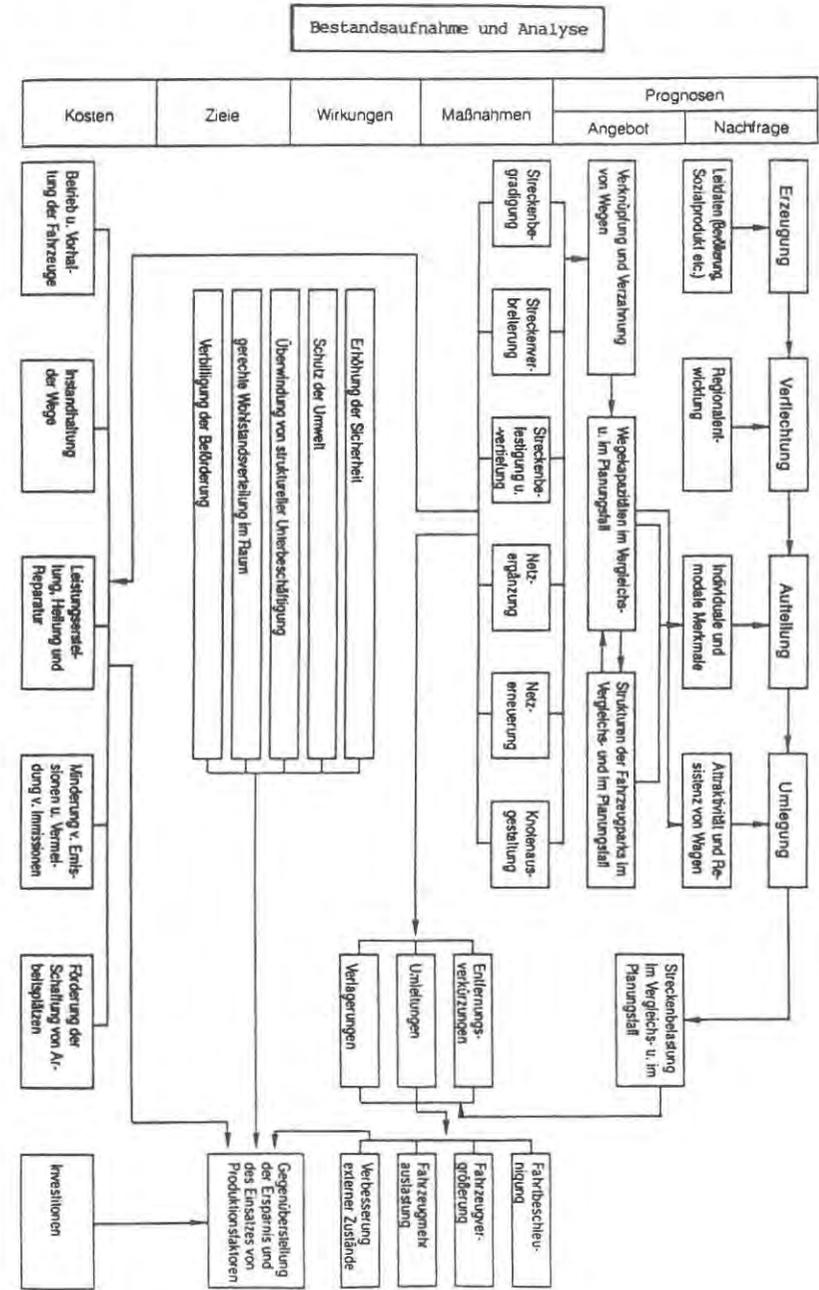
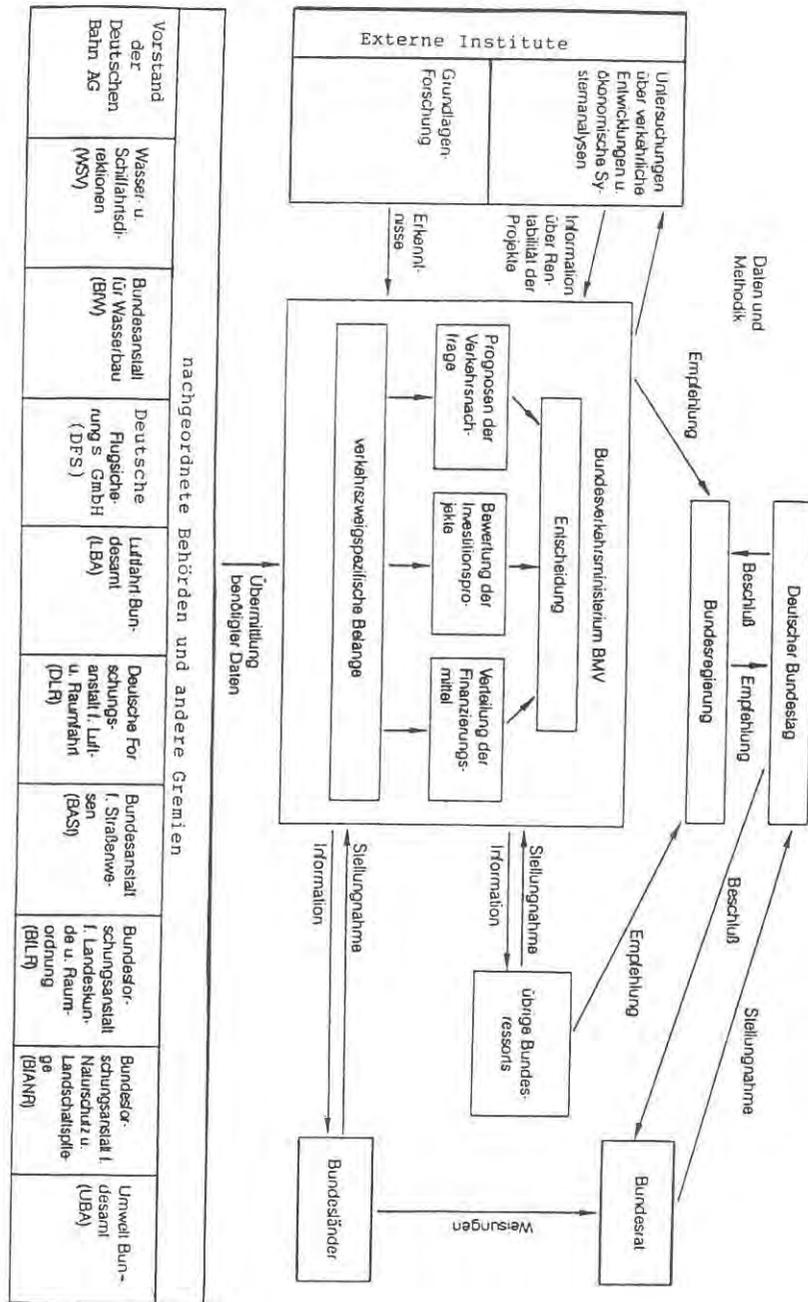


Abbildung 4: Organisation der Bundesverkehrswegeplanung



liefern, die vielfältigen Infrastrukturmaßnahmen sinnvoll zu gruppieren. Diese können nämlich bestehende Wegenetze verdichten bzw. ergänzen oder vertikal (z.B. durch Fahrbahnverstärkung bzw. Fahrinnenvertiefung) oder horizontal (z. B. durch Verbreiterung oder Begradigung) kapazitiv erweitern. Dadurch bessern sich Beförderungsbedingungen entweder unmittelbar oder im Gefolge veränderter Wahl von Routen (intramodale „Umlenkung“ von Fahrzeugströmen) oder Verkehrsmitteln (intermodale „Verlagerung“ von Reisenden bzw. Fracht). Auch quantitative Wirkungsarten treten nicht in unbegrenztem Umfang auf. Sie können nur die Gestalt von vergrößerten Fahrzeugen, erhöhter Fahrzeugauslastung, verkürzter Beförderungsweiten, beschleunigter Fahrten oder ausgewechselter Verkehrsträger annehmen, also nur Fahrzeuge oder auch Fahrleistungen einsparen oder intermodal substituieren und teils dadurch, teils darüber hinaus Fahrten sicherer und/oder umweltfreundlicher machen sowie Regionen besser erschließen und /oder miteinander verbinden.

Volkswirtschaftliche Rentabilität drückt die BVWP im Verhältnis projektbedingter Ersparnisse an internen und externen Beförderungskosten zum Wert projektbedingt beanspruchter Ressourcen aus. Dabei bemessen sich die absolute und die relative Dringlichkeit danach, in welchem Umfang „freigesetzte“ Produktionsfaktoren vom Projekt gebundene übertreffen. Dies rechtfertigt sich wie jede andere Rationalisierungsmaßnahme durch technischen oder organisatorischen Fortschritt daraus, daß so erzielte „Gewinne“ zusätzliche Erweiterungsinvestitionen speisen können, die dazu führen, den Überschuß an freigesetzten Produktionsfaktoren mindestens „auf Umwegen“ und längerfristig anderweitig zu beschäftigen, und so das Wachstum des Sozialprodukts beschleunigen.

Intramodal projektbedingt ändern können sich Beförderungskosten

- personalen und sächlichen Zeitaufwands für Fahrten durch
  - Verkürzung von Beförderungsweiten
  - Beschleunigung
  - vergrößerte Auslastung suprastruktureller Kapazitäten
- des Betriebs von Fahrzeugen durch
  - Verkürzung von Beförderungsweiten
  - vergrößerte Auslastung suprastruktureller Kapazitäten
  - Anstieg oder Verringerung von Fahrgeschwindigkeit
- der Verkehrsunsicherheit durch
  - bauliche Transformation unfallträchtiger Wegetypen in unfallarme
  - Umleitung von Fahrzeugströmen von unfallträchtigen Wegetypen auf unfallarme
- verkehrsbedingten Lärms durch Umleitung von Fahrzeugströmen von Wegen mit lärmempfindlichem Umfeld auf andere
- verkehrsbedingter Luftverschmutzung durch
  - Umleitung von Fahrzeugströmen von Wegen mit schadstoffsensiblen Umfeld auf andere
  - Senkung von Treibstoffverbrauch
- verkehrsbedingter Störung innerörtlicher Kommunikation und baulicher Vorzüge durch Umlenkung von Fahrzeugströmen auf außerörtliche Wege

- öffentlicher Förderung wirtschaftsschwacher Regionen durch verkehrsinfrastrukturelle Steigerung regionaler Standortgunst für eine Ansiedlung gewerblicher Betriebe
- unerwünschter Raumordnung durch infrastrukturelle Beiträge zu erwünschter.

#### 3.4 Anwendungsbereich der BVWP

Ökonomische Systemanalysen erstrecken sich auf erwogene Erweiterungsinvestitionen (Aus- und Neubauten) in Wege der Eisenbahn, von Kraftfahrzeugen und der Binnenschifffahrt. Bundesverkehrswegeprogramme umfassen Projekte, die ökonomische Systemanalysen als volkswirtschaftlich ausreichend rentabel ausgewiesen haben oder die ohnehin als dringlich gelten.

#### 4. Räumliche Wirkungen der BVWP im besonderen

Ökonomische Systemanalysen für die BVWP erfassen drei Arten von räumlichen Projektwirkungen. Bei der einen handelt es sich darum, die Lebensbedingungen in benachteiligten Gebieten zu verbessern. Ausgangspunkt dafür, entsprechende Wirkungen zu quantifizieren und zu evaluieren, bildet die raumordnungspolitische Konzeption, überall gleichwertige Lebensbedingungen herbeizuführen, indem ein abgestuftes System „Zentraler Orte“ eine infrastrukturelle Ausstattung (z. B. administrative Einrichtungen, Ausbildungsstätten, Versorgungszentren, allgemeine und spezielle Krankenhäuser) erfährt, auf die das jeweilige Umland zurückgreifen kann. Als Indikatoren für den Grad räumlichen Lebensstandards dient einmal die Qualität verkehrlicher Anbindung, zum anderen materieller Wohlstand (gemessen etwa am durchschnittlichen Einkommen pro Einwohner). In dem Umfang, in dem ein Wegeprojekt die verkehrliche Anbindung (gemessen an Entfernung und „Luftliniengeschwindigkeit“ zwischen Zentralen Orten) zwischen räumlichen Zentren in benachteiligten Gebieten verbessert, trägt es dazu bei, überall gleichwertige Lebensbedingungen zu verwirklichen.

In Abhängigkeit vom teilräumlichen Wohlstandsniveau findet die erforderliche Monetarisierung dieser Beiträge durch Ableitung aus bereits ermittelten Ersparnissen an Beförderungskosten statt (bis zu 30 Prozent der Fahrzeug-, Reisezeit und Beschäftigungsnutzen). Pate steht für ein derartiges Verfahren das Ophelimitätstheorem, daß sich das Gewicht von ein und demselben Nutzen invers zum Wohlstandsniveau verhält. Insoweit zählen raumordnerische Projektvorteile zu den allokativen Nutzen.

Die zweite Art räumlicher Projektwirkungen stützt sich auf die Erfahrung, daß investive Maßnahmen an verkehrlicher Infrastruktur die Standortgunst wirtschaftlich schwacher Regionen steigern können. Allerdings kann das nur dann gelingen, wenn das vorhandene Angebot an Verkehrswegen einen Engpaß bildet und seine Vergrößerung gemeinsam mit andersartiger Regionalförderung (wie Zubereitung für gewerbliche Zwecke geeigneter Flächen, Qualifizierung von gegenwärtigen und künftigen Erwerbspersonen, fiskalische Anreize für private Investitionen u. dgl. m.) erfolgt. Dann allerdings können der (Neu- und/oder Aus-) Bau und die Nutzung von Verkehrswege durchaus dazu beitragen, konjunktur-

neutrale Unterbeschäftigung zu überwinden, indem sie regionale Attraktivität zur Ansiedlung gewerblicher Betriebe erhöhen.

Das ökonomietheoretische Paradigma, das solche Kalkulationen rechtfertigt, läuft auf die Hypothese hinaus, daß auch bei ausreichend hohem Niveau konjunkturellen Gleichgewichts in förderungsbedürftigen Regionen Erwerbspersonen unbeschäftigt bleiben, und zwar nicht deshalb, weil die „effektive Gesamtnachfrage“ zu wünschen übrig läßt (mit der Folge „erzwungener Arbeitslosigkeit“), sondern weil es ihnen an räumlicher Mobilität fehlt (mit der Folge „freiwilliger Arbeitslosigkeit“), und daß die mobilen Privatinvestitionen im Referenzfall in vollbeschäftigte Regionen fließen, wo sie dann in profitabler Weise Erwerbspersonen beschäftigen, die im Planfall als „Grenzarbeitskräfte“ Beschäftigung finden. Die Bewertung projektbedingt erhaltener und geschaffener Arbeitsplätze geschieht gemäß dem „Alternativkostenpostulat“, Referenzfälle zu optimieren, um eine Überschätzung von Nutzen und eine Vernachlässigung mittelheterogener, aber zweckhomogener Maßnahmen zu unterbinden, mit dem einsparbaren Aufwand alternativer Regionalförderung durch Gebietskörperschaften.

Die dritte Art räumlicher Projektwirkungen drückt projektbedingte Erleichterung internationalen Austauschs von Informationen und Leistungen aus. Dieser Nutzen kann bis zu einem Zehntel von projektbedingten Ersparnissen an Fahrzeug- und Zeitkosten ausmachen. Die entsprechende Ableitung erfolgt gemäß dem Verhältnis der Verkehrsstärke auf dem jeweiligen Projekt zu jener, die im Referenzfall Strecken in seinem Einflußbereich belastet.

#### 5. Wirkungsspektrum der BVWP im einzelnen

Idealiter gehorcht der okzidentale Existenzmodus einem transzendentalen und rationalistischen Weltbild. Das impliziert, Verantwortlichkeit nicht allein gegenüber naturalen Instanzen anzuerkennen und auf die vorgefundenen Umstände in konsistenter Weise einwirken zu wollen. Zu den naturalimmanenten und den metanaturalen Postulaten gehört es, eigenes und fremdes Wohl hegen zu sollen. Das gegenwärtig eigene zu fördern muß deshalb Schranken dulden, die einmal in futuralen Ansprüchen, zum anderen in interindividueller Rücksicht wurzeln. Für die praktische Applikation dessen liefert die in konditionalen Grenzen ausbildbare Vernunft teils logische, teils aus Einsicht in empirische Strukturen und Prozesse ableitbare Maximen. Sie dienen sowohl isoliertem als auch kooperativem Verhalten gegenüber der eigenen Person, gegenüber anderen einzelnen, gegenüber der eigenen Gruppe, gegenüber anderen und gegenüber der Natur. Dabei bemißt sich der stets von Ungewißheit und Irrtum erschwerte Erfolg im Rahmen nonasketischer Ethik nach ausgewogenen Verbesserungen von realen Situationen. In ökonomischer Terminologie bedeutet das, daß sich der Aufwand humaner Aktivität in überkompensierenden Vorteilen rechtfertigen muß. Der Bau wie die Benutzung von Wegen beanspruchen für infrastrukturelle Investition und Wartung sowie suprastrukturelle für Beförderung von Personen und von Fracht „volkswirtschaftliche Ressourcen“: Bodenschätze, andere Naturgaben, Umweltmedien, „produzierte Produktionsmittel“ (Werkzeuge, Maschinen, Automaten) und Arbeitskraft etwa. Daher

muß die Funktion der verfügbaren Verkehrswege darin bestehen, daß sie es „mehr“ Ressourcen ermöglichen, anderweitige sinnvolle Zwecke zu erfüllen, als sie teils binden, teils „verzehren“. Konkret spiegelt sich die so erzielte „Freisetzung“ von Ressourcen darin, daß die Bereitstellung von begehrten Sach- und Dienstleistungen mit Verkehrswegen, also räumliche Spezialisierung und Koordinierung, weniger Produktionsfaktoren benötigt als ohne sie. Handelt es sich bei diesen Vorteilen um makroökonomische Nutzen, so beschert die Verwirklichung zusätzlicher Verkehrswegeprojekte, die technische und organisatorische Beförderungsbedingungen verbessern, mikro- und mesoökonomische. Projektfolgen, die innerhalb des Zuges von Produktionsstufen auftreten, zu dem die jeweilige Maßnahme gehört, können als „direkte Effekte“ gelten. Auf projekthomogenen Stufen heißen sie, wie etwa Ersparnisse an Fahrzeugkosten, „primär“. Sekundäre Effekte rufen Verkehrswegeprojekte beispielsweise hervor, wenn sie Kosten transportintensiver Gewerbebetriebe senken (und diese dadurch eventuell zu Arbeitsplätze schaffenden Erweiterungsinvestitionen anregen). Indirekte Effekte können Verkehrswegeprojekte vor allem in Form von Umweltentlastungen hervorrufen. Vergüten diejenigen die Faktoren, die sie beanspruchen bzw. empfangen, so ereignen sich „interne“ Kosten bzw. Nutzen. Exemplarisch veranschaulicht subventionierter Verkehrsbetrieb externe Kosten, nicht gewinnträchtiger Beitrag zum Sozialprodukt externe Nutzen.

#### 5.1 Fahrzeugeinsatz

Seine Kosten verursacht der Fahrzeugeinsatz vor allem infolge von zeitablaufbedingter Verrottung, leistungsbedingtem Verschleiß, Verbrauch von Treibstoff und gegebenenfalls Bedienung durch Fahrpersonal. Bei konstanten Beförderungsmengen, Ruhe- und Wartungszeiten beeinflusst die Fahrgeschwindigkeit die durchschnittliche Fahrleistung, die Beladbarkeit die Zahl der benötigten Fahrzeuge. Maßnahmen an verkehrlicher Infrastruktur können diese Determinanten modifizieren (s. o.). Im großen und ganzen liefern existierende Märkte die für die Bewertung der physischen Projektwirkungen benötigten Wettbewerbspreise unmittelbar. Allerdings können sich pretiale Korrekturen gebieten, um Elemente (z. B. indirekte Steuern) auszuklammern, die keinen oder schon anderweitigen Ressourcenverzehr repräsentieren.

#### 5.2 Reisezeit

Für gewünschte Ortsveränderungen müssen Reisende Zeit aufwenden, die dann für alternative Zwecke fehlt. Nutzeneinbußen, die sie dadurch erleiden, eignen sich dafür, Reisezeit zu bewerten („Opportunitätskosten“). Verkehrsinfrastrukturelle Investitionen können Fahr-, Zu- und Abgangs-, Warte- und Umsteigezeiten verkürzen.

#### 5.3 Unfallgeschehen

Einer Teilnahme am Verkehrsgeschehen haftet das Risiko von Schädigung durch Unfälle an. Dieses Risiko schwankt intermodal von Verkehrszweig zu Verkehrszweig und intramodal von Route zu Route. Maßnahmen an verkehrlicher Infrastruktur können die wegetypische Unfallträchtigkeit mindern sowie Beförderungsprozesse auf relativ sichere Verkehrsträger

verlagern und auf relativ sichere Verkehrswege lenken. Die Bewertung von Unfallfolgen (tödliche, andere schwere und leichte Verletzungen, Sachbeschädigung sowie legislativer, administrativer und exekutiver Aufwand) muß sich im wesentlichen simulierter Wettbewerbspreise („Schattenpreise“) bedienen. Zur Anwendung pflegen insofern entweder eher objektive oder eher subjektive Ansätze zu gelangen. Zu jenen zählen z.B. Produktionsverluste, Heilungs- und Versorgungsaufwand, zu diesen die Bereitschaft zur Entrichtung spezieller Entgelte („willingness-to-pay“) etwa für Assekuranzvorkehrungen oder die Mehrvergütung für gefährvolle Erwerbstätigkeit.

#### 5.4 Umweltbelastungen

Umweltbelastungen beeinträchtigen humanes Wohlbefinden, humane Gesundheit und humane Erwerbsfähigkeit. Teils direkt, teils indirekt mindern sie daher zugleich das Sozialprodukt. Bemerkbar machen sie sich hauptsächlich in Form von Lärmbelästigung und Luftverunreinigung. Beförderungsprozesse tragen zu Umweltbelastungen in erheblichem Umfang bei. Dabei handelt es sich in erster Linie um Fahr- und Motorengeräusche sowie um schädliche Abgase. Verkehrswegeprojekte können entfernungs- und geschwindigkeitsabhängigen Treibstoffverbrauch senken sowie Beförderungsprozesse auf relativ umweltfreundliche Verkehrsträger bzw. Routen (mit allenfalls schwach umweltsensiblen Umfeld) „verdrängen“. Um so weniger bedarf es umweltschützender Maßnahmen wie eines Einbaus von schalldämmenden Fenstern in Gebäude bzw. einer Ausstattung von Fahrzeugen mit emissionsmindernden Vorrichtungen (z. B. Filtern, Katalysatoren). Marktpreise von Vermeidungsmaßnahmen liefern Maßstäbe dafür, projektbedingte Umweltentlastungen zu bewerten.

#### 5.5 Ökologische Risiken

Sowohl die Anlage als auch die Benutzung von Verkehrswegen kann Natur und Landschaft bedrohen. Das trifft auf Fauna und Flora ebenso zu wie auf Agrarwirtschaft, Hydrosphäre und Erholungsgebiete. Hier fällt es besonders schwer, angemessene Schattenpreise ausfindig zu machen. Hinzu kommen Probleme genügender Akzeptanz, die von Positionsdifferenzen im Hinblick auf religiöse oder anthropozentrische Fundierung moralischer Einstellungen noch eine Verschärfung erfahren. In Rücksicht darauf geschieht in der BVWP die Einschätzung ökologischer Risiken von Verkehrswegebauten nicht kardinal oder gar monetär, sondern ordinal oder nominal, ohne daß dies eine evaluatorische Relevanzschmälerung nach sich zieht.

### 6. Die Simulationsproblematik der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP)

Alle Wissenschaften müsen „Modelle“ entwerfen, die mit Hilfe von Symbolen reale Zusammenhänge oder Prozesse so zutreffend wie möglich abbilden. Im Vergleich zu Naturwissenschaften weisen Sozialwissenschaften die Besonderheit auf, keine faktischen Experimente durchführen zu können. Ihnen bleibt nichts anderes übrig, als ihre Hypothesen an Hand

von statistisch transformierten Beobachtungen zu testen. Erkenntnisse darüber zu gewinnen, ob sich „Daten“ mit jeweiligen Theoremen vertragen oder nicht, setzt insoweit in weit höherem Maße als sonst die Fähigkeit zu abstrakten Kombinationen voraus: Was nicht unmittelbar den menschlichen Sinnen Zutritt verschafft, leuchtet nicht ohne weiteres ein. Das gilt auch für verkehrswissenschaftliche Systemanalysen. Um zu vermeiden, sie ganz oder teilweise fehlerhaft zu deuten, kommt es sehr darauf an, sich sorgfältig zu vergegenwärtigen, wie sie Informationen vor allem über geologische und topographische Bedingungen, über Bau- und Fahrtechnik, über die physikalische, chemische und biologische Beschaffenheit des Umfelds von Beförderungsprozessen, über ökonomische Verhaltensweisen und Preise sowie über Bedarf an Beförderungsleistungen miteinander verknüpfen. Das zeigt sich insbesondere an bestimmten Aspekten der BVWP, die leichter als andere zu Mißverständnissen verleiten.

### 6.1 Volkswirtschaftliche Rentabilität als Ausdruck erfolgreicher Rationalisierung

Unbeschadet der konkreten Form ihrer Wirkungen können Verkehrswegeprojekte nur dann als volkswirtschaftlich rentabel gelten, wenn sie mehr Produktionsfaktoren einsparen als sie solche beanspruchen. Ökonomische Systemanalysen „beschränken“ sich also auf den „allokativen“ Maßstab, während sie den „distributiven“ ebenso ausklammern müssen wie den „stabilisatorischen“. Projektbedingte „Freisetzung“ von Arbeitskräften etwa reichert den erzielbaren Bruttonutzen nur deshalb an, weil sie über kurz oder lang anderweitige Beschäftigung finden. Zum Beispiel gehören (gegenwärtige und künftige!) Erwerbspersonen, die ein ehemaliger Fährbetrieb nicht mehr benötigt, weil eine Meerenge eine „feste Querung“ (Tunnel oder Brücke) erfuhrt, nicht zu den Nach-, sondern zu den Vorteilen der verursachenden Maßnahme.

### 6.2 Intermodale Parallelitäten

Zieht ein Verkehrswegebau Kunden eines konkurrierenden Verkehrszweigs an, deren Beförderungsbedürfnis er volkswirtschaftlich günstiger befriedigen kann, so kann er sich sogar dann lohnen, wenn Fahrgäste oder Ladung verlierende Unternehmen an Erlösen mehr einbüßen als ihre (variablen) Kosten schrumpfen. Die dann nicht mehr direkt gedeckten Fixkosten entstehen nämlich nicht erst, sondern fallen lediglich anderen zur Last als zuvor (z.B. abgabepflichtigen Personen, die keine Leistungen des sich betriebswirtschaftlich verschlechternden Anbieters nachfragen). Übertrifft der Anteil der öffentlichen Hand an den zusätzlichen Nettonutzen, die sich ja in Umsatz- und Einkommenszuwächsen niederschlagen, den zusätzlichen Verlust des betriebswirtschaftlich geschädigten Unternehmens und die infrastrukturellen Investitionsausgaben, so „verbessert“ sich gar der fiskalische Status der Gesamtheit von Gebietskörperschaften und Sozialversicherungsanstalten. Die öffentliche Hand, die sich weigert, ein volkswirtschaftlich hochrentables Projekt zu verwirklichen, um Verkehrsunternehmen zu schonen, denen betriebswirtschaftliche (Zusatz-) Verluste drohen, verletzt mithin nicht allein ihre der Allgemeinheit geschuldeten Pflichten, sondern kann obendrein ihre eigene Lage verschlechtern (letztlich deshalb, weil sie nur ihren Ausgaben, nicht auch ihren Einnahmen Aufmerksamkeit schenkte!).

### 6.3 „Induzierter Verkehr“

Manch einen verführt die Vermutung, daß Neu- oder Ausbau von Wegen Bedarf an Beförderungsleistungen erheblich steigert, dazu, am Segen von investiver Verbesserung verkehrlicher Infrastruktur zu zweifeln. Selbst wenn aber eine derartige Hypothese allgemein ebenso zutrifft wie die mit ihr meist stillschweigend verknüpfte Annahme, daß sogenannter „induzierter Verkehr“ nur oder wenigstens überwiegend Nachteile zufügt, rechtfertigt die gefolgte Befürchtung nichts von vornherein. Es läßt sich nämlich überhaupt nicht von vornherein ausschließen, daß der Nutzenüberschuß, den ein Neu- oder Ausbau von Wegen ohnehin vorhandener Verkehrsnachfrage (und anderen Bereichen) stiftet, den geargwöhnten Schadenüberschuß des „induzierten Verkehrs“ übertrifft. Darüber hinaus kann dieser, sofern er denn tatsächlich auftritt, durchaus mehr Vor- als Nachteile hervorrufen. Zwar kann er zusätzlich Energie verbrauchen, Luft verunreinigen, Lärm erzeugen und Unfälle verursachen. Andererseits kommt er überhaupt nur zustande, wenn sich natürliche und/oder juristische Personen bewogen fühlen, eine bisherige Aktivität einzuschränken, um die so gewonnene Zeit dafür zu verwenden, sich am Verkehrsgeschehen zu beteiligen. Wer so eine Entscheidung trifft, verspricht sich davon offenbar einen individuellen Nutzenzuwachs, den die theoretische Nationalökonomie als „Konsumenten-“ bzw. „Produzentenrente“ abzuhandeln pflegt (bei einer Preiselastizität der Nachfrage von  $-0,5$  entspricht z. B. der durchschnittliche Wert des „induzierten“ Nutzens der Hälfte des übrigen). Ob im Einzelfall solche Renten die internen und externen Nachteile induzierten Verkehrs unterschreiten und dann die anderen Projektnutzen schmälern, erschließt sich eben nur einer kantianisch aposteriorischen Analyse. Für die Entwicklung von Bedarf an Beförderungsleistungen dominieren im übrigen ganz andere Prädikatoren als Verkehrswegebauten, nämlich in erster Linie das Niveau und die Struktur von Bevölkerung und Sozialprodukt sowie das Potential für eine technisch und räumlich optimale Organisation von Produktions-, Beschaffungs- und Versorgungsprozessen. Deshalb entsteht „induzierter Verkehr“ im engeren Sinne, d.h. infolge von Wegebauten, allenfalls vereinzelt und auch dann in nur begrenztem Umfang. Und per Saldo braucht er die Bedingungen dafür, individuelle und kollektive Wohlfahrt zu mehren, durchaus nicht zu verschlechtern, sondern er kann sie sogar per Saldo verbessern.

### 6.4 Schaffung von Arbeitsplätzen

In entwickelten Volkswirtschaften hängen Wohlstand, Gleichgewicht und Stabilität von funktionierender Koordination zwischen differenzierten Produktions-, Distributions- und Konsumtionseinheiten sowie von ausreichend starken Anreizen zu technischen und organisatorischen Fortschritten ab. Theoretische Erwägungen und praktische Erfahrungen zeigen gleichermaßen, daß eine Wirtschaftsordnung mit konstitutioneller Befugnis zu weithin dezentralen Entscheidungen über wirtschaftliche Aktivitäten solche Konditionen besser verbürgen kann als jedes alternative System. Dennoch bleiben Marktwirtschaften mit privatem Eigentum an produktivem Vermögen von Störungen vielfältiger Art nicht verschont: Mindestens partiell beeinflussen andere Determinanten private Ersparnis als private Investitionen (empfangene versus erwartete Einkommen), innovative Betriebsstoffe, Herstellungsverfahren und Fertigerzeugnisse erfordern geeignete Anpassungsprozesse, produktive

Kapazitäten volkswirtschaftlicher Ressourcen wandeln sich mit Zeitablauf und Ausbildungsgüte. So ereignen sich hin und wieder konjunkturelle Schwankungen, strukturelle Umbrüche und individuelle Arbeitsplatzfluktuationen. Fiskalische und monetäre Signale des Staates und des Bankensystems können derartige Gefahren zwar mildern, nicht aber gänzlich verhüten. Zu oft läßt nicht zuletzt das volkswirtschaftliche Beschäftigungsniveau zu wünschen übrig. Daher darf nicht verwundern, daß Bevölkerung und Politik zuweilen mit Übereifer nach Gelegenheiten fahnden, subjektive und kollektive Unzufriedenheit mit wirtschaftlichen Gegebenheiten in Schranken zu halten. Zwar soll Verkehrswegebau in erster Linie dazu beitragen, Voraussetzungen für optimale Besiedlung und Produktion ständig zu verbessern. Gewiß gehört dazu auch, die Standortgunst für wirtschaftliche Prosperität geo- und/oder topographisch, klimatisch und/oder sonstwie benachteiligter Regionen zu steigern, damit sich Unternehmen bewegen fühlen können, gewerbliche Betriebe gerade dort zu bewahren, zu erweitern oder erst zu installieren, wo Erwerbspersonen sogar bei gesamtträumlich konjunkturellem Gleichgewicht auf genügend hohem Niveau keine Beschäftigung finden, etwa weil es ihnen an interregionaler Mobilität mangelt. Auf Antrieb aber erhoffen sich viele nicht erst von der Existenz, sondern schon vom Bau neuer Verkehrswege zusätzliche Arbeitsplätze. Dabei gerät jedoch nicht ohne weiteres in den Blick, daß Umschichtung in öffentlichen Haushalten ebenso wie zusätzliche Fiskalbelastung zur Finanzierung solcher Bauten Beschäftigungsmöglichkeiten in etwa gleichem Umfang einzuengen pflegen. Tatsächlich können Bau und Wartung von Verkehrswegen allenfalls in bescheidenem Maße sonst (unerzwungen) Arbeitslosen zu produktiver Erwerbstätigkeit verhelfen. Den eigentlichen Ausschlag für reale Beschäftigungswirkungen von staatlichen Investitionen in verkehrliche Infrastruktur gibt nun einmal, neben vereinzelter Anhebung regionaler Attraktivität zur Ansiedlung gewerblicher Betriebe, jener Impuls, der daraus resultiert, daß volkswirtschaftlich rentable Verkehrswegeprojekte das wirtschaftliche Wachstum fördern, indem sie es ermöglichen, bestimmte Zwecke von Beförderungsprozessen mit geringerer Beanspruchung volkswirtschaftlicher Ressourcen zu erreichen, und so Produktionsfaktoren dafür entbinden, zusätzliche Beiträge zum Sozialprodukt zu leisten.

### 6.5 Schonung von Natur und Landschaft

Wie ökonomische Systemanalysen für die BVWP ökologische Risiken berücksichtigen sollen, läßt sich nicht allein mit Hilfe einschlägiger Wissenschaften entscheiden. Im Hinblick darauf spielen nämlich normative und pragmatische Vorstellungen eine wichtige Rolle. Zwar gelang es physikalischen, chemischen und last not least biologischen Forschungen, Geheimnisse von Einflüssen schon weitgehend zu lüften, die sowohl Verkehrsweeganlagen als auch Beförderungsprozesse auf Tier- und Pflanzenwelt, Wasserver- und -entsorgung, Atmosphäre und Klima sowie Regenerationskonditionen und landschaftliche Reize ausüben können. Sogar einer angemessenen Transformation entsprechender Erkenntnisse in ökonomische Skalen steht nicht mehr viel im Wege. Allerdings setzt eine Anwendung von faktischen oder simulierten Wettbewerbspreisen auf ökologische Phänomene emotionale und moralische Zustimmung der Allgemeinheit voraus. Einmal läßt hierzulande das erforderliche Verständnis für ökonomische Zusammenhänge viel zu wünschen übrig. Als tief verwurzelt erweist sich insbesondere das Vorurteil, als ob es sich bei der Aufgabe, Natur und

Landschaft zu schonen, im wesentlichen darum handelt, ein ideelles Ziel zu verfolgen, und als ob sich immaterielle Pflichten ökonomischem Maßstab entziehen. Zum anderen gründet ökonomische Bewertung materieller wie immaterieller Tatbestände auf einem Konsens darüber, daß es insoweit darauf ankommt, humane Wohlfahrt zu mehren, leiten sich doch Preise sowohl von Leistungen als auch von Produktionsfaktoren letztlich stets aus menschlichen Bedürfnissen ab. Ob aber ökologische Effekte in ökonomischen Systemanalysen für die BVWP nur insoweit Beachtung verdienen, als sie Menschen begünstigen oder schaden, muß nach wie vor als allzu umstritten gelten, obwohl sich Zweifel an der Zweckmäßigkeit, Schonung von Natur und Landschaft uneingeschränkt anthropozentrisch zu fundieren, nicht damit vertragen, daß sich, wenn ein Verkehrswegeprojekt ökologische Beeinträchtigungen zuzufügen droht, eine umfassende Abwägung mit andersartigen Folgen der erwogenen Maßnahme überhaupt nicht vermeiden läßt. Kann beispielsweise ein querschnittiger Wegebau einerseits ein Biotop schädigen, andererseits jedoch zugleich die verkehrliche Unfallrate des Referenzfalls senken, bedeutet ein Verzicht auf ihn nolens volens, Verletzungen – vielleicht gar tödliche – in Kauf zu nehmen. Indessen empfiehlt es sich, auch Vorurteilen gebührende Aufmerksamkeit zu schenken. Sonst drohen nicht wenige der volkswirtschaftlich rentablen Projekte der BVWP, von vornherein an ungenügender Akzeptanz zu scheitern. Diese Einsicht hat bisher dazu veranlaßt, ökologische Effekte erwogener Maßnahmen an verkehrlicher Infrastruktur auch dort nominal oder höchstens ordinal auszudrücken, wo sich kardinale Kriterien längst anbieten.

### 7. Zukunftsperspektiven der BVWP

Die Methodik ökonomischer Systemanalysen von einzelnen Projekten der BVWP beruht auf der mikroökonomischen Wohlfahrtsökonomik: Situationen gelten so lange als suboptimal, als es mit geeigneten Maßnahmen gelingen kann, die Position von Personen oder Gruppen zu verbessern und (mit oder ohne Kompensation) zu vermeiden, daß sich diejenige anderer verschlechtert. Schon in diesem Rahmen bedürfen die Verfahren zur Schätzung der volkswirtschaftlichen Rentabilität von erwogenen Maßnahmen an verkehrlicher Infrastruktur einer permanenten Aktualisierung. Einmal tut es Prognosen der Verkehrsnachfrage keinen Abbruch, wenn sich Vorstellungen über die weitere Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft sowie über künftigen Bedarf an Beförderungsleistungen im Zeitverlauf wandeln. Zum anderen hören einschlägige Wissenschaften nicht auf, theoretische und empirische Erkenntnisfortschritte zu erzielen, die sich ebenfalls in Bewertungen von Projekten der BVWP niederschlagen müssen. Beispielsweise zeigt ingenieurwissenschaftliche Beobachtung, daß in Verkehrswegeprogrammen des Bundes der Anteil der Ersatzinvestitionen zunehmen muß und zunimmt, wenn der Bedarf an Beförderungsleistungen nicht mehr allzu schnell wächst. Ökonomietheoretische Überlegungen führen aber zu der Vermutung, daß nicht sämtliche Projekte zur Erweiterung der Kapazität von Verkehrswegenetzen von vornherein eine niedrigere volkswirtschaftliche Rentabilität zu verheißen brauchen als all jene, die verkehrliche Infrastruktur lediglich erneuern sollen. Bereits deshalb empfiehlt es sich, ökonomische Systemanalysen für die BVWP auf Ersatzinvestitionen auszudehnen. Ein besonders eindringliches Beispiel für das Erfordernis, wissenschaftliche Erkenntnisfortschritte für die BVWP aufzubereiten, liefern Physik, Chemie, Biologie und Medizin im

Bereich des Umweltschutzes. So stehen erst neuerdings Ansätze dafür zur Verfügung, Folgen aus klimatischer Schädigung durch Emission giftiger Stoffe, die terrestrisches und maritimes Absorptionspotential etwa phylogischer Photosynthese überbeansprucht, auch ökonomisch adäquat zu erfassen und damit Nutzen aus projektbedingter Minderung derartiger Schäden ebenso pretial auszudrücken wie andere Wirkungen. Methodisch verdient auch Berücksichtigung, daß sich Bedürfnisse und reale Preise in unterschiedlichem Tempo zu entwickeln pflegen.

Darüber hinaus jedoch kommt es darauf an, wenigstens komplementär zu ökonomischen Systemanalysen von einzelnen Projekten die BVWP stärker in makroökonomische Zusammenhänge einzubinden. Neu ins Blickfeld gelangende Aspekte verleiten nämlich allzu leicht dazu, die gebotene Abwägung mit eher traditionellen zu vernachlässigen. Seitdem es nicht wenigen so scheint, als ob die unmittelbare Versorgung der Bevölkerung mit materiellen Gütern zumindest im westlichen Teil der nördlichen Hemisphäre als weitgehend ausreichend gelten kann, rücken Belastungen von Umwelt, Natur, Landschaft und Klima ins Zentrum ihrer Besorgnis um das Verkehrswesen. Insoweit muten Beförderungsprozesse allenfalls als notwendiges Übel an. Nicht nur kann eine derartig verengte, ja bisweilen gar eindimensionale Betrachtungsweise dafür zeugen, daß in der ersten, zweiten und dritten Welt verbliebene Mangelzustände keine gebührende Beachtung mehr erfahren, zumal mediale Anschauung direkte mehr und mehr substituiert. Außerdem gerät dabei die Rolle, die das Niveau und die intermodale Struktur des Angebots an Beförderungsleistungen für produktive Besiedlungsformen, Innovationen und intersektorale Produktionsverflechtungen spielen, in Vergessenheit. Zwar legen es schon Einsichten in intra- und intermodale Interdependenzen nahe, fortan aggregierte Resultate aus ökonomischen Systemanalysen mehr oder minder isolierter Verkehrswegeprojekte an der volkswirtschaftlichen Rentabilität alternativer Verkehrswegeprogramme zu eichen.

Im Lichte des wohlbegründeten Wunsches nach ausreichender Akzeptanz der BVWP muß es jedoch als mindestens ebenso wichtig gelten, nicht allein theoretisch einleuchtend, sondern auch empirisch fundiert darüber aufzuklären, welche Einbußen an Sozialprodukt und öffentlichen Einnahmen ex- oder implizit toleriert, wer zugunsten von Stille, sauberer Luft, hemorobischer Natur und reizvoller Landschaft uneingeschränkt postuliert, Verkehr so weit wie möglich überhaupt zu „vermeiden“ und im übrigen so weit wie möglich auf vermeintlich qualitativ superiore Beförderungssysteme zu „verlagern“. Kompetente Auskünfte darüber winken allerdings nur als Frucht ökonomischer Anstrengungen. Vielleicht gibt es zu faktischen Raumstrukturen mit marktwirtschaftskonformer Politik ansteuerbare Alternativen, die weniger Beförderungsprozesse erfordern oder günstigere ermöglichen und sich zugleich zur individuellen und zur sozialen Wohlfahrt indifferent verhalten. Ansonsten aber gebietet es sich, Vor- und Nachteile einer Eindämmung oder Umstrukturierung von Bedarf an Beförderungsleistungen umfassend und sorgfältig gegeneinander abzuwägen, um volkswirtschaftliche Optimalität nicht a priori zu verfehlen.

## Literaturverzeichnis

- Adler, Hans A.*, Economic Appraisal of Transport Projects, Baltimore and London 1987
- Bökemann, Dieter*, Theorie der Raumplanung, München – Wien 1984, insbes. SS. 74 – 81 (Kapitel 2.5.2 „Standorte in Leitungsnetzen der Infrastruktur“), 348 – 373 (Kapitel 6.2 „Faktoren der Standortproduktion“ und 6.3 „Produktionsfunktion für den einzelnen Standort“) sowie 426 – 468 (Kapitel 7.3 „Skizze eines politikeinschließenden Modells des regionalen Gleichgewichts“ und 7.4 „Zur regionalpolitischen Zustands- und Maßnahmenbewertung als Grundlage der Raumplanung“)
- Böventer, Edwin von*,
- Theorie der Raumwirtschaft, in: Handwörterbuch der Wirtschaftswissenschaften (HdWW), sechster Band, Stuttgart – Tübingen – Zürich – New York 1988, SS. 407 – 429
  - Standortentscheidung und Raumstruktur, Hannover 1979
  - Theorie des räumlichen Gleichgewichts, Tübingen 1962, insbes. SS. 38 – 58 (zweites Kapitel „Die Einführung von Transportkosten in die ökonomische Theorie“), 59 – 80 (drittes Kapitel „Globalmodelle für verschiedene Orte oder Regionen mit Transportkosten für den Gütertransport“) und 116 – 119 (sechstes Kapitel, fünfter Abschnitt „Die Einführung von Transportkosten, Zwischenprodukten und unvollkommener Konkurrenz in das Globalmodell“)
  - Die räumlichen Wirkungen von privaten und öffentlichen Investitionen, in: *Arndt, Helmut, und Dieter Swatek (Hrsg.)*, Grundfragen der Infrastrukturplanung für wachsende Wirtschaften, Berlin 1971, SS. 167 – 187
- Boustedt, Olaf*, Grundriß der empirischen Regionalforschung, Teil I: Raumstrukturen, Hannover 1975
- Bücher, Karl*, Die Entstehung der Volkswirtschaft, Tübingen 1919, insbes. SS. 83 – 160
- Buttler, Friedrich, Knut Gerlach und Peter Liepmann*, Grundlagen der Regionalökonomie, Hamburg 1977, insbes. SS. 58 – 97
- Button, K. J.*, Transport Economics, Aldershot 1989 (2nd edition). pgs. 245 – 270 („Transport and Economic Development“)
- Cansier, Dieter*, Umweltökonomie, Stuttgart-Jena 1993
- Carnap, Rudolf*, Der Raum – Ein Beitrag zur Wissenschaftslehre, Berlin 1922
- Cline, William R.*, The Economics of Global Warming, Washington/District of Columbia (D.C.) 1992
- Hampicke, Ulrich*, Naturschutz-Ökonomie, Stuttgart 1991
- Hanusch, Horst*, Nutzen-Kosten-Analyse, München 1987
- Ihde, Gösta B.*, Transport, Verkehr, Logistik, München 1991 (2. Aufl.), insbes. SS. 120 – 184 (Kapitel II.3 „Die gesamtwirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Logistik“ u. II.4 „Die politisch-rechtliche Einflußnahme auf die Logistik“)
- Jochimsen, Reimut*, Ansatzpunkte der Wohlstandsökonomik, Tübingen 1961

Kant, Immanuel, Kritik der reinen Vernunft, Riga 1781 und 1787 (2. rev. Aufl.), Kapitel „Transzendente Elementarlehre“, Erster Teil „Die transzendente Ästhetik“, erster Abschnitt „Von dem Raume“; hier zitiert nach Stenzel, Gerhard, und Walter del Negro (Hrsg.), Immanuel Kant, Ausgewählte Werke, SS. 222 – 224

Kaulbach, Friedrich, Die Metaphysik des Raumes bei Leibniz und Kant, Köln 1960

Kraus, Theodor, Grundzüge der Wirtschaftsgeographie, in: Hax, Karl, und Theodor Wesels (Hrsg.), Handbuch der Wirtschaftswissenschaften, Band II: Volkswirtschaft, Köln und Opladen 1966, SS. 547 – 632

Lauschmann, Elisabeth, Grundlagen einer Theorie der Regionalpolitik, Hannover 1976 (3. Aufl.)

Locklin, D. Philip, Economics of Transportation, Chicago 1944, insbes. pgs. 16 – 19 („Is Transportation Wasteful?“, „Transportation Costs versus other Costs of Production“)

Mishan, Edward J., Cost-Benefit-Analysis, New York – London 1976 (new and expanded edition)

Müller, J. Heinz, Methoden zur regionalen Analyse und Prognose, Hannover 1976 (2. Aufl.)

Musgrave, Richard A., Finanztheorie, Tübingen 1966, insbes. SS. 3 – 32 (erstes Kapitel „Die multiple Theorie des öffentlichen Haushalts“; jeder Leiter von einer der drei Staatsabteilungen Allokation, Stabilisation und Distribution „plant die Durchführung seiner Aufgabe unter der Annahme, daß die beiden anderen Abteilungen ihre Funktionen richtig wahrnehmen“, S. 6)

Pahlke, Jürgen, Welfare Economics, Berlin 1960

Pribram, Karl, Geschichte des ökonomischen Denkens, Zweiter Band, Frankfurt am Main 1992, SS. 866 – 878 (Wohlfahrtökonomik)

Reichenbach, Hans, Philosophie der Raum-Zeit-Lehre, Leipzig 1928

Ricardo, David, Grundsätze der politischen Ökonomie und der Besteuerung, Frankfurt a. M. 1972 (Original: „Principles of Political Economy and Taxation“, London 1817), SS. 107 – 123 (Kapitel IV „Über den auswärtigen Handel“)

Schätzl, Ludwig, Wirtschaftsgeographie 1 (Theorie), Paderborn-München-Wien-Zürich 1992 (4. Aufl.), SS. 50 – 56 (Optimale Distanzen nach Smith, D. M., Industrial Location – An Economic Geographical Analysis, New York 1971)

Smith, Adam, Der Wohlstand der Nationen, München 1978 (Original: „An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations“, London 1776), SS. 19 – 22 z. 612 – 620 (Drittes Kapitel „Die Größe des Marktes – eine Grenze für die Arbeitsteilung“ bzw. Dritter Teil, Erster Abschnitt „Öffentliche Einrichtungen und Anlagen zur Erleichterung von Handel und Verkehr in einem Lande“)

Sombart, Werner, Der moderne Kapitalismus, München – Leipzig 1916 (2. Aufl.), Band II, 1. Halbband SS. 231 – 361 („Das Verkehrswesen“)

Spitzer, Hartwig, Raumnutzungslehre, Stuttgart 1991, SS. 186 – 211 (Infrastruktur und Ubiquität)

Stavenhagen, Gerhard, Geschichte der Wirtschaftstheorie, Göttingen 1969 (4. Aufl.), SS. 465 – 511 („Raumwirtschaftslehre“) und 512 – 542 („Theorie der Außenwirtschaft“)

Tichy, Gunther, Konjunkturpolitik, Berlin – Heidelberg – New York – London – Paris – Tokyo 1988, insbes. SS. 186 – 216 (zur Unterscheidung zwischen klassischer und keynesianischer Unterbeschäftigung)

Tuchfeldt, Egon, Infrastrukturinvestitionen als Mittel der Strukturpolitik, in: Jochimsen, Reimut, und Udo E. Simonis (Hrsg.), Theorie und Praxis der Infrastrukturpolitik, Berlin 1970, SS. 125 – 151

Voigt, Fritz,

– Verkehr, Halbbände I/1, SS. 277 – 511 (zweites Kapitel, zweiter und dritter Abschnitt „Determinanten der Nachfrage nach Verkehrsleistungen“), und I/2, SS. 561 – 782 (drittes Kapitel „Die Einwirkungen der Verkehrsmittel auf die wirtschaftlichen Entwicklungsprozesse“), Berlin 1973

– Die volkswirtschaftliche Bedeutung des Verkehrssystems, Berlin 1960

– Theorie der regionalen Verkehrsplanung, Berlin 1964

Walzer, Michael, Sphären der sozialen Gerechtigkeit – Ein Plädoyer der Pluralität und Gleichheit, Frankfurt am Main – New York 1992 (zur Differenzierung zwischen „gleichen“ und „gleichwertigen“ Lebensbedingungen)

Weber, Adolf, Allgemeine Volkswirtschaftslehre, Erster Band, Berlin 1958 (7. Aufl.), SS. 354 – 366 („§ 30: Der Transport und die Standortfragen“)

Weber, Alfred, Über den Standort der Industrie, 1. Teil: Reine Theorie des Standorts, Tübingen 1909 (2. Aufl. 1922)

Zinn, Karl Georg, Allgemeine Wirtschaftspolitik, Stuttgart – Berlin – Köln – Mainz 1992, SS. 117 – 147 (Wohlfahrtökonomik)

## Abstract

The phrase "Logistical Transport Problem" is created to describe the task of City-Logistics. This problem encloses the following subproblems: the classical Transport Problem, the Location Problem, Knapsack Problem, Routing Problem and Travelling Salesman Problem. City-Logistics has generally the following feature: the goods flows from outside of the city would be driven into a city-terminal "transit terminal". They would be there picked up and then they will be distributed in the city by environment friendly vehicles. The effect of this convicing is reducing the number of moving vehicles in the city. The collected goods need to be transported from the terminal to a set of customers in the city. The distribution of goods must take place subject to many restrictions. Among these restrictions are: each customer places a fixed size shipment and specifies a time window within the suppling can be taken place. All shipments are assumed to be less than the vehicle capacity, and therefore, more than one customer can be supplied with the same vehicle. The goods, which are placed on the same vehicle must be sociable (compatible), and therefore, can one customer be serviced with mote than one vehicle. The total freight to be carried by a vehicle must be within its capacity (full truckload). Some goods must be transported with special vehicles (e. g. cool goods) etc. These and other restrictions show the complexity of the task logistical Transport Problem. The huge number of restrictions forces us to solve this problem with a constraints-based-programming, which is an instrument of artificial intelligence. This paper includes a discussion of the Logistical Transport Problem and its solution with a tool of artificial intelligence.

## Logistische Lösungen von Transportproblemen durch ein Werkzeug der Künstlichen Intelligenz

VON MOUNIR AL-DAAS, DRESDEN

b. f. n. a  
b. d. s. c  
5

### 1. Einleitung

Wirtschaftswachstum und die Zunahme des Handels fordern ein modernes und leistungsfähiges Transportwesen unter strenger Beachtung des Umweltschutzes. Das wachsende Güteraufkommen verursacht vielfältige Transportprobleme (Stau, Verkehrsbehinderung), weitere Belastungen für die Umwelt (Schadstoffe und Lärm) sowie Gefahrenquellen für Menschen. Deshalb ist es wichtig, aber auch notwendig, die Transporte unter Berücksichtigung moderner Anforderungen an logistische Leistungen zu organisieren.

Bevor die logistische Lösung der Transportprobleme erläutert wird, soll eine kurze Darstellung der klassischen Algorithmen des Operations Research erfolgen. Zur konkreten Lösung dieser Probleme enthält der Text Hinweise auf ausgewählte Literatur.

### 2. Analyse logistischer Transportprobleme

Die zu erfüllende Aufgabe beim logistischen Transportproblem besteht darin, daß die Vorgaben der von den Kunden bestellten Güter hinsichtlich Lieferservice (Lieferzeit, Liefertreue, ... ) bei minimalen Kosten eingehalten werden. Es kommt hinzu, daß die erschöpften Kapazitäten des Straßenverkehrs und die durch den Verkehr verursachten Umweltbelastungen sowie die Verkehrssicherheit berücksichtigt werden müssen. In diesem Sinne soll die Disposition der Kundenaufträge erfolgen.

Um diese ökonomischen, ökologischen und logistischen Anforderungen zu realisieren, muß eine Zielfunktion formuliert werden, die mindestens folgende Terme enthält:

- minimale Kosten,
- minimale Tourenanzahl,
- maximale Auslastung der Fahrzeuge und
- maximale Leistung zur Erfüllung der Kundenaufträge.

*Anschrift des Verfassers:*  
Dipl.-Ing. Mounir AL-Daas  
Institut für Transportlogistik  
Technische Universität Dresden  
Mommsenstraße 13  
01062 Dresden

Diese Ziele zeigen, daß die logistischen Transportprobleme die folgenden Probleme enthalten:

1. das klassische Transportproblem,
2. das Standardproblem,
3. das Rucksackproblem,
4. das Tourenplanungsproblem und
5. das Rundreiseproblem.

Operations Research bietet für diese Anforderungen folgende Algorithmen an:

#### 1. Das klassische Transportproblem

Ein häufig auftretendes Modell in der linearen Optimierung ist das klassische Transportproblem. Die zu erfüllende Aufgabe bei diesem Problem besteht darin, daß aus einer gegebenen Anzahl ( $r$ ) von Lagern ( $A_i$  Quellen) mit Vorräten  $a_i \geq 0$ ,  $i = 1(1)r$  eine austauschbare Ware an eine bestimmte Anzahl ( $s$ ) von Verbrauchern ( $B_j$  Senken) mit dem jeweiligen Bedarf  $b_j \geq 0$ ,  $j(1)s$  mit den dafür minimalen Gesamtaufwand transportiert werden soll.

Beim klassischen Transportproblem werden die Lieferbeziehungen zwischen den Quellen und Senken bestimmt. Hierbei wird zugeordnet, welche Senke wieviel Gutmenge aus welcher Quelle bekommt. Die ungarische Methode ist z.B. ein exaktes Verfahren zur Lösung dieses Problems (vgl. /1/ S. 130 ff.).

#### 2. Standortproblem

Die Auswahl des richtigen Standortes vom Transit-Terminal (Lager) spielt eine bedeutende Rolle bei der Abwicklung der Kundenaufträge und beeinflusst das ganze Distributionssystem. Für die Errichtung des Transit-Terminals an der Peripherie der Stadt kommen nur bestimmte und begrenzte Orte in Frage. Die folgenden Standortfaktoren bilden die Basis für diese Auswahl:

- Grund und Boden  
Die Lage, Größe, Bebauungsvorschriften und Expandierungsmöglichkeiten des vorgeschlagenen Geländes sowie die Erschließung des Gebietes beeinflussen maßgeblich die Auswahl. (Hier wird die Verzahnung zwischen Aufgaben der Stadt- und Verkehrsplaner deutlich.)
- Verkehrsverbindungen  
Die durch Transportaktivitäten verursachten Kosten, Staus und Umweltbelastungen müssen minimiert werden. Das Straßennetz bestimmt die Beziehung des Terminals nach innen (zur Stadt), während die Autobahnen, Schienen und gegebenenfalls Flug-, See- und Binnenhafen die Beziehungen nach außen bestimmen.
- Die öffentliche Hand  
Die öffentliche Hand kann z.B. durch Subventionen oder Steuervergünstigungen die Transit-Terminal-Betreiber fördern.

– Umweltbedingungen

Die Beachtung ökologischer Gesichtspunkte ist nicht nur gesetzliche Forderung. Durch eine Verknüpfung der stadtplanerischen Aufgaben mit den Belangen des Umweltschutzes ist ein positives Image der Betreiberfirma zu erreichen.

### 3. Rucksackproblem (Knapsack Problem)

Durch die Wahl verschiedener Objekte soll ein Rucksack so ausgefüllt werden, daß dessen Kapazität nicht überschritten wird und die Bequemlichkeit beim Tragen maximal ist.

In der Literatur wurde das Subset-sum Problem (Problem von Summen der Teilmengen) als praktischer Fall des Rucksackproblems erwähnt und als volumenabhängiges Rucksackproblem (Value Independent Knapsack Problem) genannt (vgl. /2/ S. 105 ff.).

Zur Ausfüllung des Rucksackes ist eine Teilmenge von den Objekten so auszuwählen, daß die Summe der Gewichte aller gewählten Objekte sehr nahe zur Rucksackkapazität liegen muß. Die Kapazität bzw. Tragfähigkeit des Rucksackes (Container oder Fahrzeug) darf nicht überschritten werden. Die Rucksackprobleme können entweder heuristisch oder exakt gelöst werden.

Um die Lösungsverfahren des Rucksackproblems auf die Disposition der Kundenaufträge anwenden zu können, müssen diese modifiziert werden. Zur Disposition der Kundenaufträge werden Fahrzeuge gebraucht, die unterschiedliche Kapazitäten und Konstruktionen besitzen. Darüber hinaus sind die Objekte (hier die zu transportierenden Güter) nicht immer untereinander verträglich. Infolgedessen müssen noch weitere Nebenbedingungen hinzugefügt werden:

- Verträglichkeit der mit einem Fahrzeug zu transportierenden Güter,
- Eignung des Fahrzeuges für das jeweilige Gut und
- Berücksichtigung der verschiedenen Ladekapazitäten der Fahrzeuge.

### 4. Tourenplanungsproblem

Die Kunden einer Region sollen von einem Auslieferungslager (Depot) aus mit den Gütern versorgt werden. Dafür werden verschiedene Fahrzeuge eingesetzt. Die Kunden bestellen die verschiedenen Güter in unterschiedlichen Mengen und zu unterschiedlicher Zeit.

Die Aufgabe der Tourenplanung besteht nun darin, die Kundenaufträge unter Berücksichtigung sämtlicher Nebenbedingungen auf die Touren (Fahrten) zu verteilen. Dabei sollen alle Kunden bedient und die Fahrstrecke minimiert werden (vgl. /3/ S. 131 ff.).

Eine andere Optimierungsrichtung ist die Minimierung der gesamten Transportkosten, die durch den Transportmitteleinsatz und die zurückgelegten Strecken entstehen (vgl. /4/ S. 10-11). Im Interesse der City-Logistik ist die Anzahl der Touren (Fahrten) zu minimieren. Mit anderen Worten besteht die Aufgabe der Tourenplanung schlechtweg darin, die Kundenaufträge den Fahrten zuzuordnen. Damit ist die Frage, welcher Kunde in welcher Tour bedient wird, geklärt.

Nachdem die Kunden auf die Touren zugeordnet sind (welcher Kunde wird bei welcher Tour bedient), ist die Reihenfolge der Bedienung der Kunden bei jeder Tour zu ermitteln, mit dem Ziel, die minimale Wegstrecke für jede Tour zu suchen. Jede Rundreise muß alle Kunden einer Tour beinhalten.

Die Tourenbildung (Zuordnung der Kunden zu den Fahrten) und die Routenbildung (Bedienungsreihenfolge der Kunden in einer Tour) sind von den Verbindungen (Straßennetz) zwischen den Kunden abhängig.

Bei  $N$  Kunden ergibt sich im allgemeinen die Anzahl der Verbindungen  $V$  wie folgt:

$$V = 1 + 2 + \dots + (N-2) + (N-1)$$

$$= \frac{N \cdot (N-1)}{2}$$

Die Anzahl der möglichen Kombinationen für die Tourenbildung  $K$  wächst exponentiell zur Anzahl der Verbindungen  $V$

$$K = 2^V.$$

Beispielsweise gibt es bei zehn Kunden ( $N = 10$ ) 45 Verbindungen ( $V = 45$ ) und  $35 \cdot 10^{12}$  mögliche Kombinationen ( $K = 35 \cdot 10^{12}$ ).

Die enorm große Anzahl der möglichen Kombinationen – sogar bei kleineren Kundenanzahl – macht das Verfahren der vollständigen Enumeration für die Suche nach einer optimalen Lösung unanwendbar, da die dafür notwendige Rechenzeit exponentiell mit der Anzahl der Kunden wächst. Zur Lösung des Tourenplanungsproblems wurden verschiedene heuristische Verfahren wie z.B. das Savingsverfahren nach *Clarck/Wright* /9/ und das Sweep-Verfahren nach *Gillett/Miller* /10/ vorgeschlagen.

### 5. Rundfahrtproblem (Travelling Salesman Problem)

Das Rundfahrtproblem bzw. Rundreiseproblem ist in der Literatur des Operations Research unter dem Begriff „Travelling Salesman Problem“ bekannt. Der Name kommt daher, daß ein Handelsreisender in einer Rundreise mehrere Orte jeweils nur einmal zu besuchen hat und anschließend zum Ausgangsort zurückkehren muß. Der dabei zurückzulegende Weg soll minimal sein. Bei der Lösung des Rundfahrtproblems können die kürzeste Gesamtentfernung, die kürzeste Gesamtreisezeit oder auch die minimalen Transportkosten angestrebt werden.

In der Literatur des Operations Research wurden diese Probleme im einzelnen und miteinander teilweise kombiniert behandelt. *Engle* /5/ versucht z.B. ein heuristisches Lösungsverfahren für simultane Standort- und Tourenplanung zu entwickeln.

Die Gesamtheit dieser Probleme stellt die Komplexität der logistischen Transportprobleme dar. Die Planung der logistischen Transportprobleme ist außerordentlich komplex und vielseitig. In der Mathematik wird diese Komplexität als NP-harte (nicht deterministisch polynomial harte) Probleme bezeichnet.

Die Lösung der logistischen Transportprobleme soll unter Berücksichtigung weiterer Restriktionen gesucht werden (vgl. /6/ S. 305-310):

1. Güterverträglichkeit
2. Güterpriorität
3. Die begrenzte Anzahl und Ladekapazität der Fahrzeuge
4. Verfügbarkeit der Fahrzeuge
5. Eignung des Fahrzeuges für den Transport der Güter
6. Erreichbarkeit und Zugänglichkeit der Kunden
7. Straßensperrung
8. Zeitfenster der Kunden
9. Maximale Dauer einer Tour

Powell et al. (/7/ S. 69-85) zeigten ein heuristisches Verfahren für die Optimierung der Tourenplanung mit Berücksichtigung des Kundenzeitfensters. Das mathematische Originalmodell in diesem Verfahren setzt jedoch voraus, daß alle Güter untereinander verträglich sind und daß jeder Kunde nur von einem Fahrzeug beliefert werden darf.

Die Einhaltung dieser Nebenbedingungen zeigt, daß das logistische Transportproblem mehr als eine Kostenoptimierung ist. Im Gegenteil zum klassischen Transportproblem sind die Transportkosten für bestimmte Zwecke (Eilbedürftigkeit, Notfälle, ...) nicht das erste Kriterium, sondern das Sicherstellen eines Lieferzeitpunktes bekannt als: „Koste es, was es wolle“. Die Dynamik der Logistikkosten in Abhängigkeit von der Qualität des Lieferservices soll untersucht werden.

### 3. Anwendung eines Werkzeuges der Künstlichen Intelligenz zur Lösung logistischer Transportprobleme

Mit dem Umfang der oben genannten Teilprobleme und einzuhaltenden Nebenbedingungen erreichen die logistischen Transportprobleme eine so hohe (harte) Komplexität, daß keines der vorgeschlagenen Lösungsverfahren ohne Modifikation anwendbar ist.

Schematisch läßt sich das logistische Transportproblem wie folgt darstellen:

Gegeben seien:

- eine endliche Menge von Gütern, Kunden, Kundenaufträgen und Transportmitteln,
- die einer Reihe von Nebenbedingungen (Verträglichkeit, Lkw-Kapazität, Beladbarkeit, Erreichbarkeit, ...) unterworfen sind.

Gesucht wird eine Lösung,

- welche sämtliche Nebenbedingungen erfüllt und
- dabei noch die Zielfunktion (Anzahl der einzusetzenden Transportmittel) minimiert (optimiert).

Diese Aufgabenstellung scheint auf den ersten Blick einfach zu sein, verbirgt jedoch eine enorme kombinatorische Vielfalt der dabei auftretenden Situationen, welche ihre Lösung

außerordentlich schwierig gestaltet. Der große Umfang der einzuhaltenden Nebenbedingungen im logistischen Transportproblem zwingt dazu, daß die Suche nach der Lösung solcher Probleme in einer anderen Herangehensweise erfolgen sollte.

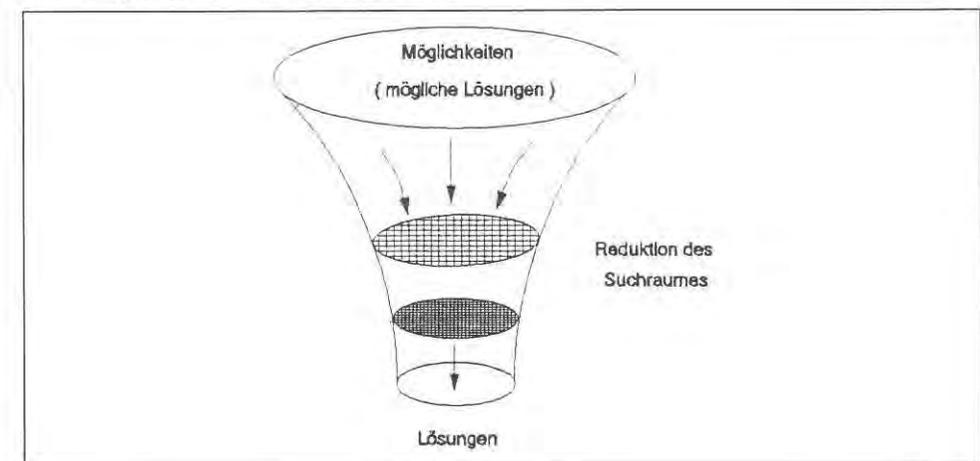
Anhand eines Werkzeuges der Künstlichen Intelligenz werden die Nebenbedingungen ausgenutzt, um das Untersuchungsgebiet einzuschränken.

#### 3.1 Die KI-Software *Charme* – Einführung

Im Rahmen der Künstlichen Intelligenz wurde eine auf Zusatzbedingungen basierende Programmiersprache (constraints-based Programming) entwickelt. *Charme* ist eine constraints-basierte Programmiersprache, die 1990 von der BULL AG entwickelt wurde. In dieser Programmiersprache wird die im Operations Research bekannte Technik der *Branch-and-Bound Methode* angewandt. Dabei werden die Zusatzbedingungen (Constraints) dafür eingesetzt, um die „unfruchtbaren“ Zweige des Entscheidungsbaumes abzuschneiden und somit das Suchgebiet zu reduzieren. Die permanente Überprüfung auf Einhaltung der Nebenbedingungen wird durch einen Mechanismus gewährleistet, der in der Fachsprache als *constraint satisfaction* oder *constraint propagation* bezeichnet wird. Ehe eine der eingesetzten Variablen einen neuen Wert annehmen kann, wird überprüft, ob dieser mit den Nebenbedingungen verträglich ist. Wenn es bei der Suche nach der Lösung zu einer „Sackgasse“ kommt, benutzt *Charme* die Technik der Rückwärtsverfolgung (Backtracking). *Charme* kombiniert die Effizienz von Algorithmen des Operations Research mit der Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz (vgl. /8/).

Das Durchmustern des Suchraumes beruht auf einem Reduktionsmechanismus: Mittels der Nebenbedingungen wird der anfängliche Suchraum immer weiter eingeeengt, indem aus den einzelnen Domänebereichen jene Variablenwerte, die bei der Lösung nicht auftreten können, sukzessive entfernt werden. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis alle Variablen mit einem Wert belegt sind und diese eine Lösung darstellen (siehe Abb. 1).

Abbildung 1: Reduktion des Suchraumes



Die Suche erfolgt nicht-deterministisch. Die verschiedenen Instanziierungen der Variablen werden nacheinander ausprobiert. Zur Verdeutlichung soll das Verfahren mittels eines physikalischen Modells beschrieben werden:

Jede Nebenbedingung spielt die Rolle eines „Siebes“ mit einer bestimmten Feinheit. Die unterschiedlichen Nebenbedingungen stellen verschiedene Siebe mit verschiedenen Feinheiten dar. Die Reihung der Siebe in einem Siebungsprozeß beeinflusst maßgeblich den Durchsatz und die Arbeitszeit (siehe Abb. 1). Genauso stark beeinflusst die Reihenfolge der Nebenbedingungen die Rechenzeit. Aufgrund dessen muß die Einordnung der Nebenbedingungen sorgfältig gewählt werden.

Bei der Suche nach der „optimalen“ (minimalen) Lösung bietet *Charme* zwei Möglichkeiten:

#### 1. Tiefensuche im Entscheidungsbaum (minimize Variante)

Bei dieser Variante, begonnen von der Wurzel, sucht *Charme* in einem (z.B. linken) Zweig (Teilbaum) nach der ersten Lösung. Wenn eine zulässige Lösung gefunden wird, wird der Wert der Zielfunktion als Oberschranke betrachtet. Durch Iterationen in demselben (aktuellen) Zweig wird nach einem besseren (kleineren) Wert für die Zielfunktion gesucht. Wenn ein kleinerer Wert gefunden wurde, wird dieser als neue Oberschranke betrachtet usw.. Wenn der aktuelle Zweig durchmustert ist, prüft *Charme* den nächsten Zweig usw. Kommt es dabei zu einer „Sackgasse“, wird durch Backtracking zum nächsten Verzweigungspunkt (Choice-point) in demselben Zweig zurückgegangen (eingeschränkte Form des Branch-and-Bound).

#### 2. Breitensuche (minim Variante)

Hier wird eine erste Lösung in einem Zweig gesucht. Dann wird in die Wurzel zurückgegangen und in einem anderen Zweig nach einer besseren Lösung gesucht. Dabei wird durch das Backtracking die Blockanweisung bei jedem neuen Durchlauf komplett ausgeführt. Dies wird wiederholt, bis die gesuchte (optimale) Lösung gefunden wird.

Die Varianten *minim* und *minimize* liefern die gleichen Ergebnisse, aber unterscheiden sich in der Herangehensweise bei der Suche nach der minimalen Lösung. Da *minim* Variante manchmal zu Beginn der Suche ganze Zweige des Suchbaumes abschneidet, ist *minim* schneller als *minimize*. Jedoch bei komplexen Berechnungen innerhalb der Blockanweisung kann *minimize* die Lösungsfindung beschleunigen.

### 3.2 Der Aufbau des Algorithmus

Basierend auf dieser Software wird ein Programm zur Lösung der logistischen Transportprobleme entwickelt. Im folgenden wird der Algorithmus dieses Programmes analysiert:

1. In einem Feld (Matrix) sind die Kundenaufträge, die in dem Transit-Terminal eingetroffen sind, einzuordnen (siehe Tab. 1).

Normalerweise beinhalten die Kundenaufträge die folgenden Informationen: Kundennummer, das bestellte Gut, die bestellte Menge, Beginn und Ende des Zeitfensters, in dem die Lieferung beim Kunden ankommen soll. Anhand der bestellten Gutmenge wird die notwendige Zeit für den Umschlag ermittelt.

Tabelle 1: Einordnung der Kundenaufträge in einem Feld

Kunden-auftrag	Kunde	Gut	Menge	Umschlag-zeit	Zeitfenster-beginn	Zeitfenster-ende
1	3	4	2	8	540	660
2	7	1	3	15	600	720
3	3	1	1	6	540	660
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
N	k	g	m	t	b	e

Zur Normierung der Zeiteinheiten für die Umschlagzeit, Fahrzeit sowie den Beginn und das Ende des Zeitfensters wird in diesem Modell die Zeiteinheit [Minute] eingeführt. Der Tag beginnt 0.00 Uhr (0 Minute) und endet 24.00 Uhr (1440 Minute). Z.B. der Beginn des Zeitfensters um 10.00 Uhr bedeutet Minute 600, 13.00 Uhr heißt 780. Minute usw.

Ein Kunde kann mehrere Aufträge erteilen. Beispielsweise gehören in (Tab. 1) die Aufträge 1 und 3 demselben Kunden (3). Die symbolische Darstellung der Kundenaufträge ist wie folgt:

$$A_i = [k, g, m, u, b, e] ::$$

$$[Kunde, Gut, Menge, Umschlagzeit, Zeitfensterbeginn, -ende]$$

Dabei sind:

$A_i$  der Kundenauftrag Nummer  $i$ ,

- $\forall i \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge,
- $\forall k \in \{2, \dots, K+1\}$ ;  $k = 1$  ist das Lager;  $K$  = Anzahl der Kunden,
- $\forall g \in \{1, \dots, G\}$ ;  $G$  = Anzahl der Güter,
- $\forall m \in \{1, \dots, M\}$ ;  $M$  = Anzahl der Ladeeinheiten,
- $\forall u \in \{1, \dots, U\}$ ;  $U$  = Zeiteinheiten für den Umschlag,
- $\forall b \in \{1, \dots, B\}$ ;  $B$  = Beginn des Zeitfensters (Zeiteinheit),
- $\forall e \in \{1, \dots, E\}$ ;  $E$  = Ende des Zeitfensters (Zeiteinheit).

2. In einem Feld (Matrix) sind die Entfernungen zwischen den Kunden untereinander und dem Transit-Terminal einzuordnen. Wird die Entfernungsmatrix durch die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit auf der jeweiligen Strecke dividiert, so ergibt sich die entsprechende Fahrzeitmatrix (siehe Tab. 2).

Tabelle 2: Die Fahrzeitmatrix

Kunden → ↓ Kunden	1 (Lager)	2	3	. k .	K+1
1	0	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	...	$\tau_{1K+1}$
2	$\tau_{21}$	0	$\tau_{23}$	...	$\tau_{2K+1}$
.	.	.	.	.	.
l	.	.	.	$\tau_{lk}$	.
.	.	.	.	.	.
K+1	$\tau_{K+11}$	$\tau_{K+12}$	$\tau_{K+13}$	$\tau_{K+1k}$	0

Hier wird die Fahrzeit für alle im Fuhrpark befindlichen Fahrzeuge vereinheitlicht. Befinden sich im Fuhrpark unterschiedliche Fahrzeuge, so kann die Fahrzeit für das jeweilige Fahrzeug mit einem Faktor korrigiert werden. Symbolisch kann die Fahrzeitmatrix wie folgt dargestellt werden:

$$\text{Fahrzeit}_{kl} = [\tau_{kl}] :: [1..K+1, 1..K+1]$$

$\forall k, l \in \{1, \dots, K+1\}$ ; K = Anzahl der Kunden,  
k = l = 1 steht für das Terminal bzw. das Lager.

$\tau_{kl}$  ist die Fahrzeit zwischen dem Kunden bzw. dem Terminal (k) und dem Kunden (l).

Die hier anzuwendenden Zeiteinheiten müssen mit den Zeiteinheiten der Umladezeit und dem Beginn und Ende des Zeitfensters kompatibel sein.

3. In einem Feld (Matrix) ist die Verträglichkeit der Güter untereinander zu bestimmen. Diese Matrix ist symmetrisch und enthält  $G \cdot G$  binäre Variablen (siehe Tab. 3).

Tabelle 3: Verträglichkeitsmatrix

Güter → ↓ Güter	1	2	. h .	G
1	1	$V_{12}$	...	$V_{1G}$
2	$V_{21}$	1	...	$V_{2G}$
.	.	.	.	.
g	.	.	$V_{gh}$	.
.	.	.	.	.
G	$V_{G1}$	$V_{G2}$	...	1

Die symbolische Schreibweise der Verträglichkeitsmatrix ist wie folgt:

$$\text{Verträglichkeit}_{gh} = [V_{gh}] :: [1..G, 1..G]$$

$\forall g, h \in \{1, \dots, G\}$ ; G = Anzahl der Güter  
 $V_{gh}$  ist die Verträglichkeit zwischen dem Gut g und dem Gut h.

$$V_{gh} = \begin{cases} 1 & \text{Falls Gut g mit dem Gut h verträglich ist.} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Auf diese Matrix wird zurückgegriffen, um die Zusammenladeverbote der unverträglichen Güter auf ein und demselben Fahrzeug zu garantieren.

4. In einem Feld (Matrix) ist die Beladbarkeit der Güter auf den im Fuhrpark zur Verfügung stehenden Fahrzeugen zu bestimmen. Diese Matrix enthält  $G \cdot F$  binäre Variablen. Symbolisch wird die Beladbarkeit wie folgt:

$$\text{Beladbarkeit}_{gf} = [B_{gf}] :: [1..G, 1..F]$$

$\forall g \in \{1, \dots, G\}$ ; G = Anzahl der Güter  
 $\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ; F = Anzahl der Fahrzeuge  
 $B_{gf}$  ist die Beladbarkeit zwischen dem Gut g und dem Fahrzeug f.

$$B_{gf} = \begin{cases} 1 & \text{Falls das Gut i auf dem Fahrzeug f ladbar ist.} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Anhand dieser Matrix wird gewährleistet, daß das richtige Gut mit dem richtigen Fahrzeug transportiert wird. Das ist sehr wichtig, insbesondere für die gekühlten Waren.

5. Die großen Fahrzeuge können die in engen Straßen befindlichen Kunden nicht erreichen. Deshalb ist in einem Feld (Array) die Erreichbarkeit der Kunden durch die im Fuhrpark zur Verfügung stehenden Fahrzeuge zu bestimmen. Diese Matrix enthält  $F \cdot K$  binäre Variablen. Die Erreichbarkeit läßt sich symbolisch wie folgt darstellen:

$$\text{Erreichbarkeit}_{fk} = [E_{fk}] :: [1..F, 1..K]$$

$\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ; F = Anzahl der Fahrzeuge  
 $\forall k \in \{1, \dots, K\}$ ; K = Anzahl der Kunden  
 $E_{fk}$  ist die Erreichbarkeit des Kunden k durch das Fahrzeug f.

$$E_{fk} = \begin{cases} 1 & \text{Falls das Fahrzeug f den Kunden k erreicht.} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Eine andere Variante zur Gewährleistung der Beladbarkeit und Erreichbarkeit kann wie folgt dargestellt werden. Zuerst werden die Fahrzeuge des Fuhrparks je nach Typ bzw. Ladekapazität in Gruppen (Clusters) eingeteilt. Nach derselben Methode sind auch die Güter hinsichtlich der Beladbarkeit in Gruppen einzuteilen. Danach wird festgelegt,

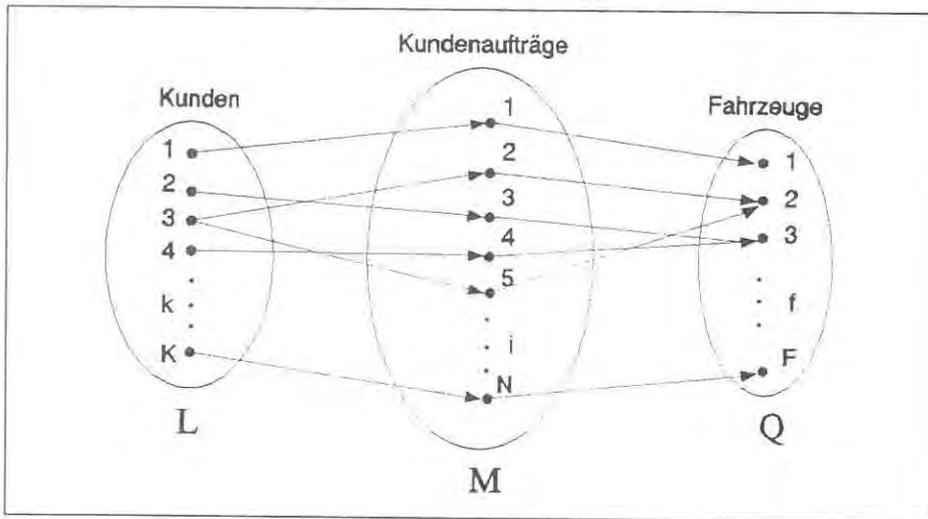
welche Gütergruppe mit welchem Fahrzeugtyp transportiert werden darf. Die Erreichbarkeit der Kunden durch Fahrzeugtypen kann genauso wie die Beladbarkeit ermittelt werden. Es soll zwischen der Beladbarkeit und der Erreichbarkeit keine Widersprüche geben.

6. Die im Fuhrpark zur Verfügung stehenden Fahrzeuge sind mitunter von der Kapazität her inhomogen. Infolgedessen empfiehlt sich eine Gruppierung (Clustering) der Fahrzeuge nach der Kapazität, damit die Ladekapazität jeder Gruppe nicht überschritten wird. Dies führt zur Reduzierung der Daten.
7. Die Ladeeinheiten sind zu vereinheitlichen. Die Erfahrung zeigt, daß der Laderaum eines Verteilfahrzeuges eher eine Obergrenze für die Beladung des Fahrzeuges bildet als die Tragfähigkeit. Daher sollen die Ladeeinheiten nach Volumen und nicht nach Gewicht betrachtet werden.
8. Als Zielfunktion ist die Anzahl der Fahrzeuge unter Beachtung der vorgegebenen Nebenbedingungen zu minimieren. Dies ist ein reines Zuordnungsproblem: Welches Gut wird auf welches Fahrzeug geladen und welches Fahrzeug wird welchen Kunden beliefern oder welches Fahrzeug kann welche Kundenaufträge bedienen?

Eine Demonstration dieser Zuordnung ist anhand der Mengenlehre (Abb. 2) ersichtlich.

$L$  ist eine Menge von Kunden  $k=1, \dots, K$ . Jedes Element (Kunde) dieser Menge kann einen, keinen oder mehr als einen Auftrag erteilen, in dem er das bestellte Gut, die Menge und das Zeitfenster für die Belieferung angibt. Infolgedessen enthält jeder Kundenauftrag die folgenden Daten:

Abbildung 2: Erfassung und Disposition der Kundenaufträge



1. den Kunden, der diesen Auftrag erteilt,
2. das bestellte Gut,
3. die gewünschte Menge,
4. den Beginn des Zeitfensters,
5. das Ende des Zeitfensters und
6. aufgrund der bestellten Menge kann die benötigte Umschlagzeit ermittelt werden.

Es bildet sich dann die Menge  $M$  von Kundenaufträgen  $i=1, \dots, N$ . Die Menge  $Q$  enthält die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge  $f=1, \dots, F$ . Die Aufgabe besteht nun darin, alle Kundenaufträge auf die Fahrzeuge so zu disponieren, daß die Anzahl der benötigten Fahrten minimal wird. Dabei sollen die folgenden Nebenbedingungen berücksichtigt werden:

- die begrenzte Kapazität der Fahrzeuge,
- die Verträglichkeit der Güter,
- die Beladbarkeit der Güter auf den Fahrzeugen,
- die Erreichbarkeit der Kunden durch die Fahrzeuge,
- das Zeitfenster bei den Kunden und
- die gesamte Tourendauer.

Für die Zuordnung der Kundenaufträge auf die Fahrzeuge wird ein Feld (Array) wie folgt definiert:

$[1..N]$ , wobei  $N$  die Anzahl der Kundenaufträge ist. Jedes Element dieses Feldes (Kundenauftrag) wird als Variable betrachtet. Jede dieser Variablen soll einen einzigen Wert von dem Feld  $[1..F]$  bekommen, wobei  $F$  die Anzahl der Fahrten (Fahrzeuge) ist, die damit initialisiert werden. Mehrere Variablen können jedoch den gleichen Wert bekommen. Das heißt, jeder Kundenauftrag (Variable) kann einem Fahrzeug (einer Fahrt) zugeordnet werden. Bei der Initialisierung der Variablen sollen alle vorgegebenen Restriktionen berücksichtigt werden. Wenn alle Variablen initialisiert sind, dann ist das Problem gelöst. Die Gruppe von Kundenaufträgen, die den gleichen Wert einnimmt, bildet eine Tour und kann mit einem entsprechenden Fahrzeug transportiert werden.

#### Hinweis

Die Kundenaufträge werden auf die Touren (Fahrten) disponiert. Hierbei wird angenommen, daß die Anzahl der Touren der Anzahl der Fahrzeuge entspricht. Dies bedeutet jedoch nicht, daß der Fuhrpark die gleiche Anzahl von Fahrzeugen wie die Anzahl der Touren besitzen muß. Die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge hängt von den Nebenbedingungen ab. Beispielsweise kann ein Fahrzeug an einem Tag mehrere Touren durchführen, wenn die Nebenbedingungen dies erlauben, als ob dieses Fahrzeug mehrfach vorhanden wäre. Auf diesen Hinweis wird später nochmal eingegangen.

Vereinfachend läßt sich das Ergebnis der Zuordnung wie in der Tabelle 4 darstellen.

Tabelle 4: Zuordnung der Kundenaufträge auf die Touren

Kundenaufträge → ↓ Fahrzeuge	1	2	3	4	...	N-1	N
1	X		X				
2						X	X
⋮							
F		X		X			

Diese Tabelle zeigt die Zuordnung der Kundenaufträge auf die Fahrzeuge (Fahrten). Hier haben die Fahrten und Fahrzeuge die gleiche Nummer. Das Zeichen (X) bedeutet, daß der entsprechende Kundenauftrag in der jeweiligen Fahrt erfüllt wird, z.B. werden die Kundenaufträge 1 und 3 in der ersten Fahrt bedient. Zu bemerken ist, daß es in jeder Spalte nur ein einziges Zeichen (X) geben darf, d.h. jeder Kundenauftrag nur einmal bedient wird. Die bestellte Menge in jedem Kundenauftrag soll kleiner/gleich der Kapazität der vorhandenen Fahrzeuge sein. Falls die bestellte Menge größer als die Kapazität ist, dann soll der jeweilige Kundenauftrag wie zwei Aufträge betrachtet werden. Bei der Zuordnung sollen alle angegebenen Nebenbedingungen berücksichtigt werden. Das Ziel ist, die Anzahl der benötigten Touren (Fahrten) zu minimieren.

Zuerst wird  $F \leq N$  ( $F$  = Anzahl der Fahrten,  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge) vorgeschlagen. Wenn die Anzahl der vorgeschlagenen Fahrten nicht ausreicht, führt dies zu keiner Lösung, weil die Nebenbedingungen verletzt werden.

Zur Generierung der Lösung besitzt Charme verschiedene Strategien. Da das Ziel in diesem Problem ist, die Anzahl der Fahrten zu minimieren, versucht die Strategie von Charme allen Variablen im Feld  $[1..N]$  ein und denselben Wert des Feldes (domain)  $[1..F]$  zu geben. Das heißt, alle Kundenaufträge werden in einer Fahrt bedient. Aber hierbei werden die Nebenbedingungen verletzt. Durch das sogenannte Backtracking erzeugt Charme die nächst zulässige Lösung und prüft gleichzeitig die Nebenbedingungen. Werden alle Nebenbedingungen respektiert, so repräsentiert die gefundene Lösung die „optimale“ Lösung, ansonsten wird durch Backtracking eine neue zulässige Lösung generiert usw.

### 3.3 Die mathematische Formulierung

Die mathematische Formulierung dieses logistischen Problems kann wie folgt beschrieben werden:

Zuordnen ::  $[1..N]$  of  $[1..F]$

dabei sind:  $N$  die Anzahl der Kundenaufträge und  
 $F$  die Anzahl der Fahrzeuge

Achtung!

Die Anzahl der Fahrzeuge entspricht hier der Anzahl der Touren (Fahrten). Das bedeutet aber nicht, daß der Fuhrpark die gleiche Anzahl von Fahrzeugen haben muß, da einige Fahrzeuge mehrere Touren durchführen können. Theoretisch entsprechen die Tourennummern den Fahrzeugnummern, aber praktisch kann ein Fahrzeug mehrere Touren nacheinander durchführen, als ob dieses Fahrzeug mehrfach vorhanden wäre.

Zielfunktion: Anzahl der Fahrzeuge  $F \rightarrow \min!$

Nebenbedingungen:

1. Kapazität

$$\sum [menge_{if}] \leq c_f$$

$\forall i \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

$\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ;  $F$  = Anzahl der Fahrzeuge

Dabei sind:

$menge_{if}$  die bestellte Menge im  $i$ -ten Kundenauftrag, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,  
 $c_f$  die Kapazität des  $f$ -ten Fahrzeuges.

2. Erreichbarkeit

$$E[kunde_{if}, f] = 1$$

$\forall i \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

$\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ;  $F$  = Anzahl der Fahrzeuge

Dabei sind:

$kunde_{if}$  der Kunde im  $i$ -ten Kundenauftrag, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,  
 $f$  ist das  $f$ -te Fahrzeug und  
 $E$  Erreichbarkeit des Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist, durch das  $f$ -te Fahrzeug. Deren Wert wird von der Erreichbarkeitsmatrix entnommen.

3. Beladbarkeit

$$B[gut_{if}, f] = 1$$

$\forall i \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

$\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ;  $F$  = Anzahl der Fahrzeuge

Dabei sind:

$gut_{if}$  das bestellte Gut in dem  $i$ -ten Kundenauftrag, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,  
 $f$  ist das  $f$ -te Fahrzeug und  
 $B$  die Beladbarkeit des im  $i$ -ten Kundenauftrag bestellten Gutes auf dem  $f$ -ten Fahrzeug. Der Wert von  $B$  wird von der Beladbarkeitsmatrix entnommen.

## 4. Verträglichkeit

$$V [gut_{if}, gut_{jf}] = 1$$

$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

$\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ;  $F$  = Anzahl der Fahrzeuge

Dabei sind:

$gut_{if}$  das bestellte Gut in dem  $i$ -ten Kundenauftrag, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,

$gut_{jf}$  das bestellte Gut in dem nächsten ( $j$ -ten) Kundenauftrag, der auch demselben ( $f$ -ten) Fahrzeug zugeordnet ist

$V$  die Verträglichkeit der Güter untereinander. Der Wert von  $V$  ist aus der Verträglichkeitsmatrix erhaltbar.

## 5. Zeitfenster bei den Kunden

Hier werden die kompatiblen Kundenaufträge, die nacheinander und mit demselben Fahrzeug bedient werden, definiert. Jeder Kunde bestimmt in seinem Auftrag ein Zeitintervall (Zeitfenster), in dem die Belieferung erfolgen soll. Die Ankunftszeit beim ersten Kunden in der Tour hängt von der Abfahrtszeit des Fahrzeuges vom Terminal ab. Es wird vorausgesetzt, daß jedes Fahrzeug das Terminal frühzeitig verläßt, um den ersten Kunden in der Tour rechtzeitig zu erreichen. Die Rückfahrt des Fahrzeuges zum Terminal wird durch die Gesamtzeit bestimmt (siehe Punkt 6).

$$t_{if} \geq t_f + u_{if} + \tau_{(ij)f}$$

$$b_{if} \leq t_{if} \leq e_{if}$$

$$t_{if} \geq 0$$

$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

Dabei sind:

$i, j$  die Kundenaufträge, die demselben ( $f$ -ten) Fahrzeug zugeordnet sind,

$t_{if}$  die Ankunftszeit des  $f$ -ten Fahrzeuges beim Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist,

$t_{jf}$  die Ankunftszeit des  $f$ -ten Fahrzeuges beim nächsten Kunden, dessen Auftrag  $j$  ist,

$\tau_{(ij)f}$  die Fahrzeit des  $f$ -ten Fahrzeuges vom Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist zum nächsten Kunden, dessen Auftrag  $j$  ist,

$u_{if}$  die benötigte Umschlagzeit für den  $i$ -ten Kundenauftrag, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,

$b_{if}$  Zeitfensterbeginn des  $i$ -ten Kundenauftrages, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,

$e_{if}$  Zeitfensterende des  $i$ -ten Kundenauftrages, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist.

Um weitere mögliche Kombinationen, die keine zulässige Lösungen liefern, zu entfernen, soll eine weitere Nebenbedingung (die Kompatibilität) eingeführt werden. Alle nicht kompatiblen Kundenaufträge können nicht auf derselben Tour (derselben Fahrt) bedient werden.

Die Kompatibilität wird zwischen den Kundenaufträgen paarweise geprüft. Zwei Kundenaufträge ( $i, j$ ) sind inkompatibel, wenn das Zeitfensterende des ersten Kundenauftrages ( $i$ ) plus die Fahrzeit vom Kunden in diesem Kundenauftrag ( $i$ ) zum Kunden im Kundenauftrag ( $j$ ) größer als das Zeitfensterende des Kundenauftrages ( $j$ ) ist und umgekehrt. Das heißt, der Kunde, dessen Auftrag ( $i$ ) ist, und der Kunde, dessen Auftrag ( $j$ ) ist, sind inkompatibel, wenn:

$$e_i + \tau_{ij} > e_j \text{ und}$$

$$e_j + \tau_{ji} > e_i$$

$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

Infolgedessen sollen die beiden Kundenaufträge  $i$  und  $j$  bei der Zuordnung verschiedene Werte bekommen.

Dabei sind:

$e_i$  Zeitfensterende des  $i$ -ten Kundenauftrages,

$e_j$  Zeitfensterende des  $j$ -ten Kundenauftrages,

$\tau_{ij}$  die Fahrzeit vom Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist zum nächsten Kunden, dessen Auftrag  $j$  ist,

$\tau_{ji}$  die Fahrzeit vom Kunden, dessen Auftrag  $j$  ist zum nächsten Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist.

## 6. Gesamtzeit (Tourendauer)

Die Gesamtzeit jeder Fahrzeugtour besteht aus der Fahrzeit vom Terminal zum ersten Kunden in der Tour, der Fahrzeit zwischen den einzelnen Kunden, der Umschlagzeit (Übergabezeit) der Güter bei jedem Kunden und der Fahrzeit für die Rückfahrt vom letzten Kunden zum Terminal (die notwendige Zeit für eine Tour). Die Gesamtzeit einer Tour muß den gesetzlichen Regeln der Arbeitszeit entsprechen.

$$G_f = \tau_{(1)f} + \sum u_{if} + \sum \tau_{(ij)f} + \tau_{(j)f} \leq \Gamma_f$$

$\forall i, j \in \{1, \dots, N\}$ ;  $N$  = Anzahl der Kundenaufträge

$\forall f \in \{1, \dots, F\}$ ;  $F$  = Anzahl der Fahrzeuge

Dabei sind:

$G_f$  die Gesamtzeit des  $f$ -ten Fahrzeuges,

$\tau_{(1)f}$  die Fahrzeit des  $f$ -ten Fahrzeuges vom Terminal (Lager) zum ersten Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist,

$u_{if}$  die benötigte Umschlagzeit für den  $i$ -ten Kundenauftrag, der dem  $f$ -ten Fahrzeug zugeordnet ist,

$\tau_{(ij)f}$  die Fahrzeit des  $f$ -ten Fahrzeuges vom Kunden, dessen Auftrag  $i$  ist zum nächsten Kunden, dessen Auftrag  $j$  ist,

$\tau_{(j)f}$  die Fahrzeit des  $f$ -ten Fahrzeuges vom letzten Kunden, dessen Auftrag  $j$  ist zurück zum Terminal,

$\Gamma_f$  Konstante, die Fahrzeug abhängig sein kann = die gesetzliche bzw. erlaubte Arbeitszeit (z.B. 8 h/d) des  $f$ -ten Fahrzeuges.

## 3.4 Demonstrationsbeispiel

Gegeben seien die folgenden Kundenaufträge, die disponiert werden müssen. Jeder Kundenauftrag enthält die folgenden Daten:

1. Kundennummer,
2. Gutnummer,
3. die bestellte Gutmenge,
4. die ermittelte Umschlagzeit,
5. Beginn des Zeitfensters für die Anlieferung und
6. Ende des Zeitfensters.

In diesem Beispiel werden 20 Kundenaufträge disponiert. Die Anzahl der Kunden ist 9 und die Anzahl der Güter ist 8. Beispielsweise besagt der 1. Kundenauftrag in der Tab. 5, daß der Kunde Nummer 3 vom Gut Nummer 2 drei (3) Ladeeinheiten in dem Zeitraum von 14.00 – 16.00 Uhr haben will. Die ermittelte Umschlagzeit für die drei Ladeeinheiten beträgt 8 Minuten usw.

Tabelle 5: Die Kundenaufträge

Auftragsnummer	Kunde	Gut	Menge	Umschlagzeit	Zeitfensterbeginn	Zeitfensterende
1	3	2	3	8	14.00	16.00
2	5	2	3	8	14.00	16.00
3	4	8	1	5	8.00	10.00
4	4	7	1	5	8.00	10.00
5	5	5	2	9	12.00	14.00
6	5	3	3	12	12.00	14.00
7	6	4	2	12	14.00	16.00
8	6	6	2	12	14.00	16.00
9	7	2	3	16	10.00	12.00
10	7	8	3	16	10.00	12.00
11	2	3	2	10	11.40	14.00
12	2	7	2	10	11.40	14.00
13	9	3	2	10	11.40	14.00
14	3	5	1	8	13.20	16.00
15	3	1	1	8	13.20	16.00
16	4	2	1	7	7.20	10.00
17	8	4	2	15	7.40	12.00
18	8	3	2	15	7.40	12.00
19	8	6	3	15	7.40	12.00
20	9	1	2	10	7.20	10.00

In Tabelle 5 ist die Zeiteinheit für den Umschlag Minute [min] und für das Zeitfenster Stunde [h]. Es kommt noch hinzu, daß die Fahrzeit in Minuten berechnet wird. Diese Zeiten sollen einheitlich sein. Für weitere Berechnungen wird die Minute als Zeiteinheit benutzt. Infolgedessen entspricht z.B. die Zeit 14.00 Uhr die Minute 840 des Tages ( $14 \cdot 60$ ) usw.

Die Tabelle 6 zeigt die Verträglichkeit der Güter untereinander.

Tabelle 6: Die Verträglichkeitsmatrix

↓ Gutnummer →	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	0	0	0	1	1	0
2	1	1	0	0	0	1	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	0	1
5	0	0	0	1	1	0	0	1
6	1	1	0	0	0	1	1	1
7	1	0	0	0	0	1	1	1
8	0	0	0	1	1	1	1	1

In Tabelle 6 repräsentiert 1 die Verträglichkeit und 0 das Zusammenladeverbot der jeweiligen Güter.

Die Tabelle 7 enthält die Fahrzeiten zwischen den Kunden und dem Terminal (der Terminal ist Nummer 1).

Tabelle 7: Fahrzeitmatrix

↓ Kunden →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	16	18	18	19	19	20	19	16	14
2	16	0	4	4	3	5	6	5	10	6
3	18	4	0	5	3	3	2	3	8	4
4	18	4	5	0	3	3	2	3	8	4
5	19	3	3	3	0	2	3	4	9	5
6	19	5	3	3	2	0	3	2	7	5
7	17	6	2	2	3	3	0	2	7	6
8	19	5	3	3	4	2	2	0	5	5
9	16	10	8	8	9	7	7	5	0	6
10	14	6	4	4	5	5	6	5	6	0

Angenommen wird, daß die Ladekapazität der Lkw 20 Ladeeinheiten beträgt. Es stehen zwei Fahrzeugtypen zur Verfügung. Das Gut Nummer 4 kann auf die Fahrzeuge des 2. Typs nicht geladen werden. Die Tourendauer beträgt 120 Minuten.

Unter Berücksichtigung der Kapazität, Beladbarkeit, Zeitfenster, Gesamtzeit und Verträglichkeit der Güter ist die benötigte Fahrtenanzahl zu ermitteln.

Das Ergebnis:

Fahrt-Nr.	Typ	Ladung	U-Zeit	F-Zeit	G-Zeit	Haltepunkte
1	2	9	36	42	78	3
2	1	7	32	44	76	3
3	2	6	31	41	72	2
4	2	7	36	39	75	3
5	2	5	29	42	71	3
6	2	2	15	38	53	1
7	1	2	15	38	53	1
8	2	3	17	42	59	2

Das Ergebnis im Detail

Fahrt-Nr.: 1 Ladung: 9 Auslastung: 45%

Haltepunkte: [0,3,5,6] (0 ist Ausgangspunkt „Lager“)

Aufträge: A1 [K3, G2, M3]; A2 [K5, G2, M3]; A8 [K6, G6, M2]; A15 [K3, G1, M1]

(Erläuterung: A1 [K3, G2, M3] heißt, das der 1. Auftrag kommt vom Kunden Nummer 3. Er will vom Gut Nummer 2 die Menge 3 Ladeeinheiten usw.).

Fahrt-Nr.: 2 Ladung: 7 Auslastung: 35%

Haltepunkte: [0,2,5,9]

Aufträge: A6 [K5, G3, M3]; A11 [K2, G3, M2]; A13 [K9, G3, M2]

Fahrt-Nr.: 3 Ladung: 6 Auslastung: 30%

Haltepunkte: [0,7,8]

Aufträge: A9 [K7, G2, M3]; A19 [K8, G6, M3]

Fahrt-Nr.: 4 Ladung: 7 Auslastung: 35%

Haltepunkte: [0,2,4,7]

Aufträge: A3 [K4, G8, M1]; A4 [K4, G7, M1]; A10 [K7, G8, M3]; A12 [K2, G7, M2]

Fahrt-Nr.: 5 Ladung: 5 Auslastung: 25%

Haltepunkte: [0,3,5,6]

Aufträge: A5 [K5, G5, M2]; A7 [K6, G4, M2]; A14 [K3, G5, M1]

Fahrt-Nr.: 6 Ladung: 2 Auslastung: 10%

Haltepunkte: [0,8]

Aufträge: A17 [K8, G4, M2]

Fahrt-Nr.: 7 Ladung: 2 Auslastung: 10%

Haltepunkte: [0,8]

Aufträge: A18 [K8, G3, M2]

Fahrt-Nr.: 8 Ladung: 3 Auslastung: 15%

Haltepunkte: [0,4,9]

Aufträge: A16 [K4, G2, M1]; A20 [K9, G1, M2]

Durch die Modifikation der Gegebenheiten und der Nebenbedingungen können andere Varianten probiert werden.

Variante 2:

Lkw-Kapazität = 20; Tourendauer = 120;  
Beladbarkeit; Verträglichkeit;

Das Ergebnis:

Fahrt-Nr.	Typ	Ladung	U-Zeit	F-Zeit	G-Zeit	Haltepunkte
1	2	15	66	52	118	6
2	1	9	47	44	91	4
3	2	11	65	52	117	6
4	2	6	33	49	82	4

Das Ergebnis im Detail

Fahrt-Nr.: 1 Ladung: 15 Auslastung: 75%

Haltepunkte: [0,3,4,5,6,7,8]

Aufträge: A1 [K3, G2, M3]; A2 [K5, G2, M3]; A8 [K6, G6, M2]; A9 [K7, G2, M3];  
A16 [K4, G2, M1]; A19 [K8, G6, M3]

Fahrt-Nr.: 2 Ladung: 9 Auslastung: 45%

Haltepunkte: [0,2,5,8,9]

Aufträge: A6 [K5, G3, M3]; A11 [K2, G3, M2]; A13 [K9, G3, M2]; A18 [K8, G3, M2]

Fahrt-Nr.: 3 Ladung: 11 Auslastung: 55%

Haltepunkte: [0,3,4,5,6,7,8]

Aufträge: A3 [K4, G8, M1]; A5 [K5, G5, M2]; A7 [K6, G4, M2]; A10 [K7, G8, M3];  
A14 [K3, G5, M1]; A17 [K8, G4, M2]

Fahrt-Nr.: 4 Ladung: 6 Auslastung: 30%

Haltepunkte: [0,2,3,4,9]

Aufträge: A4 [K4, G7, M1]; A12 [K2, G7, M2]; A15 [K3, G1, M1]; A20 [K9, G1, M2]

Variante 3:

Tourendauer = 180; Kapazität;

Das Ergebnis:

Fahrt-Nr.	Typ	Ladung	U-Zeit	F-Zeit	G-Zeit	Haltepunkte
1	X	20	84	45	129	4
2	X	20	120	51	171	6
3	X	1	7	36	43	1

Das Ergebnis im Detail

Fahrt-Nr.: 1 Ladung: 20 Auslastung: 100%

Haltepunkte: [0,3,5,7,8]

Aufträge: A1 [K3, G2, M3]; A2 [K5, G2, M3]; A5 [K5, G5, M2]; A6 [K5, G3, M3];  
A9 [K7, G2, M3]; A10 [K7, G8, M3]; A19 [K8, G6, M3]

Fahrt-Nr.: 2 Ladung: 20 Auslastung: 100%

Haltepunkte: [0,2,3,4,6,8,9]

Aufträge: A3 [K4, G8, M1]; A4 [K4, G7, M1]; A7 [K6, G4, M2]; A8 [K6, G6, M2];  
A11 [K2, G3, M2]; A12 [K2, G7, M2]; A13 [K9, G3, M2]; A14 [K3, G5, M1];  
A15 [K3, G1, M1]; A17 [K8, G4, M2]; A18 [K8, G3, M2]; A20 [K9, G1, M2]

Fahrt-Nr.: 3 Ladung: 1 Auslastung: 5%

Haltepunkte: [0,4]

Aufträge: A16 [K4, G2, M1]

In der Tabelle 9 wird eine Zusammenfassung von (9) möglichen Varianten eingeführt:

Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse

Varianten	Nebenbedingungen					Anzahl der benötigten Fahrten	Anzahl der Haltepunkte
	Kundenzeitfenster	Güterverträglichkeit	Beladbarkeit	Lkw-Kapazität	Gesamtzeit		
1	ja	ja	ja	20	120	8	18
2	ja	ja	ja	10	120	8	18
3	nein	ja	ja	20	120	4	20
4	nein	nein	ja	20	120	4	16
5	nein	ja	ja	10	120	6	19
6	nein	ja	nein	20	180	3	11
7	nein	nein	ja	10	180	5	20
8	nein	nein	ja	20	180	3	16
9	nein	nein	nein	20	180	3	11

#### 4. Schlußfolgerungen

1. Die Versorgung der Städte mit Gütern über Transit-Terminal trägt zur Reduzierung des Lieferverkehrs bei. Es ist sichtbar, daß sowohl die Anzahl der benötigten Fahrten als auch die Anzahl der Haltepunkte immer kleiner als die Anzahl der Kundenaufträge ist, d.h. die Tourenanzahl und die Sendungsanzahl werden verdichtet.
2. Die Härte der Nebenbedingungen – insbesondere das Zeitfenster bei den Kunden (siehe 1. Variante) – beeinflusst maßgeblich den Reduzierungsgrad des Lieferverkehrs.
3. Die Entzerrung der Zeitfenster bei den Kunden (Anlieferzeit) trägt maßgeblich dazu bei, den städtischen Güterverkehr zu bündeln.  
Je größer die Kapazität der Fahrzeuge ist, desto geringer wird die Anzahl der benötigten Fahrten, wenn die Zeitfensterrestriktion dies erlaubt.
4. Durch dieses Programm kann ein objektiver Kompromiß für die Lösungsfindung der Transportprobleme im allgemeinen gefunden werden. Insbesondere hilft das Programm bei der kurz- und langfristigen Planung der städtischen Ver- und Entsorgungsprobleme.
5. Das Programm ist ein Werkzeug für strategische und operative Entscheidungsfindung zum Betreiben eines Transit-Terminals und hilft z.B. bei der Planung
  - des Lagerstandortes,
  - des Fuhrparkes,
  - des Belieferungszeitfensters und
  - bei der täglichen Disposition der Kundenaufträge unter Beachtung der Nebenbedingungen.

## Literaturverzeichnis

- /1/ *Lieber, H., Woda, A.*  
Technologie des Straßentransports, Verlag Heinrich Vogel, München, 1992.
- /2/ *Martello, S., Toth, P.*  
Knapsack Problems Algorithms and Computer Implementations,  
Verlag John Willy & Sons Chichester, New York, Toronto,... 1990.
- /3/ *Domschke, W.*  
Logistik: Rundreisen und Touren, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag GmbH München, 1990.
- /4/ *Ziegler, H.-J., Niemeier, H.-V. et al*  
Computer gestützte Transport- und Tourenplanung, Expert Verlag, 1988.
- /5/ *Engele, G.*  
Simultane Standorte- und Tourenplanung (Diss. A), Carl Heymanns Verlag KG, Köln,  
Bonn, München, 1980.
- /6/ *AL-Daas, M.*  
Auswahl geeigneter Strategien für die Güterversorgung von Städten, Kommunen und  
Ballungsgebieten. In: Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 33 (1993) 7/8, S. 305-310.
- /7/ *Powell, W. et al.*  
An Optimization-Based Heuristic for Vehicle Routing and Scheduling with Soft Time  
Window Constraints. In: Transportation Science, Vol. 26, No. 2, May 1992, PP. 69-85.
- /8/ *Bull, A. G.*  
Artificial Intelligence, Charme – Eine Einführung, S. 7-1.
- /9/ *Clarck, G. / Wright, J. W.*  
Scheduling of Vehicles from a central Depot to a Number of Delivery Points.  
In: Operations Research 12 (1964) P. 568-581.
- /10/ *Gillett, B. E. / Miller, L. R.*  
A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Despatch Problem, In: Operations Research 22  
(1974) P. 340-349.

## Abstract

The phrase "Logistical Transport Problem" is created to describe the task of City-Logistics. This problem encloses the following subproblems: the classical Transport Problem, the Location Problem, Knapsack Problem, Routing Problem and Travelling Salesman Problem. City-Logistics has generally the following feature: the goods flows from outside of the city would be driven into a city-terminal "transit terminal". They would be there picked up and then they will be distributed in the city by environment friendly vehicles. The effect of this convicing is reducing the number of moving vehicles in the city.

The collected goods need to be transported from the terminal to a set of customers in the city. The distribution of goods must take place subject to many restrictions. Among these restrictions are: each customer places a fixed size shipment and specifies a time window within the suppling can be taken place. All shipments are assumed to be less than the vehicle capacity, and therefore, more than one customer can be supplied with the same vehicle. The goods, which are placed on the same vehicle must be sociable (compatible), and therefore, can one customer be serviced with more than one vehicle. The total freight to be carried by a vehicle must be within its capacity (full truckload). Some goods must be transported with special vehicles (e.g. cool goods) etc. These and other restrictions show the complexity of the task logistical Transport Problem. The huge number of restrictions forces us to solve this problem with a constraints-based-programming, which is an instrument of artificial intelligence. This paper includes a discussion of the Logistical Transport Problem and its solution with a tool of artificial intelligence.