

## Summary

The offer for urban public transport has more than hitherto to be orientated towards the demand. This passes also for new techniques. The number of those who depend on urban public transport is recurrent. In competition with the private car urban public transport will only maintain by offering comparable conditions. It is a question of covering the costs to do it or not. As far as there will be no private alternative, the employment of public means to safeguard a minimum offer of transport facilities is justified.

## Résumé

L'offre sur le secteur du transport public urbain devrait se diriger vers la demande dans une mesure plus forte que jusqu'à présent. Ceci s'applique aussi à de nouvelles techniques. Le nombre de ceux qui dépendent du transport public urbain est régressif. En concurrence avec la voiture privée le transport public urbain ne se maintiendra qu'en offrant des conditions comparables. C'est une question de coûts de le faire ou non. En tant qu'il n'y aura pas des alternatives privées, l'emploi de moyens publics servant à garantir une offre minimum de prestations de transport est justifié.

## Ein Investitionsmodell für die Einrichtung eines Containerdienstes

VON PROFESSOR DR. HORST SEELBACH UND  
DR. JOACHIM ROHLFFS, HAMBURG

✓ vstc  
bvcb  
besa

### 1. Einführung

#### 1.1 Kennzeichnung der Entscheidungssituation

Kennzeichen des modernen Seetransportes ist die im Vergleich zum konventionellen Seetransport erheblich gesteigerte Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig wesentlich erhöhten Investitionsaufwendungen für Schiffe, Umschlaganlagen und Inventar<sup>1)</sup>. Daneben bedingt die Einführung eines Containerdienstes eine Änderung der Gewichtung der Kostenbestandteile, die langfristig ihrerseits Veränderungen in allen Betriebsbereichen eines Reederei-, Hafen- oder Hilfsbetriebes zur Folge hat<sup>2)</sup>. Ohne auf diese nicht unwesentlichen Sekundär- und Tertiäreffekte der neuen Transporttechnologie weiter einzugehen<sup>3)</sup>, soll im folgenden ein Entscheidungsmodell formuliert werden, das die Situation eines Reedereibetriebes abbildet, der die Einrichtung eines Containerdienstes plant. Die Situation kann durch folgende, zum Teil möglicherweise vereinfachende, Annahmen umrissen werden:

(1) Das Fahrtgebiet ist vorgegeben. Insbesondere ist bereits die Entscheidung gefallen, daß ein regelmäßiger Dienst zwischen zwei Ranges unterhalten werden soll. Jede Range umfaßt eine Anzahl von Häfen, deren geographische Entfernung untereinander im Vergleich zur Distanz zwischen den Ranges nur gering ist. Dem Unternehmen liegen alle relevanten Daten über die Häfen, wie maximal zulässiger Tiefgang, Ausstattung mit Umschlaganlagen, durchschnittliche Wartezeit, Umschlaggeschwindigkeit etc. sowie über die Infrastruktur des Hinterlandes vor, so daß alle technischen Kriterien für die Auswahl der Häfen gegeben sind. Diese Auswahl ist bereits in vorhergegangenen Planungsprozessen vorgenommen worden. Ferner ist darüber entschieden worden, in welcher Reihenfolge die Häfen nacheinander angefahren werden sollen. Die Zeiten für Revierfahrten innerhalb der einzelnen Ranges und die

#### Anschriften der Verfasser:

Professor Dr. Horst Seelbach  
Dr. Joachim Rohlfes  
Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre  
und Verkehrsbetriebslehre der Universität Hamburg  
Von-Melle-Park 9  
2000 Hamburg 13

<sup>1)</sup> Boysen, W., Container – warum überhaupt? Sind die gesamtwirtschaftlichen Kosten noch vertretbar? Korreferat gehalten auf dem Internationalen Transportseminar der Container 1975 in Hamburg. Seminar Auswertungsbericht, Hamburg 1976, S. 22–40.

<sup>2)</sup> Internationales Transportseminar der Container, veranstaltet von der AIESEC, Hamburg, im Herbst 1975.

<sup>3)</sup> Gilman, S., An Investigation into Some Effects of New Handling Technologies on the Structure of Marine Transport Systems, Marit. Stud. Mgmt. 2 (1975), S. 165–180.

umschlagsbedingten Liegezeiten der Schiffe werden als vom Schiffstyp unabhängige Konstanten unterstellt. Die Seezeiten für die Fahrten zwischen den Ranges sind abhängig von der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit des eingesetzten Schiffes.

(2) Die Nachfrage nach Transportleistungen gemessen in teu (*twenty feet equivalent unit*) ist für jede Relation und jede Frachtart hinsichtlich der Menge und des zeitlichen Anfalles bekannt. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit sei im folgenden unterstellt, daß die Nachfrage sich gleichmäßig über die Periode verteilt. Trendhafte Entwicklungen lassen sich gegebenenfalls ohne Schwierigkeiten in das weiter unten entwickelte Modell integrieren. Die auf den neu einzurichtenden Dienst entfallenden Mengen in den einzelnen Frachtarten sind abhängig von der Ausgestaltung des Dienstes selbst und von der anderer konkurrierender Dienste. Eine zu einem bestimmten Zeitpunkt angebotene Abfahrt veranlaßt einen Teil der Nachfrage, die eigentlich einen späteren oder früheren Abfahrtszeitpunkt präferieren, ihren Transportwunsch zeitlich zu verschieben, um die angebotene Leistungsmöglichkeit zu nutzen. Dieses Beharrungsvermögen der Nachfrage (Nachfragepersistenz) bewirkt, daß mit zunehmender Bedienungsfrequenz auf eine Relation *ceteris paribus* ein größerer Anteil der Gesamtnachfrage von dem Dienst angezogen wird<sup>4)</sup>. Die genauen Abhängigkeiten lassen sich nur anhand umfangreicher Marktanalysen abschätzen, wie sie speziell im Passagierflugverkehr üblich sind<sup>5)</sup>, die im Seetransport aber bis heute noch weitgehend fehlen. Die im Luftverkehr gewonnenen allgemeinen Aussagen erscheinen plausibel und werden im folgenden mangels eigener Untersuchungen auf den hier interessierenden Bereich des Seeverkehrs übertragen. Für jede Relation und jede Tarifklasse existiert eine Funktion, die den auf den einzurichtenden Dienst entfallenden Marktanteil in Abhängigkeit von der Bedienungsfrequenz angibt. Auf den möglichen Verlauf derartiger Funktionen ist in Teil 2 noch einzugehen. Die Funktionen sind Daten, d. h. markttechnische Einflüsse wie Konkurrenzaktivitäten oder Tarifveränderungen werden ausgeschlossen.

(3) Die Investitionsalternativen sind vorgegeben. Eine Alternative stellt dabei ein oder mehrere Schiffe eines Typs zusammen mit dem erforderlichen Containerinventar dar. Die Schiffstypen unterscheiden sich im Hinblick auf die Leistungserstellung in ihrer Tragfähigkeit (gemessen in teu) und der Geschwindigkeit. Soll das Resultat der Investitionsentscheidung eine homogene Flotte sein, so ist die Anschaffung von Schiffen unterschiedlicher Typen durch entsprechende Beschränkungen auszuschließen<sup>6)</sup>.

Es wird ferner vereinfachend unterstellt, daß Schiffe einer höheren Geschwindigkeitsklasse nicht schon deswegen ein höheres akquisitorisches Potential haben, weil die effektive Beförderungsdauer verkürzt wird<sup>7)</sup> und damit der Transportweg auch z. B. für verderbliche Ware in Frage kommt. Die höhere Geschwindigkeit wirkt also lediglich über die Dauer der Seezeit zwischen den Ranges auf die Investitionsentscheidung ein.

(4) Hinsichtlich der Hinterlandtransporte auf den beiden Ranges liegen Daten vor, sowohl über die Verteilung der Rückkehrzeit als auch über die durchschnittlichen Austauschquoten zwischen den Häfen einer Range. Durch diese Quoten wird dem Umstand Rechnung getragen, daß in einzelnen Häfen einer Range mehr Container gelöscht werden als von dort versendet werden und die überschüssigen Container auf dem Wege der Hinterlandtransporte

<sup>4)</sup> Gunn, W. A., *Airline System Simulation*, O.R. 12 (1964), S. 206–229; Lockheed, *Airline System Simulation*, Lockheed Cal. Company 1970.

<sup>5)</sup> Fetter, R. B., *A Linear Programming Model for Long Range Capacity Planning*, Mgmt. Sc. 7 (1961), S. 372.

<sup>6)</sup> Diese Forderung stimmt mit dem in der Praxis zu beobachtenden Verhalten von Reedereibetrieben überein.

<sup>7)</sup> Vgl. Lockheed, *Airline . . .*, a.a.O.

zu Häfen gelangen, in denen das Verhältnis von eingehender zu ausgehender Fracht umgekehrt ist. Aufgrund der Vielzahl der Dispositionsmöglichkeiten des Reedereiunternehmens bei der Gestaltung der Transporte zwischen den Häfen einer Range<sup>8)</sup> kann ohne allzu große Realitätsferne unterstellt werden, daß der unterschiedliche Anfall von Import- und Export-Containern auf Kosten der Rückkehrzeiten ausgeglichen werden kann. Für diese Rückkehrzeiten, d. h. die Verweildauer der Container von der Anlandung über Entladen, Beladen und zwischengeschaltete Transporte bis hin zum Eintreffen im Versandhafen, wird im folgenden vereinfachend eine Rechteckverteilung unterstellt:

Durch die Annahme einer anderen empirisch nachprüfbarer Verteilung werden die hier hergeleiteten Ergebnisse nicht grundsätzlich beeinträchtigt. Weiterhin wird vereinfachend<sup>9)</sup> von einem Containertyp (z. B. 20' Container) ausgegangen, d. h. alle Frachten werden transporttechnisch gleich behandelt. Entsprechend genügt eine Klassifizierung der Frachtarten allein nach der Frachtrate, die sie pro gefüllten Container Erlösen<sup>10)</sup>.

Ergebnis der Entscheidung ist ein Investitionsprogramm, das Art und Anzahl der anzuschaffenden Schiffe und die Mindestanzahl der einzusetzenden Einheitscontainer angibt und daneben ein Produktionsprogramm, durch das Art und Menge der nach Tarifklassen unterschiedenen Frachten, die über die einzelnen Relationen befördert werden, bezeichnet werden. Zielkriterien dieser Entscheidung können, um dem unterschiedlichen zeitlichen Anfall der Zahlung Rechnung zu tragen, die Kapitalwerte der Investitionsobjekte sein, deren Summe unter Einhaltung von bestimmten Nebenbedingungen zu maximieren ist. Bei der hier interessierenden Problemstellung handelt es sich um ein Beispiel einer langfristigen Planung, bei der Aussagen über die zukünftigen effektiven Einzahlungs- und Auszahlungsströme mit erheblicher Unsicherheit behaftet sind. Eine Individualisierung der einzelnen Folgeperioden kann daher nicht vorgenommen werden, es bleibt nur die Möglichkeit, für alle Teilperioden, deren Länge z. B. als 1 Jahr festgelegt wird, gleiche Zahlungsströme und damit eine in der Zeit unveränderliche Kosten- und Nachfragestruktur zu unterstellen. Da die Investitionen nur zu Beginn des Planungszeitraumes vorgenommen werden, kann durch Periodisierung der entsprechenden Anschaffungsausgaben eine gleichmäßige Belastung der einzelnen Teilperioden erreicht werden. Die Perioden unterscheiden sich daher nicht im Hinblick auf die Ein- und Auszahlungen, so daß auf eine zeitliche Gewichtung durch Diskontierung der Zahlungen verzichtet werden kann. Als Zielsetzung soll also die Maximierung der Differenz zwischen den Erlösen und den Kosten einer Periode einschließlich der periodisierten Anschaffungskosten gewählt werden.

## 1.2 Bisherige Forschungsergebnisse

Die Bestimmung der optimalen Fahrzeugflotte eines Verkehrsbetriebes ist wiederholt Gegenstand investitionstheoretischer Untersuchungen gewesen. Ein Ausgangspunkt für die Überlegungen ist der Fall eines Distributionsunternehmens, das sich einer saisonal schwan-

<sup>8)</sup> Möglichkeiten des Ausgleichs sind etwa die Änderung der Stauhöhe auf Revierfahrten oder die Durchführung entsprechender Hinterlandtransporte in Regie der Reederei.

<sup>9)</sup> Die Frage der qualitativen Anpassung der Container (z. B. Kühlcontainer, Tankcontainer) an das Frachtaufkommen bleibt also unberücksichtigt.

<sup>10)</sup> Damit wird eine sehr einfache Ratenstruktur unterstellt, wie sie lediglich für den FCL (full container load) Verkehr angetroffen wird, die sich an Menge, Wert und Ursprung-Zielhafenrelation orientiert. Vgl. Branch, A. E., *The Elements of Shipping*, 3rd ed., London 1975, S. 210.

kenden Nachfrage nach Transportleistungen gegenüber sieht<sup>11</sup>); alle Transporte sind auszuführen, wobei zur Bewältigung zeitlicher Nachfragespitzen die Möglichkeit besteht, zusätzliche Transportkapazitäten anzumieten. Eine andere in der Literatur behandelte Problemstellung ist eine simultane Bestimmung der Flottengröße und der Routen für die einzelnen Fahrzeuge, für den Fall, daß das Transportunternehmen einen vorgegebenen Bestand von Transportaufträgen, die sich durch Transportvolumen, Relation und Ausführungszeitpunkt unterscheiden, abzuwickeln hat<sup>12</sup>). Die von der Fragestellung her ähnliche Aufgabe, Umfang und Zusammensetzung der Fahrzeugflotte sowie deren fahrplanmäßigen Einsatz zu bestimmen, wobei die Nachfrage lediglich als ein Erwartungswert bekannt ist, wurden besonders im Hinblick auf den Passagierluftverkehr behandelt<sup>13</sup>). Für komplexere Problemstellungen aus diesem Bereich, bei denen die im Zeitablauf zyklischen Schwankungen der Nachfrage und die Wirkungen des Fahrplanes auf die effektive Inanspruchnahme der angebotenen Transportleistungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, wurden von verschiedenen Autoren Simulationsmodelle entwickelt<sup>14</sup>). Für die Anpassung der Flottengröße und -zusammensetzung an langfristige Nachfrageänderungen, die aber nicht nach den einzelnen Leistungsmöglichkeiten differenziert sind<sup>15</sup>), wurde von New ein auf den Arbeiten von Fetter aufbauender Lösungsansatz vorgestellt<sup>16</sup>). Die in den vorstehenden Veröffentlichungen entwickelten Planungsmodelle können nur zur Erklärung von Teilaspekten der hier behandelten Planungssituation beitragen. Ein wesentlicher zusätzlicher Gesichtspunkt ist die Einbeziehung des Containerbestandes und dessen zeitliche Bindung bei Hinterlandtransporten. Untersuchungen über Transportsysteme, die sich durch eine lose Kopplung von Transportgefäß und Antriebsaggregat<sup>17</sup>) auszeichnen, beschränken sich meist auf die kostenminimale Neuverteilung der leeren Gefäße von Orten mit geringem zu solchen mit höheren Ladungsaufkommen<sup>18</sup>). Schwarz publiziert einen ganzzahligen linearen Programmierungs-

<sup>11</sup>) Kirby, D., Is your Fleet the Right Size? Opl. Res. Q. 10 (1959), S. 252; Wyatt, J.K., Optimal Fleet Size, Opl. Res. Q. 12 (1961), S. 186 ff.; Gould, J., The Size and Composition of a Road Transport Fleet, Opl. Res. Q. 20 (1969), S. 81–92.

<sup>12</sup>) Dantzig, G.B., Fulkerson, D.R., Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule, Nav. Res. Log. Q. 1 (1954), S. 217; Levin, A., Scheduling and Fleet Routing Model for Transportation Systems, Trans. Sci. 4 (1970), S. 232–255; Bellmore, M., Bennington, G., Lubore, S., A Multivehicle Tanker Scheduling Problem, Trans. Sc. 5 (1971), S. 36–47; Appelgren, L.H., Integer Programming Methods for a Vessel Scheduling Problem, Trans. Sc. 5 (1971), S. 64–77; Mc Kay, M.D., Hartley, H.O., Computerized Scheduling of Sea-going Tankers, Nav. Res. Log. Q. 2 (1974), S. 255–264; Rohlfes, J., Fahrzeugeinsatzplanung im Gelegenheitsverkehr, Bd. 29 Verkehrswissenschaftliche Studien des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität Hamburg, Göttingen 1976.

<sup>13</sup>) Ferguson, A.R., Dantzig, G.B., The Allocation of Aircraft to Routes – an Example of Linear Programming under Uncertain Demand, Mgmt. Sci. 3 (1966), S. 45–73; Marshall, L., Tabak, D., Airline Route Allocation by Mixed Integer Programming, ORSA-TIMS-AIEE Joint Nat. Meeting, Atlantic City N.J. 1972.

<sup>14</sup>) Gunn, W.A., Airline . . . , a.a.O.; Hyman, W.; Gordon, L., Commercial Airline Scheduling Technique, Transp. Res. 2 (1968), S. 23–29; Simpson, R.W., Computerized Schedule Construction for an Airline Transportation System, MIT Technical Report FT 66–3, Cambridge Mass. 1966; Kondo, J., Airline Systems Simulation – a Computer System, J. Operations Research Soc. of Japan 10 (1968), S. 145–155; Lockheed, Airline . . . , a.a.O.

<sup>15</sup>) Mole, R.H., Dynamic Optimization of Vehicle Fleet Size, Opl. Res. Q. 26 (1975), S. 25–34.

<sup>16</sup>) New, C.C., Transport Fleet Planning for Multi-Period Operations, Opl. Res. Q. 26 (1975), S. 151–166; Fetter, R.B., A Linear . . . , a.a.O.

<sup>17</sup>) Bendixen, P., Die Leistungserstellung der Güterverkehrsbetriebe, Diss. Hamburg, 1966.

<sup>18</sup>) Gühlicher, H., Eine Anwendung der Technik des Linearen Programmierens zur Optimierung des Leerwagenumlaufes bei der Bundesbahn, ZfgSt 115 (1959), S. 54–71; White, W.W., Dynamic Transshipment Network – An Algorithm and its Applications to the Distribution of Empty Containers, IBM-Data Processing Division, New York Scientific Center Report No 320–296 Feb. 1969; Schlaepfer, F., Kostenoptimale Verteilung leerer Güterwagen, in: Nievergelt, Müller, Schlaepfer, Landis, Praktische Studien zur Unternehmensforschung, Berlin, Heidelberg, New York, 1970; Huch, J., Leertransporte im Containerverkehr, Diss. Göttingen 1973.

ansatz<sup>19</sup>), dessen Ausgangssituation interessante Parallelen zu der hier untersuchten Aufgabenstellung aufweist; es ist die Größe und die Zusammensetzung einer Schlepperflotte sowie die Zahl der dazugehörigen, untereinander identischen Schleppkähne zu bestimmen, die erforderlich sind, um einen durch Relationen, Transportmengen und Durchführungsdaten gekennzeichneten Auftragsbestand kostenminimal abwickeln zu können, wobei zur Überbrückung kurzfristiger Kapazitätsengpässe die Möglichkeit besteht, Frachtraum am freien Markt zu chartern. Auch hier werden das Investitions- und das Leistungsprogramm simultan geplant, der Transportbetrieb operiert aber in Form des Gelegenheitsverkehrs, bei dem der einzelne Nachfrager individuell berücksichtigt wird. Im Falle des Containerlinedienstes liegen dem Unternehmen dagegen nur globale Daten über die zu erwartende Nachfrage vor, so daß der Lösungsvorschlag von Schwarz nicht übertragbar ist.

### 1.3 Parameter der Nachfrage nach Transportleistungen

Bei einem Liniendienst zwischen zwei Ranges, die R<sub>1</sub> bzw. R<sub>2</sub> Häfen umfassen, wird ein ganzes Bündel von Transportleistungsmöglichkeiten gleichzeitig angeboten, wobei die Transportleistungen im Hinblick auf die Investitionsentscheidungen unter den oben genannten Annahmen lediglich hinsichtlich der Relation und der Frachtrate differenziert werden müssen.

Die Nachfrage nach diesen Leistungen ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, deren wichtigste neben der Bedienungsfrequenz der Preis, die Prozeßqualität und die Beförderungsdauer sowie saisonale und konjunkturelle Einflüsse sind. Es ist zu prüfen, inwieweit diese Parameter der Nachfrage durch einen einzelnen Reedereibetrieb zur Verwirklichung seiner Zielvorstellungen planmäßig beeinflusst werden können.

#### 1.3.1 Preis:

Auf den Seeverkehrsmärkten herrscht im allgemeinen oligopolistische Konkurrenz. Konkurrernde Linienverkehre sind in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle in Preiskartellen organisiert, um ruinösen Wettbewerb zu vermeiden. Eine eigenständige Preispolitik eines einzelnen Unternehmens ist daher in der Regel nicht möglich, die Preise für Beförderungsleistungen können als extern vorgegebene Daten angesehen werden.

#### 1.3.2 Prozeßqualität:

Im Vergleich zur konventionellen Stückgutfracht ist der Containertransport sicherer (Einsparungen an Verpackung) und weniger kostenintensiv bei den Hinterlandtransporten. Die Summe dieser Einsparungen fällt dem Verlager zu und stellt für ihn eine Transportverbilligung dar. Der sich in dieser Weise ergebende Preis für die Transportleistung bestimmt den Umfang der Nachfrage, d.h. die Verbesserung der Prozeßqualität wird systemspezifisch gesehen und ihre Auswirkungen können bereits in den zu erhebenden Daten berücksichtigt werden.

<sup>19</sup>) Schwarz, N.L., Discrete Programs for Moving Known Cargoes from Origins to Destinations on Time at Minimum Bargline Fleet Cost, Trans. Sci. 2 (1968), S. 134–145.

### 1.3.3 Beförderungsdauer:

Unter Beförderungsdauer soll die Zeitspanne zwischen Bereitstellung der Güter zum Transport durch den Verloader und dem Ankunftszeitpunkt beim Empfänger verstanden werden. Diese Zeitspanne hängt zum einen von der reinen Transportdauer, d.h. der Transportgeschwindigkeit ab, zum anderen von den Abfahrtsterminen der Schiffe des Liniendienstes, d.h. vom Fahrplan und damit von der Frequenz. Anders als im Personenverkehr dürften die genauen Zeitpunkte, zu denen die Schiffe abfahren, von sekundärem Interesse sein, sofern die Relation mit einer angemessenen Häufigkeit bedient wird. Die im Vergleich zur Bedienungsfrequenz üblicherweise nur geringen Unterschiede der Reisezeiten alternativer Schiffe hingegen sind für die Verloader im Hinblick auf die Kapitalbindungskosten im Rahmen eines Transportsystemes – wie z. B. dem Containerdienst – von untergeordneter Bedeutung. Der Einflußfaktor »Beförderungsdauer« läßt sich im wesentlichen also auf die Bedienungsfrequenz zurückführen.

### 1.3.4 Saisonale und konjunkturelle Einflüsse:

In der Regel dürfte das Ladungsaufkommen im Jahresablauf zyklischen Schwankungen unterliegen. In der hier diskutierten Entscheidungssituation sind jedoch vergleichsweise lange Zeiträume zu betrachten, so daß es sinnvoll ist, die kumulierte Nachfrage eines Jahres als Datum in das Modell eingehen zu lassen. Eine Anpassung des Schiffsraumangebotes an die saisonale Nachfrageschwankungen kann nur im Rahmen der kurz- oder mittelfristig vorzunehmenden Fahrplangestaltung erfolgen.

In den langfristigen Schwankungen des Welthandels spiegeln sich die konjunkturellen Entwicklungen der einzelnen Volkswirtschaften, die sich bei fortschreitender weltweiter handelsmäßiger Verflechtung zunehmend einander angleichen. Die Prognostizierung dieser Einflüsse ist für die Planung des Investitionsprogrammes äußerst wichtig, sie ist aber auch, wie die Entwicklungen auf den Frachtmärkten der jüngsten Vergangenheit gezeigt haben, äußerst problematisch. Eine investitionspolitische Anpassung der Fahrzeugflotte an diese Schwankungen ist, da die Schiffe eine Lebensdauer aufweisen, die im Vergleich zu Konjunkturzyklen relativ lang ist, nur bedingt möglich, etwa dadurch, daß die Auftragserteilung für den Bau eines Frachters auf einen späteren Zeitpunkt verschoben wird; eine Berücksichtigung dieser Entscheidungen im Rahmen eines Planungsmodells erscheint kaum möglich.

Die Bedienungshäufigkeit kann somit als einziger vom Reedereibetrieb zur Beeinflussung der Nachfrage geeigneter Entscheidungsparameter angesehen werden, zumal die Wahl der Frequenz über die Summe der See-, Hafenliege- und Revierfahrtzeiten, die ein Schiff insgesamt für das einmalige Durchfahren einer Rundreise von einem Hafen bis wieder zurück zu diesem Hafen benötigt, die Zahl der erforderlichen Schiffe und Container determiniert.

## 2. Modelldarstellung

### 2.1 Zielfunktion

#### 2.1.1 Transportvolumen (Ladungsaufkommen) und Deckungsbeiträge

Die Nachfrage nach Transportleistungen ist für einzelne Güter, die hier allein nach ihrer Tarifklasse und nach der Relation, auf der sie transportiert werden, differenziert werden sol-

len, in Abhängigkeit von der Bedienungsfrequenz  $f$  des Liniendienstes abzuleiten. Wenn die erste Range  $R_1$  Häfen und die zweite  $R_2$  Häfen enthält und  $I'$  Güterklassen auf jeder der  $R_1 \cdot R_2$  Relationen in jeder der beiden Richtungen zu unterscheiden sind, dann können  $I = R_1 \cdot R_2 \cdot I'$  Tarifklassen im Sinne von Transportleistungsarten nach den Merkmalen »Güterart« und »Strecke« definiert werden. Bezieht man so die Relation als die Verbindung zwischen je einem Hafen aus den beiden Ranges in die Definition der Tarifklassen  $i$ ,  $i = 1(1)I$ , ein, so kann der Begriff »Relation« auf die beiden möglichen Verbindungen der Ranges, Hinreise ( $r = 1$ ) und Rückreise ( $r = 2$ ) bezogen werden.

Geht man davon aus, daß eine Reederei von dem Gesamtladungsaufkommen innerhalb einer vorgegebenen Planungsperiode, die  $T$  Zeiteinheiten umfaßt, generell nur einen gewissen Anteil an sich ziehen kann, der als maximale Nachfrage in der gewählten Maßeinheit (teu) angegeben werden kann, so hängt die wirklich gewonnene Nachfrage unter den hier gesetzten Prämissen von der Häufigkeit der Bedienung der beiden Relationen während der Periode, d. h. von der Frequenz, ab.

Für die Nachfrage  $x_{ir}$  innerhalb der Tarifklasse  $i$  auf der Relation  $r$  sei der in Abb. 1 angegebene Verlauf unterstellt, wobei die maximale Nachfrage  $x_{ir}^{\max}$  bei der Frequenz  $f^{\max}$  erreicht wird. Um diese nichtlinearen Nachfragefunktionen  $x_{ir} = x_{ir}(f)$ ,  $i = 1(1)I$ ,  $r = 1,2$ , in einem linearen Planungsmodell berücksichtigen zu können, soll die Funktion durch ein Polygon angenähert werden. Das Frequenzintervall  $[0, f^{\max}]$  wird in  $M$  Teilabschnitte der Längen  $\bar{f}_m$  ( $m = 1(1)M$ ) zerlegt, innerhalb derer die Nachfrage jeweils als lineare Funktion angesehen wird. Da die Steigung der stückweisen linearen Funktion in den einzelnen Abschnitten unterschiedlich ist, muß die Variable  $f$  durch  $M$  Variablen  $\bar{f}_m$  ersetzt werden, die jeweils in den Bereichen

$$(V) \quad 0 \leq \bar{f}_m \leq \bar{f}_m \quad m = 1(1)M,$$

mit

$$\sum_{m=1}^M \bar{f}_m = f^{\max}$$

definiert sind.

Bezeichnet man die Steigung der linearisierten Nachfragefunktion nach Transportleistungen der Tarifklasse  $i$  auf Relation  $r$  innerhalb des  $m$ -ten Frequenzintervalls mit  $d_{irm}$ , dann ist die Nachfrage

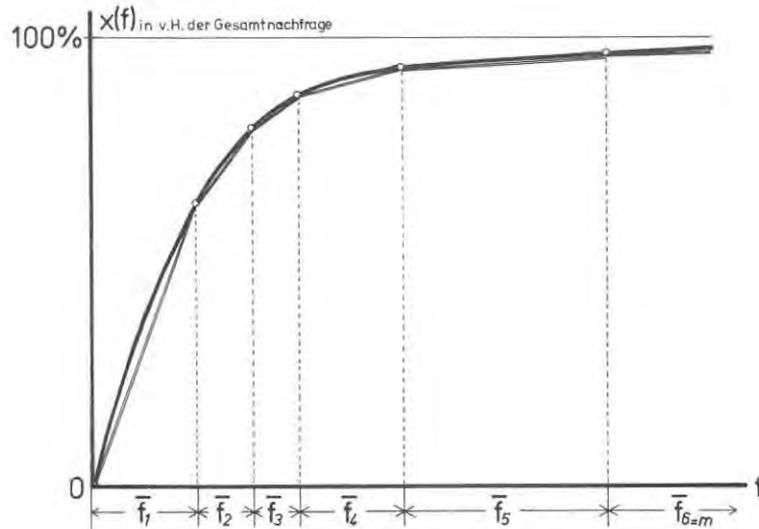
$$x_{ir} = \sum_{m=1}^M d_{irm} \cdot \bar{f}_m \quad (i = 1(1)I; r = 1,2)$$

und die maximal erreichbare Nachfrage

$$x_{ir}^{\max} = \sum_{m=1}^M d_{irm} \cdot \bar{f}_m \quad (i = 1(1)I; r = 1,2).$$

Die Werte der Entscheidungsvariablen  $\bar{f}_m$  sind nicht unabhängig voneinander festzulegen. Vielmehr darf  $\bar{f}_{m+1}$  erst einen positiven Wert annehmen, wenn die Variable  $\bar{f}_m$  ihren maxi-

Abbildung 1



malen Wert  $\bar{f}_m$  erreicht hat. Da die Nachfrage bzw. die auf ihr basierenden Frachten zu maximieren und  $d_{i,r,m+1} < d_{i,r,m}$  ( $i=1(1)I$ ;  $r=1,2$ ;  $m=1(1)M-1$ ) sind, ist die richtige Auswahl der Variablen stets gewährleistet, ohne zusätzliche Steuervariablen einzuführen<sup>20</sup>.

Geht man davon aus, daß die Beförderungstarife innerhalb der Tarifklassen unabhängig vom Transportaufkommen sind und daß der Preis für den Transport einer Einheit (teu) in Tarifklasse  $i$  auf Relation  $r$   $p_{ir}$  ist, dann gilt für den zu maximierenden Gesamterlös die Beziehung:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^2 p_{ir} \sum_{m=1}^M d_{i,r,m} \cdot f_m$$

Läßt man die Möglichkeit zu, daß die aufgrund der gewählten Bedienungshäufigkeit erzielbare Nachfrage nicht voll befriedigt wird, daß also beispielsweise wegen unterschiedlicher Transportaufkommen auf den beiden Relationen nur ein Teil der Transportaufträge ausgeführt wird, so müssen die durch nicht übernommene Transporte entgangenen Erlöse berücksichtigt werden. Um die erzielbaren Bruttogewinnbeträge zu erhalten, sind die Erlöse zusätzlich um die transportabhängigen, d.h. variablen Transport- und Handlingkosten zu vermindern. Bezeichnet man die Mengen der nicht ausgeführten Transporte in Tarifklasse  $i$  auf Relation  $r$  mit  $s_{ir}$  und die entsprechenden variablen Stückkosten mit  $k_{ir}$ , so erhält man die gesamten Bruttogewinnbeträge als:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^2 (p_{ir} - k_{ir}) \left( \sum_{m=1}^M d_{i,r,m} \cdot f_m - s_{ir} \right)$$

<sup>20</sup>) Vgl. im Gegensatz dazu Marshall, L., Tabak, D., Airline Route . . . , a.a.O., S. 20 ff.

### 2.1.2 Containersysteme und Betriebsmittelkosten

Neben den Deckungsbeiträgen, die durch die ausgeführten Transporte zu erzielen sind, muß die Zielfunktion des Investitionsmodells die durch Schiffe und Containerinventar verursachten Kosten für die Planungsperiode enthalten. Zu diesen Kosten gehören einerseits die periodenbezogenen Investitionsausgaben und die Bestandskosten, die sich aus der Unterhaltung und Nutzung der Betriebsmittel ergeben:

Die anteiligen Investitionskosten erhält man sowohl für die zur Wahl stehenden Schiffe als auch für die benötigten Container, indem die gesamten Anschaffungsausgaben auf die Gesamtnutzungsdauer gleichmäßig verteilt werden und der der Länge der Planungsperiode entsprechende Anteil in den Kostenkoeffizienten der Entscheidungsvariablen »Schiffe« bzw. »Container« einbezogen wird.

Die Bestandskosten für die Schiffe müssen neben den reinen Wartungskosten auch die gesamten Reisekosten, einschließlich beispielsweise der Hafengebühren, Lösch- und Ladekosten für alle Reisen der Planungsperiode enthalten. Da die Zahl der Reisen für einen Schiffstyp in der Planungsperiode Datum ist<sup>21</sup>), sind die durch ein Schiff eines bestimmten Typs verursachten Kosten konstant. Die Bestandskosten der Container beschränken sich im wesentlichen auf die Aufwendungen für die Wartung des benötigten Inventars.

Bezeichnet man die Zahl der anzuschaffenden Schiffe vom Typ  $j$  mit  $y_j$  ( $j=1(1)J$ ), die Zahl der benötigten 20'-Container mit  $z$ , die periodisierten Investitions- und Bestandskosten eines Schiffes vom Typ  $j$  mit  $a_j$  und die eines Containers mit  $b$ , dann lautet die Zielfunktion des Modells:

$$(Z) \quad \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^2 (p_{ir} - k_{ir}) \left( \sum_{m=1}^M d_{i,r,m} \cdot f_m - s_{ir} \right) - \sum_{j=1}^J a_j \cdot y_j - b \cdot z \rightarrow \max!$$

### 2.2 Nebenbedingungen

Da die Entscheidungsvariablen, Frequenz, Zahl und Typ der Schiffe sowie Zahl der Container, voneinander abhängig sind, ist es erforderlich, in Form von Nebenbedingungen, die als Gleichungen oder Ungleichungen zu formulieren sind, die bestehenden Beziehungen zu erfassen. Dazu gehören Frequenzbedingungen, die den Zusammenhang zwischen der gewünschten Bedienungsfrequenz und den durch die Schiffe ausgeführten Reisen darstellen, Kapazitätsbeschränkungen, die gewährleisten, daß die dem Transportvolumen entsprechenden Schiffskapazitäten geschaffen werden, und Bedingungen, die die Zahl der benötigten Container bestimmen.

#### 2.2.1 Frequenzbedingungen

Die Bedienungshäufigkeit der beiden betrachteten Relationen ergibt sich aus der Zahl der Rundreisen, die Schiffe der verschiedenen Typen jeweils innerhalb der Planungsperiode ausführen können, multipliziert mit der entsprechenden Anzahl der gekauften Schiffe. Die Dauer einer Rundreise läßt sich schiffsspezifisch aus den durchschnittlichen Reisegeschwin-

<sup>21</sup>) Vgl. Abschnitt 2.2.1.

digkeiten, den Hafentiegezeiten und der vorgegebenen Gesamtentfernung der Reise ermitteln. Dividiert man die Länge der Planungsperiode durch die Rundreisezeit des Schiffstyps  $j$ , so erhält man die Zahl der von einem Schiff dieses Typs in der Planungsperiode ausführbaren Reisen  $h_j$ . Damit ergibt sich die Frequenz

$$(F) \quad \sum_{m=1}^M f_m = \sum_{j=1}^J h_j \cdot y_j$$

### 2.2.2 Kapazitätsbeschränkungen

Ausgehend von der Zahl der Rundreisen der Schiffe läßt sich durch Einbeziehen der jeweiligen Kapazität  $c_j$  eines Schiffes vom Typ  $j$  die Periodenkapazität der anzuschaffenden Flotte angeben. Diese Kapazität steht auf beiden Relationen zur Verfügung und muß so dimensioniert sein, daß sie mindestens dem Transportvolumen entspricht. Es gilt also:

$$(K) \quad \sum_{i=1}^I \left( \sum_{m=1}^M d_{im} \cdot f_m - s_{ir} \right) \leq \sum_{j=1}^J c_j \cdot h_j \cdot y_j \quad (r=1,2).$$

### 2.2.3 Containerbestand

Das benötigte Container-Inventar setzt sich aus zwei Teilmengen zusammen, aus Containern, die sich mit Ladung oder auch leer auf den Schiffen befinden, und aus Containern, die bis zur Abfahrt eines Schiffes im Hafen lagern oder sich im Hinterland im Umlauf befinden. Bei jeder Abfahrt eines Schiffes von einer Range muß gewährleistet sein, daß für das Ladungsaufkommen einer Reise genügend Container bereitstehen. Da bei Beginn der Planung nicht bekannt ist, welche Schiffstypen in das Investitionsprogramm aufgenommen werden, wird vereinfachend angenommen, daß der Containerbestand so dimensioniert ist, daß auf beiden Hafentypen bei jeder Abfahrt Container entsprechend der maximalen Schiffskapazität

$$c_{\max} = \max \{c_j, j = 1(1)J\}$$

bereitstehen, d.h. aus dem Hinterland zurückgekommen sind, und bei der Ankunft eines Schiffes angelandet werden. Bei der hier unterstellten Rechteckverteilung der Rückkehrzeiten stehen  $D$  Zeiteinheiten nach einer Ankunft alle angelandeten Container wieder in den Häfen der Range zur Verladung bereit, wobei sich ein stetiger Rückfluß mit der Rücklaufzeit  $c_{\max}/D$  ergibt. Die Häfen einer Range werden dabei als Einheit betrachtet<sup>22)</sup>. Der Containerbestand in Häfen und Hinterland einer Range entwickelt sich wie folgt<sup>23)</sup>:

Beginnend mit dem Zeitpunkt ( $t=0$ ) der Ankunft eines Schiffes treffen bis unmittelbar vor dem Zeitpunkt  $D$  insgesamt  $(n+1)$  Schiffe ein, wenn

$$n = \left[ \frac{D}{L} \right],$$

$L = T/f$  die Zwischenankunftszeit der Schiffe und  $[q]$  der nächstniedrigere ganzzahlige Wert des Quotienten  $q$  ist. Die Anzahl der insgesamt angelandeten Container beträgt dann  $(n+1)c_{\max}$ .

<sup>22)</sup> Vgl. Prämisse (4) in Abschnitt 1.1.

<sup>23)</sup> Auf eine Differenzierung der Containerbestände der beiden Ranges wird hier aus Darstellungsgründen verzichtet. Sie ließe sich jedoch ohne grundsätzliche Schwierigkeiten einbeziehen, indem die maximale Verweildauer  $D$  unterschiedlich angenommen wird.

Bei der angenommenen Rücklaufzeit sind zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abfahrten  $(L/D)c_{\max}$  Container zurückgelaufen und können somit wieder verladen werden. Da mit dem Eintreffen weiterer Schiffe die Rücklaufzeit bis zum Zeitpunkt  $D$  erhöht wird, beträgt die Zahl der bis  $D$  wieder verladbaren Container:

$$H = (L/D)c_{\max} \sum_{v=1}^n v \\ = (L/D)c_{\max} (n+1)n/2.$$

Damit ergibt sich nach einer Anlaufphase der Containerbestand an Land innerhalb einer Range  $B$  mit:

$$B = \left( (n+1) - (L/D) \cdot (n+1)n/2 \right) c_{\max} \\ = (n+1) (2-n \cdot L/D) c_{\max}/2.$$

Anhand eines einfachen Beispiels mit  $D = 10$  Zeiteinheiten,  $L = 3$  Zeiteinheiten und  $c_{\max} = 1$  soll die Entwicklung des landseitigen Containerbestandes einer Range im Zeitablauf  $B(t)$  graphisch illustriert werden (vgl. Abb. 2). Zusätzlich ist der jeweils im Hafen zur Verladung bereitstehende Containerbestand  $H(t)$  wiedergegeben.

Bei vorgegebener maximaler Rücklaufzeit  $D$  und maximaler Schiffskapazität  $c_{\max}$  ist der Containerbestand an Land allein von der Zwischenankunftszeit  $L$  und damit bei gegebener Planungsperiode von der Frequenz  $f$  abhängig:

$$B(f) = (n+1) \left( 2-n \cdot T/(f \cdot D) \right) c_{\max}/2.$$

Auch diese Abhängigkeit, die den Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen mitbestimmt, sei beispielhaft erläutert. Abb. 3 gibt für  $D = 4$  Zeiteinheiten,  $T = 10$  Zeiteinheiten,  $c_{\max} = 1$  und einige Frequenzwerte  $1 \leq f \leq 10$  den Funktionsverlauf wieder.

Abbildung 2

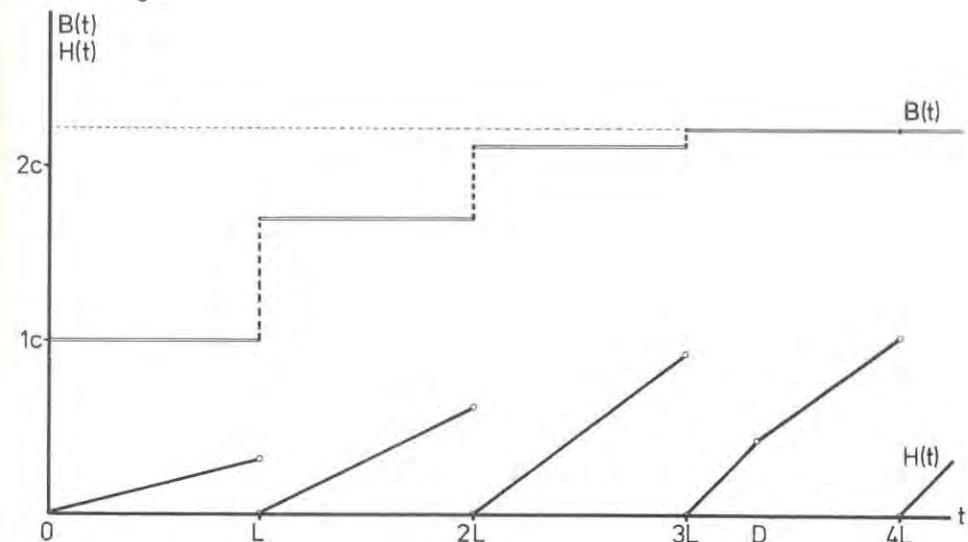
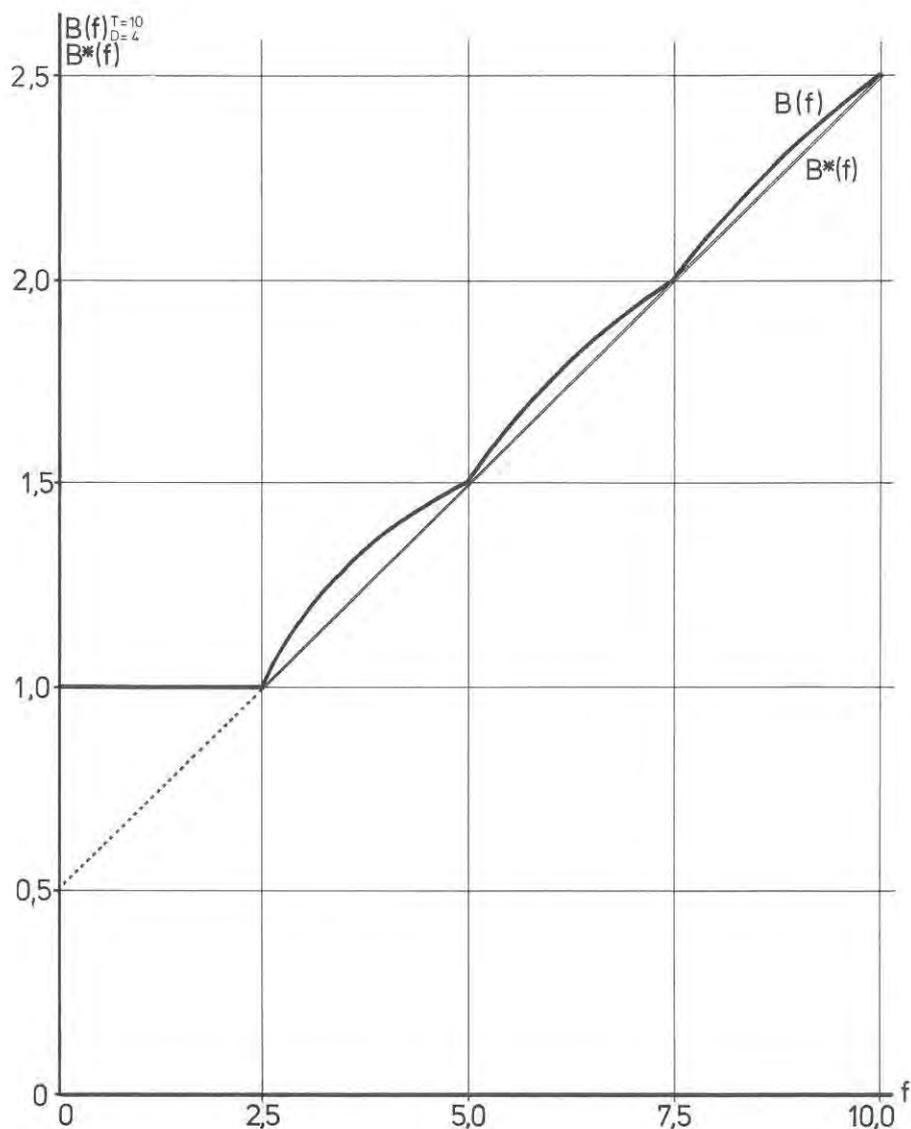


Abbildung 3



Dabei ist erkennbar, daß für den Frequenzbereich  $0 \leq f \leq T/D$  der Containerbedarf auf einer Range gerade der zugrundegelegten Schiffskapazität entspricht. Bei einer Erhöhung der Frequenz über den Wert  $T/D$  hinaus weist – zumindest in dem vorliegenden Beispiel –

der Bedarf  $B(f)$  einen annähernd linearen Verlauf auf. Dieser lineare Verlauf ergibt sich, wenn man in der Bestimmungsgleichung für  $B(f)$  die Ganzzahligkeit des Quotienten  $D/L$  vernachlässigt und statt dessen jeweils den Wert  $D/L-1$  bzw.  $D \cdot f/T-1$  einsetzt. Damit erhält nach einigen Umformungen

$$B^*(f) = (D \cdot f/2T + 1/2)c_{max}$$

Geht man von dieser näherungsweise Bestimmung des Containerbedarfes auf einer Range aus, dann erhält man für den insgesamt an Land befindlichen Containerbedarf in Abhängigkeit von der Frequenz

$$((D/T) \cdot f + 1) \cdot c_{max}$$

Um die Gesamtzahl  $z$  aller benötigten Container zu ermitteln, muß zusätzlich das auf allen Schiffen befindliche Inventar berücksichtigt werden. Auch hier soll wegen fehlender Informationen über die Verteilung der Periodennachfrage auf einzelne Reisen, nicht die Auslastung der Schiffe auf den Reisen, sondern die Schiffskapazität als Maßgröße dienen. Somit ergibt sich ein benötigter Containerbestand in Höhe von:

$$z = \sum_{j=1}^J c_j \cdot y_j + ((D/T) f + 1) c_{max}$$

oder mit

$$f = \sum_{m=1}^M f_m$$

(C)

$$z = \sum_{j=1}^J c_j \cdot y_j + ((D/T) \sum_{m=1}^M f_m + 1) c_{max}$$

Der Containerbestand ist also direkt abhängig von den Werten der Entscheidungsvariablen  $y_j$  und  $f_m$ .

2.2.4 Zusammenfassung des Investitionsmodells

Faßt man die in den Vorabschnitten entwickelten Zielfunktionen und Beschränkungen, ergänzt durch Nichtnegativitätsbedingungen zusammen, so erhält man das folgende lineare Investitionsmodell:

Maximiere:

$$(Z) \quad \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^2 (p_{ir} - k_{ir}) \sum_{m=1}^M d_{irm} \cdot f_m - s_{ir} - \sum_{j=1}^J a_j \cdot y_j - b \cdot z$$

unter Beachtung von

$$(F) \quad \sum_{m=1}^M f_m = \sum_{j=1}^J h_j \cdot y_j$$

$$(V) \quad f_m \leq \bar{f}_m \quad m = 1(1)M$$

$$(K) \quad \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M d_{irm} \cdot f_m - s_{ir} \leq \sum_{j=1}^J c_j \cdot h_j \cdot y_j \quad r = 1, 2$$

$$(C) \quad z = \sum_{j=1}^J c_j \cdot y_j + \left( \frac{D}{T} \sum_{m=1}^M f_m + 1 \right) c_{\max}$$

$$(N) \quad \begin{array}{ll} f_m \geq 0 & m = 1(1)M \\ y_j \geq 0 & j = 1(1)J \\ z \geq 0 & \end{array}$$

### 3. Erweiterungen

Das vorgestellte Investitionsmodell kann in verschiedener Weise erweitert werden, um es an die Bedingungen der wirtschaftlichen Wirklichkeit genauer anpassen zu können. Naturgemäß muß ein solcher modifizierter Ansatz komplexer werden, so daß die Grenzen der Lösbarkeit schnell erreicht werden. Die folgenden Teilabschnitte sollen lediglich beispielhaft einige Überlegungen wiedergeben, in welcher Weise einzelne, von der wirtschaftlichen Praxis möglicherweise zusätzlich geforderte Nebenbedingungen in das Modell integriert werden können.

#### 3.1 Schiffstypabhängige Nachfragekomponenten

In den Prämissen (2) und (3) ist ausdrücklich eine Abhängigkeit des auf den Containerdienst entfallenden Nachfragevolumens vom eingesetzten Schiffstyp – speziell von dessen Geschwindigkeit – ausgeschlossen worden. In der Realität ist jedoch zu beobachten, daß kürzere Seezeiten zum einen bewirken, daß das Transportsystem für zusätzliche Frachten – z. B. leicht verderbliche Waren – attraktiv wird, zum anderen wird die Persistenz, d. h. die Bereitschaft der Nachfrager, den Abfahrtszeitpunkt zeitlich zu verschieben, der Tendenz nach erhöht. Diesem Phänomen kann durch die Vorgabe empirisch abgesicherter, fahrzeugspezifischer Persistenzfunktionen Rechnung getragen werden, d. h. die Nachfrage wird nicht nur nach Tarifklasse  $i$  und Beförderungsrichtung  $r$ , sondern auch nach dem eingesetzten Schiffstypen  $j$  differenziert. Die Zahl der Frequenzvariablen  $f_m$  und -bedingungen (V) vervielfacht sich dann entsprechend der Zahl der Schiffstypen. In der Zielfunktion (Z), den Kapazitätsbedingungen (K) und der Gleichung für den Containerbedarf (C) ist die zusätzliche Differenzierung der Größen zu berücksichtigen.

#### 3.2 Homogenität der Flotte

Wie in Prämisse (3) erwähnt wurde, läßt sich die Forderung nach einer homogenen Flotte als Ergebnis der Investitionsplanung nur durch Einführung zusätzlicher Nebenbedingungen realisieren. Außerdem ist für jeden Schiffstyp  $j$  eine Binärvariable  $u_j$  zu definieren, deren Wert nur dann Eins ist, wenn der Schiffstyp  $j$  in der Flotte enthalten ist, im übrigen aber Null ist. Die Homogenitätsforderung ist gewährleistet, wenn gilt:

$$(H_1) \quad \sum_{j=1}^J u_j \leq 1$$

$$(H_2) \quad y_j \leq A \cdot u_j \quad j = 1(1)J$$

und  $A$  eine so groß bemessene Konstante ist, daß durch sie die Beschaffungsmöglichkeiten von Schiffen nicht begrenzt werden. Nur die Investitionsvariable  $y_j$  kann einen positiven Wert annehmen, für deren zugehörige Binärvariable  $u_j = 1$  gilt.

Mit Einführung der Steuerungsvariablen  $u_j$  kann zwar der bei Abfahrt eines Schiffes erforderliche Containerbestand

$$c_{\max} = \max \{c_j \mid j=1(1)J\}$$

auf die Kapazität des wirklich gewählten Schiffstyps reduziert werden, indem  $c_{\max}$  durch

$$\sum_{j=1}^J c_j \cdot u_j$$

ersetzt wird, jedoch ist diese Summe multiplikativ mit den Frequenzvariablen in der Bestandsgleichung (C) verknüpft. Durch eine Umformulierung dieser Bedingung läßt sich das nichtlineare in ein lineares, gemischt-ganzzahliges Programm transformieren.

Die Homogenitätsforderung resultiert daher, daß bei Einrichtung eines neuen Dienstes die erforderliche Anzahl von Schiffen in der Regel bei einer Werft in Auftrag gegeben wird und daß die Abnahmepreise bei gleicher Konstruktion der Schiffe mit steigender Abnahmemenge fallen. Nebenwirkungen dieser Art auf die Kostensituation können in der Weise berücksichtigt werden, daß ein entsprechend auf die Perioden umgelegter Fixkostenbetrag für jeden Schiffstyp in der Zielfunktion eingeführt wird, der multiplikativ verbunden mit den Auswahlvariablen  $u_j$  die zusätzlichen Kosten angibt, um die das erste Schiff einer Serie teurer ist als die folgenden. Weitere Preisnachlässe bei größerem Serienumfang – die in der Praxis üblich sind – lassen sich allerdings kaum noch berücksichtigen. Da die Anzahl  $J$  der in Frage kommenden Schiffstypen relativ gering sein dürfte, ist auch die Lösbarkeit des um  $J$  Binärvariablen erweiterten Modells mit gängigen Algorithmen für gemischt-ganzzahlige Programme eventuell noch gewährleistet.

#### 3.3 Stochastischer Charakter der Nachfrage

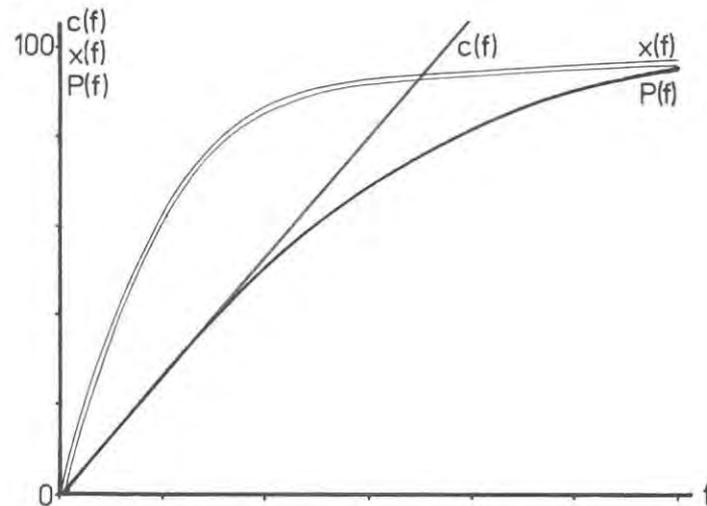
Systematische Schwankungen der Nachfrage nach Transportleistungen, bedingt beispielsweise durch jährliche Erntezyklen usw., können bei einem Ansatz für die langfristige Planung – wie bereits erwähnt – vernachlässigt werden; denn das Transportsystem wird sich im Rahmen der kurzfristigen Transportprozeßplanung an derartige Schwankungen anpassen.

Für die Gesamtnachfrage und damit auch für die auf den Dienst entfallende Nachfrage wurden bisher Erwartungswerte unterstellt. Die auf der Relation einzusetzende Fahrzeugkapazität muß volumenmäßig so beschaffen sein, daß zufallsbedingte, über diesen Erwartungswert hinausgehende Nachfragespitzen bis auf mit nur sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftretende, extrem hohe Ausschläge bedient werden können. Für die Verteilung der auf den Dienst entfallenden Nachfrage kann eine Normalverteilung unterstellt werden, deren Standardabweichung wie auch die Parameter, die den Verlauf der Persistenzfunktion bestimmen, nur aufgrund empirischer Untersuchungen geschätzt werden können<sup>24)</sup>. Die zur Beförderung der voraussichtlich wirksam werdenden Nachfrage bereitzustellende Kapazität ist proportional zur Schiffsgröße  $c_j$  und zur Bedienungshäufigkeit. In einem Nachfragediagramm (vgl. Abb. 4) ergibt sich das von der Frequenz abhängige Kapazitätsangebot als Gerade durch den Nullpunkt mit der als Prozentsatz der Gesamtnachfrage gemessenen Schiffskapazität

<sup>24)</sup> Vgl. Gunn, W. A., *Airline . . .*, a.a.O., S. 212.

als Steigung. Das über einen größeren Zeitraum bei einer bestimmten Frequenz beförderte Frachtvolumen  $P(f)$  ist geringer als die bei dieser Frequenz aufgebotene Gesamtkapazität; denn wenn z.B. die Kapazität ausreicht, um den Erwartungswert der wirksam werdenden Nachfrage aufnehmen zu können, so wird nur in der Hälfte aller Fälle diese Kapazität wirklich genutzt – dann nämlich, wenn der wirkliche Nachfragewert größer oder gleich dem Erwartungswert ist. In den übrigen Fällen bleibt die wirkliche Nachfrage unter dem Erwartungswert und die Kapazität wird nicht voll ausgelastet. Die sich in dieser Weise für jede Tarifklasse ergebende Funktion der effektiv beförderten und damit erlös wirksam werdenden Nachfrage weist wie die Persistenzfunktion einen konkaven Verlauf aus, so daß die dargestellte Linearisierung auch hier möglich ist. Bei niedrigen Frequenzen tritt nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit der Fall auf, daß die Nachfrage geringer als das Kapazitätsangebot ist, so daß sich die Funktion in diesem Bereich der Kapazitätsgeraden annähert. Bei hohen Frequenzen dagegen reicht das Kapazitätswolumen aus, auch die mit nur geringer Wahrscheinlichkeit auftretenden, extremen Nachfragespitzen aufzunehmen, d.h. das wirklich beförderte Frachtvolumen nähert sich dem Erwartungswert der auf den Dienst entfallenden Nachfrage (vgl. Abb. 4).

Abbildung 4



Die erlösbestimmende Komponente der Zielfunktion ist nun nicht mehr von dem Erwartungswert der wirksam werdenden Nachfrage, sondern von der effektiv beförderbaren Menge  $P(f)$  abhängig. Die Kapazitätsbedingungen dagegen bleiben unverändert, denn sie sollen ja gerade gewährleisten, daß bei einer bestimmten Frequenz der Teil  $x(f)$  der Gesamtnachfrage auf lange Sicht befördert werden kann.

## Summary

Decision models developed by economy theory for use in the planning of investment are commonly concerned with the conditions in manufacturing industry. The adaptation of those models for the needs of transport economics is apart from other aspects heavily depending on how one succeeds to convert all factors influencing a certain planning situation into control parameters, which can be quantified. The following exposition presents an attempt to design a linear programming model for the planning of investment into a container service, which is connecting two ranges of harbours on different continents. It is assumed that demand for this service is a function of the frequency the service is offered.

## Résumé

Des modèles tendant à soutenir la planification des investissements ont été développés dans la théorie de l'économie de l'entreprise surtout à l'égard des établissements de production. La possibilité de les appliquer sur les entreprises de transport dépend entre autres du fait, si on réussit à quantifier les paramètres décisives d'une certaine situation de planification. Dans l'exposé suivant l'auteur essaie de concevoir un modèle linéaire d'investissements en vue de l'organisation d'un service de containers en y comprenant la demande de services de transport comme fonction de la fréquence d'une relation entre deux régions de port.