ÖKONOMISCHE WIRKSAMKEITSENTSCHEIDUNGEN IM STÄDTISCHEN MASSENVERKEHR

Von

G. GYULAI

Lehrstuhl für Verkehrsbetrieb, Technische Universität, Budapest
(Eingegangen am 30. Dezember 1970)

(Vorgelegt von Prof. Dr. I. TURÁNYI)

Der eigentliche Endzweck der Planung von Massenverkehrsprozessen besteht — in Kenntnis von Richtung und Größe der Verkehrsströme — in der Planung der Linien mit den Fahrzeugen und dem Personal zu ihrer Bedienung sowie den Endhaltestellen, sodann in der Fahrplanbildung, wobei der Fahrplan die Zeitordnung des Prozesses angibt. Nach den Merkmalen des städtischen Massenverkehrs richten sich die gestellten Ansprüche, von denen aus der Sicht der LeistungsbeanspruchER *das vorrangige Ziel in der Verminderung des Zeitbedarfs für die Ortsveränderung* besteht, die jedoch wegen dem immer empfindlicheren Mangel an Verkehrsfläche, der Fahrzeugausnutzung und der Produktivität des Personals (Platzkm/h) auch für den Betrieb nicht ohne Interesse ist.

Auch für die Benutzer ist es jedoch nicht gleichgültig, was die Befriedigung ihrer Ansprüche (Geschwindigkeit, Kultur des Verkehrs usw.) kostet, da doch in der sozialistischen Wirtschaft die Kosten in ihrer Gänze *auf die Bevölkerung zurückfallen*, u. zw. auf jene, die die Leistung in Anspruch nehmen.

a) Durch diesen Umstand ist also die *volkswirtschaftliche Betrachtungsweise* unserer Berechnungen begründet. Die vorgeführten Überlegungen erfordern einerseits eine *Kostenverminderung* der Leistungen, im vorliegenden Falle des Verkehrs, anderseits muß in der *Steigerung der Ansprüche* bei einem optimalen Punkt haltgemacht werden, wo die Summe der unter verschiedenen Titeln anfallenden Aufwendungen *minimal* ist.

b) Unter den Kosten steht auch der Geldgleichwert des Zeitaufwands der Fahrgäste sowie Abschreibung und Produktionsfondsabgabe der Investitionen für eine bessere Bedienung mit höherer Genauigkeit, und damit läßt sich die Frage in Form der ökonomischen *Wirksamkeit* — konkret in Form der Investitionswirksamkeit — auch derart erfassen, daß der Quotient aus den Investitionen sowie den durch diese verursachten bzw. ermöglichten Kostengestaltungen *innerhalb der reellen Umschlagszeit bleibe.*

c) Unser wirtschaftlicher Mechanismus erfordert schließlich auch eine *Rentabilitäts*einstellung, und werden auch bei den Untersuchungen der gegebene Gewinnprozent und der Tarif als identisch betrachtet, dürfen die Maßnahmen nicht außer acht gelassen werden, durch die die *Einnahmegestaltung* günstig beeinflußt wird. Von den bei der Prozeßplanung für den städtischen Massenverkehr vorhandenen Alternativen ist immer die wirksamste zu wählen.

1. Die optimale Wegstrecke

Die als optimal bezeichnete Wegstrecke der Strömungen zwischen zwe Endpunkten wird meistens aufgrund der *minimalen Reisezeit*, u. U. unter Berücksichtigung der Streckenlänge oder der Betriebskosten bestimmt. Es soll hier davon abgesehen werden, daß nicht von jedem Fahrgast diese einzige Wegstrecke gewählt wird, sondern sich die Fahrgäste nach irgendeinem Gesetz (Normalverteilung, Kirchhoffsches Modell usw.) auf alternative Wegstrecken verteilen [1]. Es stellt sich auf jeden Fall die Frage, was dann geschehen wird, wenn die — wegen der minimalen Reisezeit gewählte — Wegstrecke *nicht die kürzeste ist*, sondern sich I. die höheren Gleisbau- und II. Betriebskosten auf der längeren Strecke geltend machen, die jedoch III. durch geringere Fahrzeugamortisation für die kürzere Reisezeit sowie — *auf volkswirtschaftlicher Ebene* — durch IV. die Zeitersparnis der Fahrgäste gemäßigt werden. Das trifft zu, wenn auf der kürzeren Wegstrecke häufige Verkehrsstockungen, Verzögerungen vorkommen — die auch einen Energieverlust verursachen — und dieser kürzeren Wegstrecke z. B. eine äußere Verbindungslinie mit einer geringen Zahl von Knotenpunkten oder einem vom Straßenverkehr unabhängigen Bahnkörper gegenübersteht. Im Falle von gegensätzlichen Interessen wird es am richtigsten sein, die Gesamtaufwendungen auf volkswirtschaftlicher Ebene aus der Sicht des Fahrgastes zu betrachten und ein *gemeinsames Optimum* anzustreben, da vom Fahrgast nur dann eine Verminderung der Reisezeit gefordert wird, wenn deren Geldgleichwert höher ist als die verursachte Zunahme der Betriebskosten. Wie können der Betriebskostenzunahme — auf der längeren Strecke — gegenüber doch Einsparungen entstehen [1]?

	Wegstrecke 1	Wegstrecke 2
Linienlänge l sei	kürzer	länger
Reisezeit t sei	länger	kürzer
Geschwindigkeit s in m/s ist also	geringer	höher
I. Gleisamortisation ist	geringer	größer (wegen der größeren Länge)
II. Arbeits- und Betriebskosten		
a) zufolge der Länge	geringer	höher
b) zufolge von Energieverlust	höher	geringer (wegen Reisegeschwindigkeit)
III. Fahrzeugamortisation	größer	geringer (wegen der Zeit)
bis hierher summiert: Betriebsergebnis, dazu kommt		
IV. Fahrgaststundenaufwendung, die	größer	kleiner ist:

Daraus ergibt sich der volkswirtschaftliche Stand (Abb. 1a).

I. Die Amortisation des *Gleisbaues* je Stunde und Meter, ergänzt durch die Erhaltungskosten — da in diesem Falle die Verkehrsbelastungen querschnittsweise dieselben sind — sollen durch k_g bezeichnet werden. Diese ist auf der längeren Strecke (l_2) größer, damit ergibt sich zu Lasten der Wegstrecke 2 eine Kostendifferenz

$$K_{\mathrm{I}} = (l_2 - l_1) \cdot k_g.$$

II. Die *Arbeit* der während einer Stunde abgehenden Wagen ist zwar den Streckenlängen proportional, zufolge von Verzögerungsstrecken, Wartezeiten in Knotenpunkten Kp ist die angesetzte Reisezeit t_1 auf der kürzeren Strecke l_1 dennoch länger. Dieser Umstand läßt sich dadurch kennzeichnen, daß auf der kürzeren Strecke l_1 der Wagen in jedem Haltestellenabstand z. B. je einmal auf Null abgebremst und nach einer Wartezeit t_w auf die volle Geschwindigkeit beschleunigt werden muß, wofür ein Energieaufwand erforderlich ist. Die Zahl der zusätzlichen Anhalte A beträgt — unter der Voraussetzung eines mittleren Haltestellenabstands von 500 m —

$$A = \frac{2\,l_1 - l_2}{500}\,.$$

Die Arbeit je Wagen auf der kürzeren Strecke l_1 ergibt sich nach fahrdynamischen Überlegungen, unter Berücksichtigung des Arbeitsbedarfs bei Beschleunigung und bei gleichmäßiger Geschwindigkeit, ferner der durch die Widerstände beeinflußten Anlauf- und Bremsstrecken zu:

$$L_1 = Q\left(56 \cdot s_1^2 + 56 \cdot s_1^2 + f \cdot l_1 - \frac{s_1^2 - s_0^2}{19{,}6} - f \cdot \frac{s_0^2}{2 \cdot b}\right);$$

$$\text{mit } 56 = \frac{1000}{9{,}81} \cdot \frac{1{,}08}{2}\,. -$$

Aus der Längendifferenz erhält man in der Regel eine Arbeitsdifferenz mit positivem Vorzeichen, wenn L_1 von L_2 in Abzug gebracht wird; zwar kann es vorkommen, daß der zusätzliche ***Energieverbrauch*** wegen den Anhalten ***größer ist***, und damit die Arbeitsdifferenz zur negativen Zahl wird. In dieser Hinsicht wird dann den Fahrgästen die Strecke l_2 mit der kürzeren Reisezeit günstiger erscheinen. Werden die Betriebskosten für die Einheitsarbeit mit k_m bezeichnet, errechnet man die Betriebskostendifferenz für $F/0{,}9\,Z$ Abfahrten (s. Punkt III) unter Vernachlässigung eines unverhältnismäßig kleinen Quotienten, der die Differenzen der Geschwindigkeitsquadrate beinhaltet, zu:

$$K_{\mathrm{II}} = \frac{F}{0{,}9Z}\left\{56Q\left[(1 + A)s_1^2 - s_2^2 + Qf(l_1 - l_2)\right]\right\} k_m.$$

Dabei bedeuten: s höchste Geschwindigkeit einer Linie in m/sec, s_0 nach dem Anlaufen, dem Bremsen vorangehend, f den Fahrwiderstand in ‰, Q das Bruttozuggewicht in Tonnen, a die Beschleunigung in m/sec² und b die Bremsverzögerung.

III. Um F Fahrgäste mit Wagen mit einem Fassungsvermögen von Z Fahrgastplätzen bei einer 90 prozentigen Ausnutzung zu befördern, muß die Zahl der Abfahrten pro Stunde $F/0{,}9\,Z$ betragen; der *erforderliche Fahrzeugbestand* ist jedoch von der Umlaufzeit abhängig, damit ergibt sich auf der Linie 1 mit längerer Reisezeit in Sekunden eingesetzt

$$W_1 = \frac{F}{0{,}9Z}\,\frac{2t_1}{3600}\,1{,}16 = 0{,}0007\,\frac{F}{Z}\,t_1 \;(16\% \text{ in Reparatur}).$$

Werden Amortisation und Produktionsfondsabgabe je Wagen und Stunde durch k_w bezeichnet, ergibt sich in einer Stunde eine Amortisationsdifferenz zu Lasten der Linie 1 von

$$K_{III} = \frac{F}{Z}\,\frac{t_{1-2}}{14000}\,k_w,$$

wo t_{2-1} die Differenz der Fahrzeiten bedeutet.

IV. Wie es aus dem Obigen zu erkennen ist, ist der *Zeitaufwand* auf Strecke 1 größer und unter Vernachlässigung der Differenz $\frac{1}{2s_1} - \frac{1}{2s_2}$ und aus den fahrdynamischen Überlegungen unter Punkt II, ergibt sich die zusätzliche Zeit t_{1-2} zu:

$$t_{1-2} = \frac{l_1}{s_1} - \frac{l_2}{s_2} + \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)\left(\frac{s_1}{2} - \frac{s_2}{2}\right) + A\left(\frac{s_1}{a} + \frac{s_1}{b} + t_w\right).$$

Dieser Wert kann in die Formel der Fahrzeugamortisation eingesetzt werden, und ergibt mit dem Stundengleichwert k_t des Reisezeitaufwandes – und mit der pro Stunde beförderten Fahrgastzahl multipliziert – die Kostenkomponente K_{IV} [2].

Auf volkswirtschaftlicher Ebene läßt sich das Problem der ökonomischen Wirksamkeitsentscheidung wie folgt formulieren: Welche Strecklängendifferenz $l_2 - l_1$ ist die Grenze, wo es trotz der kürzeren Reisezeit unwirtschaftlich ist, den Verkehr über die längere Strecke l_2 zu leiten? Die Lastposten der längeren Strecke l_2 als positiv betrachtet, ist es zweckmäßig, l_2 zu wählen, wenn $K_{II} + K_{III} - K_I - K_{IV}$ Null unterschreitet: das ist Linie B. An Stelle der Kosten K_{III} kann auch eine negative Zahl stehen, ein Umstand, der für l_2 günstig ist. Damit erhält man *die optimale Lenkung der Fahrgastströme*.

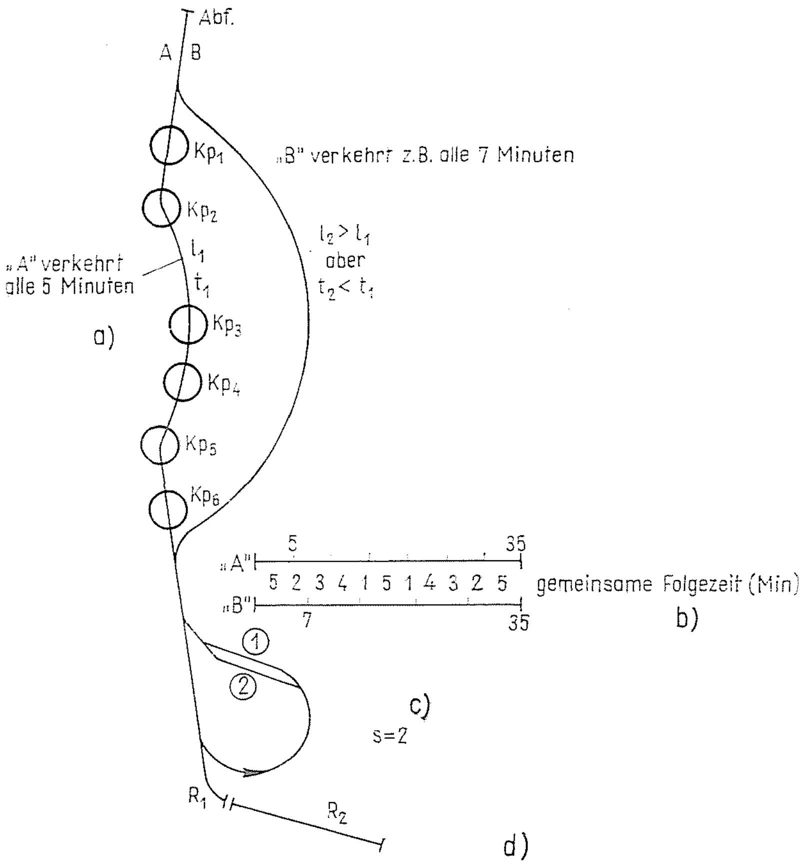

Abb. 1. Beispiele der Linienführung

2. Ermittlung der optimalen Linienlänge aus der Notwendigkeit des Umsteigens

Nachdem die Linie gewählt ist, soll entschieden werden, ob die Fahrgäste umsteigen müssen oder mit einer *direkten Linie* wirtschaftlicher – auf der gewählten Strecke – befördert werden können. Dabei muß der Umstand berücksichtigt werden, daß einerseits das Umsteigen mit Zeitaufwand und Mühe verbunden ist, anderseits durch den Bau der Endhaltestellen und deren Platzbedarf für den Investitionsträger Amortisationskosten anfallen. Durch das Vermeiden des Umsteigens werden hingegen die Betriebskosten erhöht, vor allem wegen der Ungleichmäßigkeit auf derselben Strecke verkehrender mehrerer Linien. Das Liniensystem, *das als »optimal« bezeichnet werden darf,* gestaltet sich wie folgt: die Zahl der pro Stunde verkehrenden Züge und die in Fahrgastplätzen ausgedrückte Zuggröße Z sind für die möglichen Linien so zu bestimmen, daß die *Gesamtlast* G sämtlicher Fahrgäste je Stunde minimal sei. Diese Lasten sind die Betriebskosten P mit der Amortisation sowie der Wert der mit dem Umsteigen verbundenen Verluste, wobei im Vergleich die Reisezeit selbst, ferner die Mühe beim ersten Einsteigen und beim Aussteigen am Ziel unberücksichtigt bleiben, weil diese auf jeden Fall vorhanden sind.

Bei der Beurteilung der Begründung des Umsteigens geht man im Laufe der Ableitung von der einfachsten Elementarlinie sukzessiv auf ein Netz mit Abzweigungsstellen über und gelangt zum Ergebnis, daß *große Züge* lediglich bei starkem Fahrgastverkehr und einer hinreichenden Reiselänge rentabel eingesetzt werden können. Auf Strecken, deren »Fahrgastverkehrslängsprofil« eine stufenartige Änderung aufweist, kann ferner der Verkehr mit einer einzigen durchlaufenden Linie (Fall I) oder mit zwei sich aneinander anschließenden Teillinien (III) mit entsprechender Wirtschaftlichkeit abgewickelt werden und es ergibt sich, daß es — trachtet man die optimale Lösung zu wählen — unerlaubt ist, auf derselben Strecke zwei Linien verkehren zu lassen (II). Auch im Falle von Abzweigungen gelangt man zum selben Ergebnis der sich aneinander *anschließenden*, und nicht der sich verflechtenden Linien.

Würde trotz der Abstufung im Fahrgastverkehr eine einzige durchgehende Linie eingesetzt, so würden auf dem Abschnitt mit dem geringeren Verkehr *unausgenutzte* Fahrgastplätze bewegt (Fall I). Wenn jedoch, um dies zu vermeiden, eine dem Streckenabschnitt mit geringerem Verkehr entsprechende, durchgehende Linie eingesetzt, und zur Beförderung der zusätzlichen Fahrgastzahl auf dem stärker beanspruchten Abschnitt eine Einsatzlinie eingeführt wird — oder für die direkte Bedienung der Abzweigungen auf der gemeinsamen Strecke mehrere Linien (A und B) verkehren —, kommt selbst bei fahrplanmäßigem Verkehr die *Noniuswirkung* (Abb. 1b) zur Geltung und die Ausnutzung wird auf jeden Fall ungenügend sein (Fall II). Wegen des mit großen Linienlängen verbundenen ungleichmäßigen Verkehrs muß in beiden Fällen ein *Reservewagen* eingesetzt werden, demzufolge die der Zeit proportionalen Kosten, die Amortisation k_{wi} und die Lohnkosten k_{lt}, mit der *Störungswahrscheinlichkeit* p zunehmen.

Wird *um die unbefriedigende Ausnutzung zu vermeiden, das Umsteigen* eingeführt, zieht dieser Umstand nicht nur die mit dem Umsteigen verbundene Unbequemlichkeit nach sich, sondern er bedingt auch die Amortisation k_e der Baukosten und des Platzbedarfs für die neue Endhaltestelle sowie die zusätzlichen Lohnkosten k_{le} für das Personal der in der neuen Endhaltestelle wartenden Wagen. Die Unbequemlichkeit beim Umsteigen besteht nicht nur im Zeitbedarf und in der Mühe für den zu Fuß zurückzulegenden Weg, sondern auch in der Abneigung, da der Fahrgast gezwungen ist, den eingenommenen

Sitzplatz zu verlassen, und befürchtet, nach dem Umsteigen u. U. keinen Sitzplatz zu finden.

Die ausführliche mathematische Ableitung wird hier beiseitegelassen, die im weiteren zusammengefaßten Formeln geben vielmehr nur die Ausgangs-Kostengleichungen und die Verkehrsergebnisse in vereinfachter Form — lediglich den Parametern gemäß —, in ihrer Konstruktion, für die modellartige Hervorhebung des Gedankenganges an [3].

Beispielshalber sollen zwei sich aneinander anschließende Abschnitte mit unterschiedlichem Fahrgastverkehr (mit F_1 und dem geringeren F_2 je Stunde) innerhalb einer Wegstrecke (Abb. 1d) betrachtet werden: die Differenz $F_1 - F_2$ stellt die die ganze Linie durchfahrenden Personen dar. In diesem Falle ergeben sich abschnittsweise summiert die folgenden Betriebskosten pro Stunde:

$$P_{\mathrm{I}} = (K_1 + K_2)\frac{F_1}{0{,}9Z}$$

$$P_{\mathrm{II}} = (K_1 + K_2)\frac{F_2}{0{,}9Z} + K_1\frac{F_1 - F_2}{0{,}9Z} = P'_{\mathrm{II}} + P''_{\mathrm{II}};$$

beim Umsteigen hingegen: ist

$$P_{\mathrm{III}} = K_1\frac{F_1}{0{,}9Z} + K_2\frac{F_2}{0{,}9Z}$$

am kleinsten; der Geldgleichwert des Fußweges (l_u) und der Wartezeit beim Umsteigen $U = (F_1 - F_2)\left(\frac{F_2}{2\cdot 0{,}9Z} + 1_u\right) k_t$, wenn die durchschnittliche Wartezeit gleich der Hälfte der Dichte $F_2/0{,}9\,Z$ im Falle von Abschnitt 2 ist.

Es sei der Gleichwert der durch das Umsteigen verursachten Mühe $M = (F_1 - F_2)\,\beta$, ein Wert, der von Sándor Patz mit dem Zeitgleichwert von 2 Minuten bewertet wurde. In diesen Formeln bedeuten: K_i die im vorigen Abschnitt abgeleiteten Betriebskosten ($L_i k_m$) auf dem betreffenden Streckenabschnitt; Z die 100-prozentige Fahrgastplatzzahl je Zug, von der nach den vorstehenden Ausführungen höchtens 90% berücksichtigt werden dürfen; k_t den Geldgleichwert der Wartezeit in Ft/h, der im Fachschrifttum der DDR in 1 bis 5 DM angegeben wird (je nachdem, wie vom Fahrgast die freigewordene Zeit voraussichtlich verwendet wird); β den Geldgleichwert der mit dem Umsteigen verbundenen Unbequemlichkeit; l_1 und l_2 Abschnittslängen; N_i Zug/h.

In Kenntnis dieser Bezeichnungen betragen die fallweise angesetzten Gesamtkosten

$$G_{\mathrm{I}} = P_{\mathrm{I}} + k_{wi} + k_{li};\ G_{\mathrm{II}} = P'_{\mathrm{II}} + k_{wi} + k_{li} + P''_{\mathrm{II}} + k_e + k_{we} + k_{le}$$

und

$$G_{\mathrm{III}} = P_{\mathrm{III}} + (U + M) + (k_e + k_{we} + k_{le})$$

Von diesen sind die geringsten Kosten zu wählen. Es wird also richtig sein, die durchgehende Linie zu teilen — aus Wirtschaftlichkeitsrücksichten bei der Fahrgastzahlstufe das Umsteigen einzuführen —, wenn

$$K_2 \frac{F_1 - F_2}{0{,}9Z} + (k_{wi} + k_{li}) > (k_e + k_{we} + k_{le}) + (U + M).$$

Es ist noch zu erwähnen, daß sich die optimalen Zugzahlen pro Stunde (N_i) und die optimale Zuggröße Z_i bei gewissen vereinfachenden Ansätzen und nach Durchführung der partiellen Differenzierung $\Delta G/\Delta N_i = 0$ ergeben. Von POTTHOFF wurden die optimalen Linienverbindungen mit Hilfe der linearen Programmierung aus dem Streben nach Minimalisierung der Leistung: auf homogene Produkte abgeleitet, für die es gleichgültig ist, welche Anfangs- und Zielpunkte verbunden werden; MÜLLER (Freiberg) versucht in der Zielfunktion die Anzahl der Umsteigefälle mit womöglich wenigen Linien zu minimalisieren, gibt jedoch keinen geschlossenen Algorithmus.

3. Operationsforschungsmodelle für Fahrzeuge und Allokationsfragen

Die im Vorstehenden geplanten Linien müssen mit Fahrzeugen, Personal und Endhaltestellen ausgerüstet werden und für die optimalen Entscheidungen lassen sich die *bekannten Modelltypen der Operationsforschung* verwenden.

Was vor allem die Fahrzeuge anbelangt, wird in Kenntnis der Wegstrecken und der Fahrgastzahlen der Linien die *wirtschaftlichste Fahrzeugart* [4] mit Hilfe des Modells der wirtschaftsstrategischen *Spiele* ermittelt (Abb. 2), wobei in der Entscheidungsmatrix die Zeilen die Fahrzeugarten, die Spalten die die Entscheidung beeinflussenden Parameter — wie Kosten, Verkehrsintensität, Tarifhöhe usw. — enthalten, während die Elemente »a« der Matrix immer den Reinertrag angeben [5]. Bei der Untersuchung der Versorgung einer zu erbauenden Wohnsiedlung ergab sich der *Sattelpunkt der optimalen reinen Strategie* bei a_{31}; das bedeutet, daß der *Omnibus* in der dritten Zeile der Matrix zu wählen ist; wurde auch noch die Wahrscheinlichkeit der Fälle angesetzt, ergab sich bei $p_1 = 25\%$, $p_2 = 50\%$, $p_3 = 5\%$ und $p_4 = 20\%$ wieder der Omnibus mit Sattelpunkt. Auf dieselbe Weise wird gerechnet, wenn die Entscheidung aufgrund des Maximum-Minimum-Prinzips ganz pessimistisch angesprochen wird und die Parameterwerte nach dem Bayes-Laplace-Prinzip mit der Vorkommenswahrscheinlichkeit α multipliziert werden.

Der *optimale Zeitpunkt für die Fahrzeugausmusterung* muß deshalb bekannt sein, weil zu dieser Zeit der berechnete Fahrzeugbedarf für die Linien durch den Ersatz der ausgemusterten Fahrzeuge zu ergänzen ist. Mit Hilfe des *Ersatzmodells* der Operationsforschung wird ermittelt, wann, in welchem

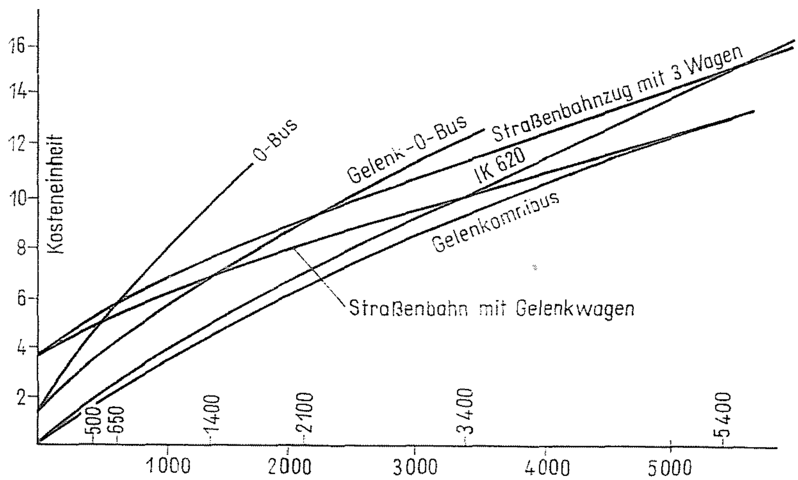

Abb. 2. Wirtschaftlichkeitsgrenzen des Einsatzes von Fahrzeugarten

Jahre, das erfolgen soll. Der optimale Zeitpunkt des Ersatzes ist der, wo die Einrichtung verkauft werden muß, damit die Gesamtkosten (Investitions- und Betriebskosten) je Zeiteinheit minimal seien. Diese setzen sich zusammen aus den Anschaffungskosten, den Inbetriebsetzungskosten, den Reparatur- und Erhaltungskosten sowie aus dem Ausmusterungswert, der in Abzug gebracht wird. Es gilt die Regel, daß eine Anlage bzw. ein Fahrzeug in dem Jahre durch ein neues zu ersetzen ist, in dem die Kosten für die nächste Periode — bei *Diskontierung* der in den späteren Jahren anfallenden Kosten — das gewogene Mittel der bisherigen Jahreskosten übersteigen würden. Beträgt z. B. der Anschaffungspreis eines Omnibusses 1 Million Ft, erhält man bei Diskontierung eines Jahreszinses von 6% — unter tabellarer Angabe der Erhaltungskosten pro Jahr — für die Ausmusterung gerade das zehnte Jahr [6].

Eine Standortwahl für die Endhaltestellen, wobei der erforderliche Fußweg minimal ist, stellt eine *Allokationsfrage* dar, die sich nach dem *VIAL-Modell* lösen läßt, während die Zuordnung des Personals zu den Endhaltestellen und die Kommandierung der Wagen bei minimaler Lehrlaufkilometerzahl durch *lineare Programmierung* ermittelt werden können [5]. Die Zuordnung des Personals stellt jedoch eine Programmierung in zwei Stufen dar, da zuerst ermittelt werden muß, welchem Wagenschuppen (welcher Garage), die Mitarbeiter — den Schwerpunkten ihrer Wohnungen gemäß — zuzuordnen sind, worauf die Verteilung unter den Endhaltestellen folgt. Bei der Lösung durch lineare Programmierung stellen die Km-Entfernungen die Matrizenelemente dar, während die Minimalsumme der improduktiven Dienstfahrten die Zielfunktion ist.

4. Bedienungsmodell für die Bestimmung der optimalen Kapazität

Eine ungenügende und *beschränkte Kapazität* verursacht Verkehrsstauungen und erhöht die Reisezeit, ein Umstand, der bei den Fahrgästen Mißstimmung auslöst, wenn er nicht sogar die Abwicklung des gewünschten Verkehrsvolumens ganz verhindert. In einem solchen Falle stellt sich die Frage der *zweiten Fahrspur* (neben der Straßenbahn auch Omnibus), d. h. es scheint eine *horizontale* Kooperation begründet zu sein. Ein ähnliches Problem ist jedoch auch die Bestimmung *der für die Endhaltestelle erforderlichen Gleiszahl* (Abb. 1c), und die Frage nach der ökonomischen Wirksamkeit — die auch die Entscheidung über die Investitionen enthält — lautet auch in diesem Falle: durch welche Verkehrsstauung oder welche *Zeitverluste* der Fahrgäste und der Fahrzeuge ist die *Amortisation* der Kosten für die Erstellung einer zweiten Fahrspur — neben Straßenbahn auch Omnibus — oder eines zweiten Gleises gerechtfertigt? Dieses Problem läßt sich mit den Mehrkanalformeln ($S = 2$) des Bedienungsmodells (Modell der Warteschlangen) der Operationsforschung lösen [7].

Es kommt vor, daß Länge oder Zeitaufwand einer — bei einem Engpaß wartenden — Wagenreihe oder die Wahrscheinlichkeit ihrer Entstehung für unerträglich gehalten und eine zweite Fahrspur gefordert wird: aus der Sicht des wirtschaftlichen Optimums ist es jedoch unzulässig, eine derartige Wahrscheinlichkeitsgrenze *willkürlich* zu bestimmen. Zuerst wird die Frage in folgender Weise formuliert: bei welcher Fahrspur- (Gleis-) -zahl sind die Zahl n der Fahrzeugeinheiten im System und die Gesamtzahl der Wartenden m am kleinsten? Dazu werden die Kosten c_1 für die Fahrzeugwartezeit und die Kosten c_2 für die Wartezeit der Bedienungsstelle je Zeiteinheit angegeben, und als zu minimalisierende Zielfunktion betrachtet man den Umstand — da es sich im Massenverkehr um mehr als zwei Fahrspuren nicht handeln kann —, ob für den Zeitraum T

$$\Gamma_2 = T[c_1 \sum_{3}^{m} (n - 2)\, p_n + c_2 \sum_{0}^{2} (2 - n)\, p_n]$$

kleiner ist als im Falle einer einzigen Fahrspur? Dabei bedeuten p_n im Summenzeichen die Wahrscheinlichkeit der Entstehung der verschiedenen Wagenreihen, c_1 und c_2 die Folgen der Investition je Zeiteinheit, also die Abschreibungs- und Produktionsfondsabgabelasten. Die *optimale Kapazität* ergibt sich durch ein umgekehrtes Vorgehen als Minimum bei einer Zahl m der bei Kanal S wartenden Wagen. Die Kostenfaktoren c_1 und c_2 verhalten sich hier gegensätzlich und ergeben bei einer Kanalzahl ein Minimum.

5. Optimale Reservebildung und komplexe Entscheidung

Durch die Elemente des Massenverkehrsprozesses in Städten wird das Kriterium der *zufallsbedingten Massenhaftigkeit* befriedigt, damit lassen sich die Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der mathematischen Statistik mit vorgegebener Genauigkeit anwenden. Es konnte festgestellt werden, daß die Komponenten der Reisezeit der normalen und der lognormalen Verteilung folgen, daher weist auch die Reisezeit eine *Normalverteilung* auf, mit der Ausnahme der Linien mit wenig dichtem Verkehr. Darum ist es nicht gerechtfertigt, in Anbetracht der Störungen zufolge von technischen, persönlichen und anderen Ursachen die — mit den herkömmlichen (»exakten«) Formeln ermittelten — Umlaufzeiten mit einem »Störungsprozent« einfach zu erhöhen; die Umlaufzeit ist vielmehr nach der sog. *»direkten Methode«* unter der Voraussetzung des Modells der Normalverteilung zu berechnen und selbstverständlich durch eine Anpassungsuntersuchung zu kontrollieren. Dabei wird der Gedankengang verfolgt, daß innerhalb der gewünschten Fehlergrenzen aus den Tabellen der Normalverteilung — aufgrund der Konfidenzgrenzen — die Umlaufzeit bestimmt wird, bei der die Verspätungen mit *vorgegebener Häufigkeit die vorgegebenen Grenzwerte unterschreiten*. Damit stellt sich *die Frage der* wirtschaftlichen *Wirksamkeit:* Ist es *gerechtfertigt*, mit dieser Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) eine derartige Genauigkeit zu fordern und dazu u. U. eine verhältnismäßig hohe Umlaufzeit festzulegen?

Größere Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Umlaufzeiten erfordern den Einsatz von zusätzlichen Wagen, daher soll im weiteren die Frage der *optimalen Reserve* untersucht werden. Es muß gleich unterstrichen werden, daß der Einsatz eines Reservewagens Reservepersonal und den Bau eines Abstellgleises erfordert (damit der Verkehr nicht gestört wird); dadurch werden die Lohnkosten bzw. Amortisation und Produktionsfondsabgabe erhöht, im allgemeinen auf die Zeiteinheit bezogen. Der Einsatz von Reservewagen ist nicht nur deshalb erforderlich, damit die Fahrgäste nicht lang warten müssen, sondern auch um der Fortpflanzung der Verspätung und ihrer Steigerung vorzubeugen, die — eine ständige Zuströmung der Fahrgäste zu den Haltestellen vorausgesetzt und in Anbetracht des Umstands, daß das Fassungsvermögen bereits gemäß der Kapazität bestimmt wurde — erfahrungsmäßig vor Ende der Spitzenzeit nicht behoben werden kann.

Für die Begründung des Einsatzes eines Reservewagens nehmen wir als Beispiel die Omnibuslinie 39 mit der vorgeschriebenen halben Umlaufzeit von 48 Minuten, wobei sich die mittlere Einlaufzeit zu 46 Minuten ergab, be einer Streuung von $\sigma = 5{,}12$ Minuten [5]. Damit lautet die Dichtefunktion der Normalverteilung

$$y = \frac{1}{5{,}12\sqrt{2\pi}}\, e^{\frac{-(x-46)^2}{2.5{,}12^2}} = \frac{1}{12{,}8}\, e^{\frac{-(x-46)^2}{52{,}6}} \text{ (Abb. 3)}$$

Bei der Verkehrsdichte von 3 Minuten fällt eine volle Fahrt dann aus, wenn

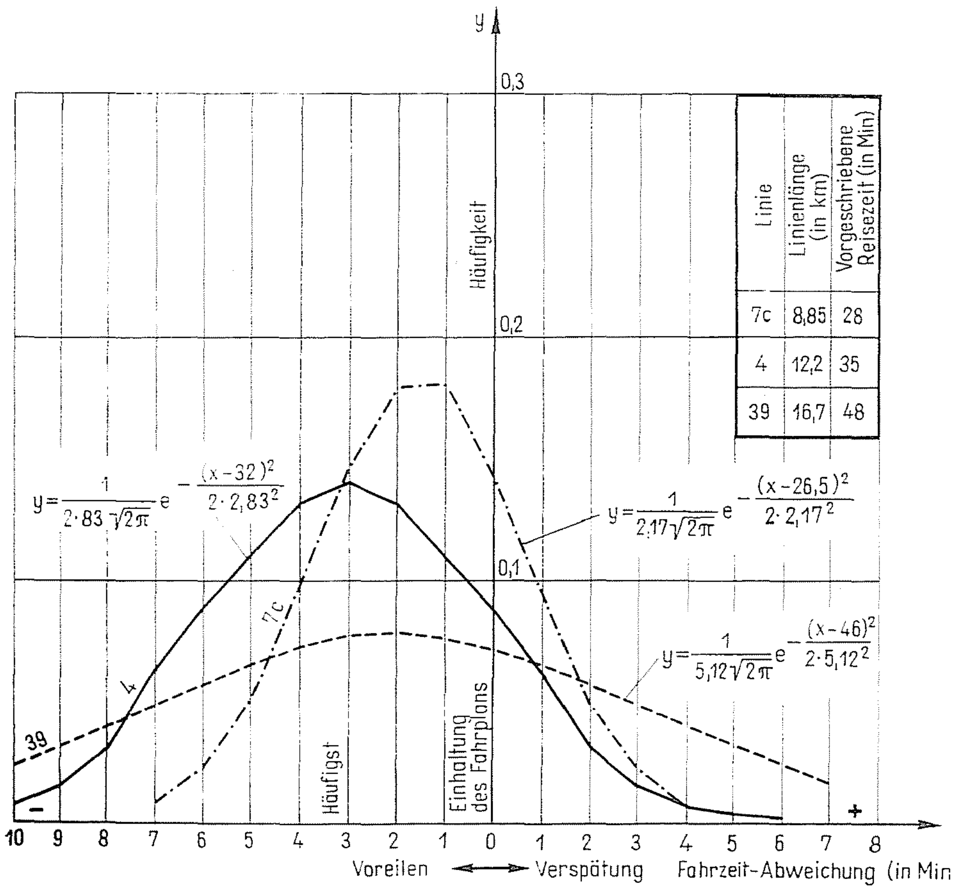

Abb. 3. Reisezeitverteilung der Omnibuslinien in den Spitzenzeiten (Normalverteilung)

die Verspätung 5 Minuten beträgt, da in diesem Falle der Wagen gerade in der nächsten Abfahrtszeit wieder abgehen kann: die Wahrscheinlichkeit dafür, daß dies zutrifft, beträgt 16,5%, da $\Delta = 5$, $u = \frac{\Delta}{\sigma} = 0{,}975$, also ist die doppelseitige Wahrscheinlichkeit gleich 67%. In Kenntnis der Normalverteilung tauchen hier wieder Fragen der wirtschaftlichen Wirksamkeit von großem Interesse auf: *Bei welcher Verspätungswahrscheinlichkeit ist es gerechtfertigt,* *einen Reservewagen einzusetzen?* Wir beschäftigten uns vorhin mit dieser Frage in der Bestrebung, die Genauigkeit der Umlaufzeiten zu erhöhen, doch ist sie auch die Fortsetzung des Problems im Abschnitt II, da *wenn versucht wird, ohne Umsteigen auszukommen, die Linie leicht so lang ausfallen kann,* daß der Einsatz eines Reservewagens erforderlich wird.

Werden nun *die Lasten eines Reservewagens nur den Verspätungen* Δt gegenübergestellt, steht der Amortisation und den damit verbundenen Kosten die Wartezeit — wegen dem vollen Ausfall einer Fahrt — gegenüber, vom betreffenden Zeitpunkt an bis zum Ende der Spitzenzeit. Erfahrungsgemäß kann die Verspätung innerhalb der Spitzenzeit nicht vermindert werden, sondern vielmehr zunimmt. Die Spitzenperioden betragen im Mittel 4 Stunden; zwar ist dieser Wert je nach Art der Gegend unterschiedlich und es kommen in der ersten Zeit dieser Periode auch noch keine Verspätungen vor, die den Ausfall einer Fahrt herbeiführen könnten. Das ist jedoch bereits der Fall *nach* einer durchschnittlichen Umlaufzeit von 60 Min (in 3/4 der Zeit), und werden dann keine entsprechenden Maßnahmen getroffen, so vervielfältigen sich die Verspätungen. Ist nämlich die Verspätung je Haltestellenabstand Δt, so nimmt die Aufenthaltszeit H in der ersten Haltestelle in demselben Verhältnis zu und in der nächsten Haltestelle ergibt sich bereits

$$\Delta t + \frac{\Delta t}{t} \quad H = \Delta t\,(1 + \gamma)\,,$$

in der n-sten Haltestelle

$$t\,(1 + \gamma)^{n}.$$

Jedoch nimmt auch die Zahl E der in der Haltestelle wartenden Fahrgäste in demselben Verhältnis zu

$$E\,\frac{\Delta t(1 + \gamma)^n}{t}$$

und der bereits genannte Zeitgleichwert (k_t) ihrer Wartezeit ist wegen der Überfüllung und der damit verbundenen Unbequemlichkeit wenigstens mit 1,5 multipliziert — nicht den Investitionslasten und den Lohnkosten für 3 Stunden ($k_w + k_t$ pro Stunde), sondern — der prozentuellen Wahrscheinlichkeit (Häufigkeit p) einer derartigen Verspätung gegenüberzustellen [8]. Ist

$$E\,\frac{\Delta t(1 + \gamma)^n}{t}\,3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1{,}5 \cdot k_t > 3\,(k_w + k_1)p$$

(wo γ das Verhältnis der Verspätung zur Fahrzeit zwischen zwei Haltestellen bedeutet), so lohnt es sich, eine Reserve einzuführen bzw. einzusetzen.

Diese Ungleichheit kann aus ökonomischem Aspekt auch so aufgestellt werden, daß statt der Amortisation k_{w} mit den Investitionskosten B' gerechnet und

$$\frac{B'p}{E\,\frac{\Delta t(1+\gamma)^{n}}{t}\cdot 1{,}5\cdot k_{i}\cdot 730} < 5 \text{ Jahre}$$

vorgesehen wird, wenn als Zeiteinheiten Jahre angenommen werden und vorausgesetzt wird, daß sich diese Schwierigkeiten lediglich in den täglichen zwei Spitzenperioden einstellen.

Das ist *die Grenzbedingung der Einführung der optimalen Reserve.*

In Kenntnis der abgeleiteten Teiloptima stellt anhand der Ermittlung des vereinigten, gemeinsamen Optimums des *Gesamt*prozesses, die komplexe optimale Entscheidung eine weitere, noch offene Frage dar. Die Schritte der Prozeßplanung wurden durch die Aufstellung von Teiloptima verfolgt und man muß sich tatsächlich zuerst darüber im Klaren sein, von welchen Parametern und auf welche Weise die einzelnen Schritte abhängig sind? Die Optimierung darf jedoch nicht einzelweise durchgeführt werden, sondern es ist anzustreben, daß die Gesamtaufwendung sämtlicher Komponenten, den Ergebnissen gegenübergestellt, optimal sei. Mit anderen Worten soll die *auf volkswirtschaftlicher Ebene* summierte »Aufwendung« (in übertragenem Sinne) für die *Leistung* minimal sein.

Dazu muß bei der Untersuchung der — bei den Teiloptima vorkommenden — vielerlei Parameter x_{k} geprüft werden, welche miteinander in Zusammenhang sind. Diesen Abhängigkeitsbeziehungen zufolge muß die bisherige Behandlung der Abschnitte in der Reihenfolge der Planungslogik geändert werden. Leider gibt es jedoch unter diesen Beziehungen auch solche mit Rückkopplungswirkung, die zu einer Iteration führen. Liegt nämlich die optimale Wegstrecke in der *inneren Stadt*, wo häufig angehalten werden muß, werden die Fahrzeug-Amortisationskosten k_{w} durch die stärkere Abnutzung erhöht; oder es ergibt sich bei der Ermittlung der optimalen Linienlänge die Notwendigkeit, in der inneren Stadt eine Endhaltestelle anzulegen, womit höhere Expropriationskosten anfallen. Dadurch kann die Entscheidung wieder auf die äußere Strecke l_{2} gelenkt werden. Diese Wirkungen sind jedoch relativ klein. Die optimale Gleis- (Wagenstehplatz-) -zahl in den Endhaltestellen steht in keinem Zusammenhang mit den übrigen Parametern.

Viel bedenklicher ist es jedoch, wenn der Verkehr auf alternative Linien gelenkt und nach den Vorführungen in Abschnitt 4 die Beanspruchung mehrerer Fahrspuren verursacht würde, oder wenn die — nach der Zahl der Umsteigen beurteilte — Linienlänge (Abschnitt 2) zu einem unerträglich unregelmäßigen Verkehr führen würde; es kann in diesem Falle leicht vorkommen, daß der gesamte Gedankengang wiederholt werden muß.

Es handelt sich hier offensichtlich um Entscheidungen in mehreren Stufen und die Schritte U_i der *dynamischen* Programmierung [9] werden der Reihe nach folgende sein:

U_1: Wahl der Fahrzeugart anhand der Fahrgastzahlen und Ermittlung daraus des optimalen Zeitpunktes für die Ausmusterung, also der Amortisation k_w;

U_2: optimale Wegstrecke;

U_3: Bedienung auf mehreren Fahrspuren (horizontale Kooperation)

U_4: Abschätzung der optimalen Linienlänge auf der ermittelten Wegstrecke, aus der Sicht der Umsteigen:

U_5: Berechnung der Umlaufzeiten und des optimalen Bedarfs an Reservewagen für die ermittelten Linien.

Im Sinne des Modells der dynamischen Programmierung würde es sich hier um $m = 5$ Schritte der Operation handeln; hängt jedoch die Orientierung einzelner Schritte — wenn der Verkehr auf eine überlastete Strecke gelenkt wurde — nicht nur von dem vorangehenden Zustand ab, so muß die Anzahl k der Parameter des Systems erhöht werden. Im Sinne der dynamischen Programmierung wird die Optimierung vom 5. Schritt an nach rückwärts weitergeführt, wobei das Modell folgende Form hat:

$$W_{\text{opt}} = W\,[U_1 U_2 U_3 U_4 U_5\,(x_1 \ldots x_{k+2})] = \min.$$

Zusammenfassung

Aus der Sicht der verursachten Folgen muß die Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse gemeinsam erwogen werden, da die anfallenden Kosten auf die Beanspruchter der Dienstleistung, ja sogar auf die Gesamtbevölkerung zurückfallen. Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung muß mit Rücksicht auf die gesamte Volkswirtschaft erfolgen, u. zw. auf die Rentabilität abgerichtet. Den einzelnen Schritten der Verkehrsplanung folgend wird zuerst das Optimumkriterium der Streckenwahl abgeleitet, sodann werden die optimalen Längen der auf dieser Strecke zu führenden Linien ermittelt. Die vorgesehenen Linien sind dann unter Anwendung der Modelle der Operationsforschung mit Personal und Endhaltestellen auszurüsten. Bei der Benutzung des Modells der Massenbedienung — des Modells der Warteschlangen — wird die Kanalzahl nicht willkürlich, sondern durch das Kostenminimum bestimmt; umgekehrt ist bei gegebener Kanalzahl die Optimalkapazität zu errechnen. Der Festlegung der Umlaufzeit in Kenntnis der Normalverteilung wird die Berechnung der optimalen Reserven angeschlossen, schließlich führt die Verbindung dieser Teiloptima zum gemeinsamen Optimum der gesamten Planung und des Prozesses, zum mehrstufigen Entscheidungsmodell.

Schrifttum

1. Gyulai, G.: Einige Anwendungen der Netzwerktechnik im Stadtverkehr. Periodica Polytechnica ME **14**, 251 (1970).
2. Gyulai, G.: Optimumprobleme in der Planung des städtischen Massenverkehrs.* Városi közlekedés **9**, 72 (1969).
3. Patz, S.: Linienführung. Bulletin de l'UITP, Zürich (1939).

4. ACSAY, I.: Anwendungsbereiche der Massenverkehrsmittel im Straßenverkehr.* FÖMTI, Budapest 1963.
5. GYULAI, G.: Zufallsbestimmte Massenerscheinungen im Stadtverkehr. Periodica Polytechnica ME **12**, 395 (1969).
6. GYULAI, G.: Die Rolle der Operationsforschung in der Planung des städtischen Massenverkehrs.* Közlekedéstud. Szemle **19**, 533 (1969).
7. KAUFMANN, A.: Die optimale Programmierung,* Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1964.
8. LEHMANN, H.: Verkehrliche Auswirkung der Verspätungen. Verkehr und Technik, **21**, 53 (1968).
9. VENTCEL, E.: Die Elemente der dynamischen Programmierung.* Közgazdasági Kiadó, Budapest, 1969.

Dozent Dr. Géza GYULAI, Budapest IX., Kinizsi u. 1—7, Ungarn

* In ungarischer Sprache.