ZUFALLSBESTIMMTE MASSENERSCHEINUNGEN IM STADTVERKEHR

Von

G. GYULAI

Lehrstuhl für Verkehrsbetriebslehre, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 25. April 1968)

Vorgelegt von Prof. Dr. I. TURÁNYI

1. Kennzeichnung der Verkehrsvielheit lediglich durch den Durchschnitt

Der allgemeine und intensive Urbanisationsvorgang macht seine Wirkung auch in Budapest geltend. Die für das heutige Stadtgebiet berechnete Einwohnerzahl ist seit dem Jahre 1930 um 34% gestiegen, wobei die Verhältnisse noch dadurch erschwert werden, daß der spezifische Verkehrsbedarf in der Zwischenzeit um das Dreifache zunahm. Die Abwicklung des gestiegenen Verkehrs wird auch durch die Zunahme des sich um den Massenverkehr abrollenden individuellen Straßenverkehrs erschwert; die eine bessere Flächennutzung gewährleistenden Massenverkehrsmittel würden hingegen nur dann benutzt, wenn es gelingen würde, diese attraktiver zu machen. Dieser Umstand erfordert immer dringender bei einer womöglich großen Zahl der Stadtverkehrskomponenten und -elemente den Einsatz moderner mathematischer Methoden, und das umso mehr, weil sich nach den perspektivischen Entwicklungplänen bis 1980 die Fahrgastzahl um das 1,22fache und der Kraftfahrzeugbestand um das Dreifache vergrößern wird.

Zahlreiche Komponenten der Erscheinungen und Vorgänge im städtischen Verkehr lassen sich jedoch mit Hilfe von genauen mathematischen Formeln nicht oder wenigstens nicht mit bekannter Konfidenz erfassen, oder würde sich ein solches Verfahren wegen seiner Umständlichkeit *nicht lohnen*. Durch die einzelnen Teilnehmer am gesättigten Straßenverkehr wird das Kriterium der Massenhaftigkeit, durch ihre Einflußfaktoren jenes der Zufallsbestimmtheit erfüllt, obwohl die Ereignisse des verwickelten Verkehrsvorgangs zahllose Einzelveranlassungen haben.

Die massenhaft vorkommenden, zufallsbestimmt veränderlichen Erscheinungen schwanken zufolge ihrer Eigenartigkeiten gesetzmäßig um den wahrscheinlichsten Wert von größter Häufigkeit, solange sich die die Natur des *Wesens* berührenden Umstände nicht ändern. Daher soll im weiteren der Stadtverkehrsvorgang darauf untersucht werden, wo und welche Methoden der mathematischen Statistik — die aus den *stochastischen* Wahrscheinlichkeitsbeziehungen Schlüsse ziehen —, ferner gewisse Modelle der Operationsforschung angewandt werden können.

Es steht fest, daß der *Durchschnittswert* aus den im Verkehr massenhaft durchgeführten Messungen für den Beobachter wenig Aussagekraft besitzt, selbst der zahlenmäßige Wert eines der Streuungsmaße genügt dazu nicht.

Die Ausmusterung und Generalüberholung der Kraftfahrzeuge können offenbar nicht in ihrem Gesamtumfang für das Jahr geplant werden, wo durch den *Leistungsdurchschnitt* des Fahrzeugparks die diesbezügliche Norm erreicht wird, sondern sie werden in irgendwelcher Verteilung auch auf die vorangehenden und folgenden Jahre ausgedehnt; es genügt ferner nicht, den Durchschnitt der tatsächlichen Umlaufzeit zu kennen, sondern es muß z. B. für die Ermittlung der Reserven auch errechnet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Verspätungen einen gewissen vertretbaren Grenzwert übersteigen.

2. Streuungsmaße, relative Streuung

Es ist allgemein bekannt, daß der Gleichmäßigkeit des städtischen Massenverkehrs große Bedeutung beizumessen ist, da ein *ungleichmäßiger* Verkehr unbedingt Überfüllung, somit Unfallsgefahr, eine Verlängerung der Fahrzeiten, massenhafte Beschwerden und schließlich auch einen unwirtschaftlichen Betrieb zur Folge hat. Die Verspätungen je Umlauf in Minuten können im Laufe des Tages summiert werden oder deren Durschschnittswerte, u. U. deren Randwerte können zu den vorgeschriebenen Fahrplanangaben in ein Verhältnis gestellt werden, doch werden *sämtliche* Abweichungen im Laufe des Tages in der am besten geeigneten Form durch die aus der quadratischen Abweichung berechnete *Streuung* bzw. durch deren Verhältnis zur Häufigkeit (Folgezeiten) oder zu den Umlaufzeiten erfaßt.

a) Von SZABÓ [1] wurden die *Streuungen der Geschwindigkeiten* für verschiedene Betriebszweige, Linienarten und deren Streckenabschnitte berechnet, wobei sich aus den Ergebnissen Schlußfolgerungen von großem Interesse auf den Einfluß unterschiedlicher Verhältnisse und aus den ungünstigen Erfahrungen vor allem auf die Maßnahmen im Bereich der Linienführung und der Verkehrsregelung ziehen lassen.

Tabelle I

Streuungswerte der Geschwindigkeiten auf verschiedenen Streckenabschnitten

Liniennr.	2	49	55	70	12	15	56	156
Gesamtlinie	2,2	1,0	0,6	0,9	2,3	1,2	6	5
Vorortabschnitt	3,2	1,8	0,8	1,3	3,0	2,2	3	6
Innerer Streckenabschnitt	3,0	1,0	2,0	1,5	3,7	2,1	7	10
Reisezeit in Min.	15	30	42	21	43	23	25	22
Streuung/Min.	0,2	0,03	0,05	0,7	0,1	0,1	0,3	0,5

Straßenbahn: Linie 2 außerhalb der Fahrbahn geführtes Gleis, Haltestellen mit bedeutender Verkehrsdichte
Linie 49 Innenstadt (Kleiner Ring) und Streckenabschnitte in äußeren Stadtteilen
Linie 55 außerhalb der Fahrbahn geführtes Gleis bzw. Vorortabschnitt (Rákospalota)
Linie 70 O-Bus in engen Gassen und im Stadtwäldchen

Omnibus: Linie 12 Verkehr auf dem Großen Ring
Linie 15 in verkehrsreichen Innenstadtstraßen bzw. in engen Gassen
Linie 56 Kettenbrücke — Hűvösvölgy
Linie 156 Schnellverkehrslinie Kettenbrücke — Hűvösvölgy

Aus dieser Übersicht ergibt sich für die Gestaltung der Reisegeschwindigkeit vor allem die Folgerung, daß einzelne Streckenabschnitte eine größere Streuung als die Gesamtlinie aufweisen und, daß letztere bei nicht schienengebundenen Verkehrsmitteln größer ist.

Man pflegt zu sagen, daß auf Strecken in inneren Stadtgebieten wegen der größeren Zahl von Störfaktoren eine größere Streuung zu verzeichnen sei, wie das in der Tafel bei der Straßenbahnlinie 55 und der Omnibuslinie 56 der Fall ist. Es muß jedoch auch festgestellt werden, daß mit wachsender Sättigung der Straße die Fahrzeuge sich immer mehr zu Gruppen zusammenfinden mit gleicher Geschwindigkeit und die Möglichkeit der Geschwindigkeitsstreuungen abnimmt.

b) Konstruieren wir einen weiteren neuen Kennwert von großem Interesse: die Streuung/Fahrzeit, weil aus diesem Wert die *größere Streuung von langen Linien* unter sonst gleichen Verhältnissen klarer ersichtlich ist, bzw. dieser Wert Folgerungen auf Art und Unterschiedlichkeit der Umstände zuläßt. Es deutet auf günstigere Verhältnisse, wenn bei der Omnibuslinie 12 mit längerer Fahrzeit die Streuung/Min. dieselbe ist, wie im Falle von Linie 15.

Tabelle 2

Numerischer Vergleich der Geschwindigkeitsstreuungwerte, beispielsweise für drei Linien

Geschw.	$\bar{V}$	Mó	Me	Mittl. Abweichung	σ	$\sigma/\bar{V}$	$\frac{Mo}{\sigma}$	asym $= \frac{\bar{v} - Mo}{\sigma}$
I	18,71	19,80	19,12	1,08	4,5	0,24	4,4	0,24
II	18,68	18,90	18,97	1,13	5,5	0,30	3,4	0,40
III	20,00	15,95	17,82	1,37	6,5	0,30	2,4	0,66
Insgesamt	19,13	16,78	18,65	1,15	5,6	0,29	3,0	0,42
Schwankung	7	24	7	27	44	25	83	175%

Aus der Tabelle geht hervor, daß die Streuung und besonders deren Verhältniswerte empfindlicher sind als die Schwankungen des Durchschnitts (immer auf den Kleinstwert bezogen), ferner daß die Gesamtstreuungswerte kleiner sind. Man könnte auch die beim häufigsten Wert abgelesene — größte — Häufigkeit zur Streuung ins Verhältnis stellen und versuchen, den Quotienten zu vergrößern. In der vorliegenden Tabelle stellt III die am »unregelmäßigsten« verkehrende Linie oder den »unregelmäßigsten« Streckenabschnitt dar!

3. Korrelation, Elastizität

Richtung und Strammheit der stochastischen Beziehung zwischen zwei Veränderlichen wird durch die Korrelationsrechnung ermittelt, und bedeutet das Kriterium x die Zeit, so *kommt man zur Trend-Berechnung*. Bei der Überprüfung des Verkehrsvorgangs im Massenverkehr boten sich besonders große Möglichkeiten zu einem Korrelationsgedankengang bei der Erstellung von Prognosen über die Verkehrsansprüche, bei der Tätigkeit des technischen Betriebsdienstes in Verbindung mit dem Verkehr, ferner auch in Verbindung mit dem Straßenverkehr.

a) Wenn von den möglichen Regressionsbeziehungen zwischen den erwähnten zwei Kriterien in der Exponentialform dem Exponenten ε die Rolle der *Elastizität* beigelegt wird, so kommt man zur Analyse der Zeitreihe mit Hilfe einer Indexgleichung, durch die in der Verkehrsplanung gezeigt wird, wie sich die voraussichtliche Fahrgastzahl- oder Leistungsgestaltung (Fahrgastkm) zu der Einheitsänderung (x_i) der Einflußfaktoren der Personenverkehrsbedürfnisse verhält.

$$\varepsilon_i = \frac{\dfrac{\partial U}{U}}{\dfrac{\partial x_i}{x_i}}; \qquad \frac{\partial U}{U} = \varepsilon_i \frac{\partial x_i}{\partial x_i} \quad \text{und} \quad U = c x_i^{\varepsilon_i}.$$

Nach einer früheren, an der Technischen Universität für Bau- und Verkehrswesen durchgeführten Untersuchung [2] zeigte der Gesamtverkehrsbedarf in Budapest in den vergangenen Jahren eine *logistische Entwicklung*, da die Parabel eine in der Zukunft abnehmende, und der Exponentialtrend eine zu steile Form aufwiesen. Auch der einfachere *logarithmische Trend* schien jedoch annehmbar, der innerhalb der Fehlergrenze mit der logistischen Form übereinstimmte.

Der Tabelle ist zu entnehmen, daß die Daten der Straßenbahnfahrgäste langsamer ansteigen, jedoch auch, daß sie von einem höheren Wert ausgehen.

Die Personenverkehrsströme können als bekannt gelten, wenn ihre quantitativen und qualitativen Kennwerte gegeben, deren Einflußfaktoren

Tabelle 3

Wachstumsindex (y), auf das Jahr 1958 bezogen (aus rechentechnischen Gründen wurde im Jahre 1958 die Zahl der Jahre $x = 2$ gesetzt)

	Fahrgastzahl-Wachstumsindex	Fahrgastkm-Wachstumsindex
Straßenbahn	$y = 95,2 + 16,9 \log x$	$y = 98,3 + 15,5 \log x$
Omnibus	69,9 + 94,4	70,3 + 93,7
Vorortbahn	79,0 + 74,4	84,5 + 59,2
Ingesamt	85,4 + 44,3	88,1 + 39,4

und das Modell ihrer Beziehung zu den Kennwerten geklärt ist, schließlich wenn die Modellparameter und das Modell ihrer Gestaltung bekannt sind; daher sind vor allem die *Einflußfaktoren* der Personenverkehrsbedürfnisse näher zu betrachten.

Von einer makroökonomischen Anschauung ausgehend wurde für die Gestaltung des Fahrgastindexes in der Indexgleichung von KÁDAS [3] die Entwicklung der *wichtigsten Einflußfaktoren der Fahrgastzahl* analysiert, unter Berücksichtigung der Veränderungen wenigstens der Einwohnerzahl L, der Netzgestaltung H, des Realtarifs T und des Reallohns B, in Form der Gleichung

$$I_u = x I_L^{\varepsilon_1} \cdot I_H^{\varepsilon_2} \cdot I_T^{\varepsilon_3} \cdot I_B^{\varepsilon_4}$$

Tabelle 4

Gestaltung des Koeffizienten und der Exponenten der Indexgleichung beim Massenverkehr in Budapest, auf Grund der Daten des Jahres 1956

Nur für Straßenbahn	$10^{-1,82}$	1,19	0,68	−0,05	0,08
Für Omnibus	−8,05	4,29	0,45	−0,62	0,89
Für ganz Budapest	−3,03	1,96	0,55	−0,17	0,17

Man sieht bei den Exponenten unter Eins die regressive und bei den negativen Exponenten die inverse Beziehung, ferner, daß der Omnibus nur hinsichtlich der Empfindlichkeit gegen Vergrößerung des Netzes hinter der Straßenbahn zurückbleibt. Durch die Einbeziehung der Einflußfaktoren eines nach dem anderen in die Berechnungen werden die Beziehungen enger.

b) Es wurde bereits erwähnt, daß der Verkehrsvorgang durch die Fahrzeugsinstandhaltungstätigkeit wesentlich beeinflußt wird, und es ist gelungen, für einen Wagen Typ »TR 5« des Hauptstädtischen Omnibusbetriebs, der bereits fünf Generalüberholungen hinter sich hatte, bei einem

Korrelationskoeffizienten $r = 97\%$ eine enge lineare Beziehung für die Laufkilometer y zwischen zwei Generalüberholungen zu finden, die sich zu $0 + + 193500\,x$ ergab, wo x angibt, um die wievielte Generalüberholung es sich handelt. Wie bekannt, ist die vereinfachte Berechnung ähnlich der erwähnten Trend-Berechnung.

Die Gestaltung der in der Reparaturwerkstätte durchgeführten Reparatur erfordernden Linienschäden stellt einen weiteren technischen Fahrzeugskennwert dar, der den Verkehr beeinflußt; die Gesamtzahl y dieser Schäden ergibt sich für einen Omnibus Bauart Ikarus 60 in Abhängigkeit von der bis zum Sachvierteljahr geleisteten mittleren Kilometerzahl x, sodann nur auf die Motorschäden m aufgeschlüsselt zu

$$y = 0 + 4{,}18\,x \text{ (in 1000 km) bei } r = 91\%$$

$$m = 133 + 0{,}82\,x,\ r = 70\%$$

Durch eine ähnliche Untersuchung des voraussichtlichen Verhaltens von Wechselgetriebe, Hinterachsenbrücke und anderer wichtiger und empfindlicher Aggregate gelang es, Angaben über das erforderliche Wagenbeistellungsprozent zu liefern, um dem Ausbleiben von Umläufen vorzubeugen; ferner in Kenntnis des Tageslaufes und des Fahrzeugbestandes auch über den Zeitbedarf der Reparaturen.

4. Anwendung von Verteilungstypen

41. *Der Fahrplan* stellt die Zeitfolge des Betriebs(Produktions)-prozesses des Verkehrs dar, und enthält die Weg-Zeit-Funktion von bewegten und die Aufenthaltszeiten von ruhenden Massen. Auch unter operativen Verhältnissen ist die Zeitfolgenplanung dem Wesen nach mit der Fahrplanbildung identisch, wobei wegen der zahlreichen Alternativen bzw. der Folgen von raschen Entscheidungen die Kybernetisierung und Automatisierung begründet erscheinen. Das mathematische Modell ist eine dynamische Programmierung, von den Wechselwirkungen im Straßenverkehr ausgehend mit zahlreichen Varianten. Die Optimalvoraussetzung der Fahrplanbildung besteht in der Befriedigung der *wohlbegründeten* gesellschaftlichen Bedürfnisse bei einem Mindestmaß an Aufwendungen, u. zw. auf die günstigste Weise, die durch das Fassungsvermögen, die *Reisegeschwindigkeit* und die optimalen Haltezeiten entscheidend beeinflußt wird. Für diese müssen Zeitnormen und Verlauf aufgrund der Wahrscheinlichkeitsrechnung ermittelt werden, da es als *Zufall* aufgefaßt werden kann, welche von den vielen Varianten die Optimalvariante darstellt [4].

Es ist nachgewiesen, daß die Umlaufzeit nur teilweise aus unzweideutig determinierbaren sog. »kausalen« Erscheinungen besteht, sie setzt sich großenteils aus zufällig, doch gleichzeitig massenhaft vorkommenden »stochastischen« Ereignissen zusammen.

Es scheint zweckmäßig, die Untersuchung im Sinne der Fragestellung weiterzuführen, wo sich die einzelnen Verteilungstypen je nach ihrem allgemeinen Charakter und unter Berüchsichtigung der im Stadtverkehr gemachten Erfahrungen anwenden lassen, naturgemäß immer unter der Voraussetzung, daß eine Überprüfung mit Hilfe der Anpassungsanalyse durchgeführt wird.

42. *Eine Normalverteilung* entsteht im Sinne des Satzes der zentraleu Grenzverteilung *als Summierung der Wirkungen von zahlreichen unabhängigen Wahrscheinlichkeitsveränderlichen*, was sich nicht nur bei den Verkehrsuntersuchungen verwerten läßt, sondern sich auch bei den Analysen geltend machte. Wir bedienten uns bei den Untersuchungen über den städtischen Verkehr auch der *allgemeinen* Anwendungsweisen der Normalverteilung, wie z. B. *bei der repräsentativen Stichprobenauswahl von Fahrgastströmen*, wo wir bei gegebenem Konfidenzniveau und unter Einhaltung der Fehlergrenze Δ (aufgrund der normaleu Verteilung der Stichprobe) die Auswahlverhältnisse

$$\frac{n}{N}\,\% = \left(\frac{t\sigma}{\Delta}\right)^2 \cdot \frac{100}{N}$$

errechneten [5].

Die normale Verteilung kommt in einzelnen, im Verkehr charakteristisch wiederkehrenden Arbeitsbereichen vor — sofern sich natürlich die das Wesen der Strömung betreffenden Umstände nicht verändern —, wie die Geschwindigkeitsverteilung, die Möglichkeit und Wahrscheinlichkeit der Vorfahrt im Straßenverkehr, doch in unserem Falle vor allem die *Umlaufzeit im Massenverkehr* und naturgemäß deren zahlreiche Komponenten.

Eine normale Verteilung liegt ferner im *technischen Dienst* des Hauptstädtischen Omnibusbetriebs beim Kilometerlauf bis zur Ausmusterung der Wagen Typ Tr 5 vor (durch eine *chi*^{2} Probe auf 5%iger Höhe überprüft) [6], wo sich der zur Beschreibung der Normalverteilung erforderliche voraussichtliche Wert zu 1 Million km ergab, bei einer Streuung von 71 000 km; SZÁNTÓ kam unter Anwendung der Monte-Carlo-Methode zum selben Ergebnis für die Kraftdroschken [7] und die Hochschule für Verkehrswesen Dresden für die Verteilung der Fahrgäste um die günstigste Wegstrecke. Die Tageslaufverteilung der Omnibusse ergibt sich nach PÁLMAI zu

$$y = \frac{1}{215 \cdot 6}\, e^{-\frac{(x-247)^2}{14792}}$$

Die *Umlaufzeit* stellt im städtischen Massenverkehr die Zeit dar, die zwischen zwei aufeinander folgenden Durchfahrten durch denselben Punkt in derselben Richtung vergeht und die außer der reinen Fahrzeit die Beschleunigungs- und Verzögerungszusatzzeiten — bei Planungen die voraussichtliche Wirkung der Verzögerungsstrecken —, die Haltezeiten in den Haltestellen und Endhaltestellen enthält und somit zum Begriff Umlaufgeschwindigkeit den Nenner liefert (wobei der Begriff der Rotationsgeschwindigkeit für den Quotienten aus der an demselben Tag von der Ausfahrt aus der Garage bis zur Rückkehr zurückgelegten Entfernung und der Gesamtzeit vorbehalten werden soll). Ein dem letzteren verwandter Begriff ist die Reisegeschwindigkeit, die den Zeitverlust in der Endhaltestelle nicht enthält.

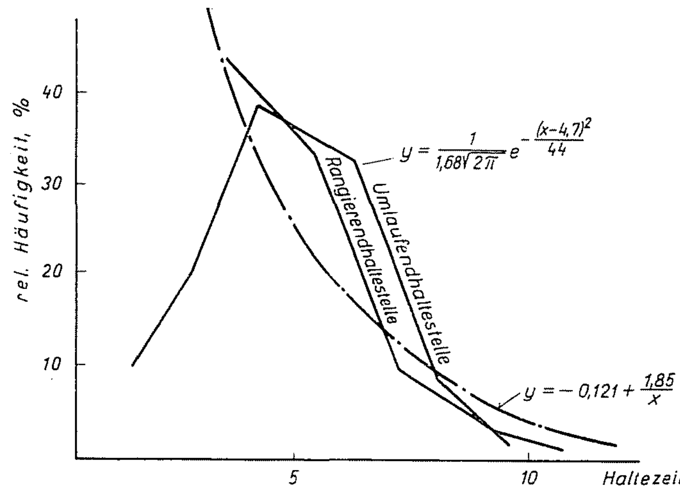

Abb. 1. Haltezeiten in den Endhaltestellen der Straßenbahnlinie 56

Erörtern wir dies eingehender, vor allem hinsichtlich des Verhaltens der erwähnten Umlaufzeitkomponenten, in Anlehnung an die Untersuchungen des Lehrstuhls für Verkehrsbetriebslehre. Es empfiehlt sich jedoch auch, einen Teil der Umlaufzeit zu analysieren, um die gemeinsame Wirkung der zahlreichen zufälligen Störfaktoren, deren *unvermeidliches* Ausmaß in die Fahrplanberechnungen hineinzubauen bzw. um die real erforderliche Größe der *Reserven,* die — bis zu einer gewissen Grenze — zur Kompensation der weiteren Abweichungen nötig sind, zu errechnen.

Bei der Untersuchung der zahlreichen Umläufe und deren Komponenten für ein Fahrzeug (Straßenbahn, Omnibus) im städtischen Massenverkehr wurde im allgemeinen eine normale Verteilung erhalten, nicht nur für die gesamte Umlaufzeit, sondern auch für die zwischen den Haltestellen *in Fahrt verbrachte Zeit* und für den *Aufenthalt* in sog. Umkehr-*Endhaltestellen,* wo Abfahrts-(Rangier-)-eingriffe nicht störend wirken [8] (Abb. 1).

Es sind hier jedoch zwei Bemerkungen zu machen: nach unseren Beobachtungen wurde eine am meisten *lognormale* Verteilung bei einem befriedigenden 5prozentigen Niveau für die Aufenthaltszeiten in den Haltestellen der Straßenbahnlinie 49 sowie deren Komponenten gefunden: u. zw. für die genaugenommene Zeit für Fahrgastwechsel und für die Verkehrsverzögerungen durch Lichtsignale (Abb. 2) (diese wurde von VINCZE 1963 auf Zehnerbasis festgestellt [9]), ferner hinsichtlich der hindernden Wirkung von Schranken an mehreren Stellen, zwar mußten wir uns bei der Analyse der Schranke bei der Árpád-Straße mit einer Regressionsbeziehung t (Min.) $= 7.3 + 2.4x$ bei einer Strammheit von 91% begnügen. All das zeigt, daß sich die Wirkung der veranlassenden Komponenten vervielfacht, ein Umstand, der den Hauptsätzen der Wahrcheinlichkeitsrechnung gemäß auf Gleichzeitigkeit hinweist. Für die Häufig-

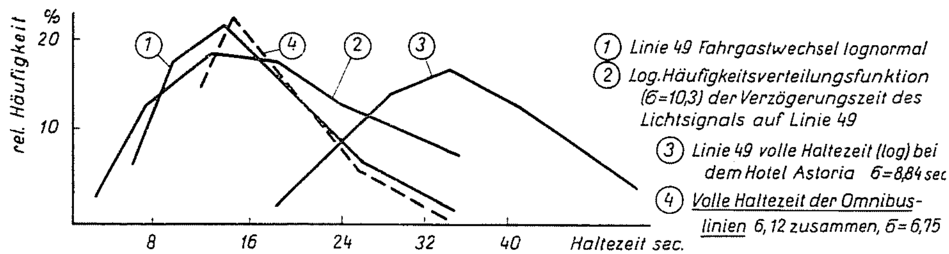

Abb. 2. Häufigkeit der Haltezeiten in den Haltestellen

keit der Wartezeiten von x Minuten in den Endhaltestellen *unter dem Einfluß von Rangiermaßnahmen* ergab sich bei der Straßenbahnlinie 56 die interessante Beziehung $y = -0.121 + 1.85/x$ unter Anwendung des üblichen linearen Berechnungsverfahrens, wenn wir dabei vorübergehend mit $1/x$ arbeiteten.

Die Untersuchung über die *Fahrzeiten* zwischen zwei Haltestellen bei der Straßenbahnlinie 49, ferner über die Umlaufzeiten bei den Straßenbahnlinien 2 und 56 sowie den Halbumlauf der Omnibusline 4 führten ebenfalls zu normalen Verteilungen [8]. Hier ist hingegen von Interesse, daß die Umlaufzeiten bei der in großen Zeitabständen verkehrenden Straßenbahnlinie 4a und der Omnibuslinie 39 (bzw. beim Omnibus immer die Halbumlaufzeit) aufgrund einer entsprechenden Überprüfung eine Poissonverteilung ergab, wodurch wieder bestätigt wird, daß die Poisson-Kurve eine Eigenartigkeit der Verteilungen seltener Ereignisse darstellt. Das wirkt jedoch nicht störend auf unsere Arbeitsmethode, nach der wir statt zu probieren, zuerst von einer Normalverteilung ausgehen, die durch eine entsprechende Anpassungsprüfung kontrolliert wird.

Bei starken *Störwirkungen* ausgesetzten langen Linien ist aus dem aufgrund der Erhebungsergebnisse errechneten Häufigkeitshystogramm zu ersehen, daß sich der rechtseitige Kurvenast weiter streckt als der linke, d. h. das Hystogramm ist asymmetrisch [8]. Das weist darauf hin, daß *bei solchen langen Linien* im Vergleich zum Fahrplan oder zur häufigsten Umlaufzeit *Verspätungen häufiger vorkommen* als Voreilen. Bei weniger gestörten Linien (wie z. B. die Straßenbahnlinie 2) ist der Grad der Asymmetrie gleich 0.

Die Häufigkeitsverteilungskurven lassen sich zur Kontrolle der Einhaltung der Fahrplanvorschriften und zur Verbesserung des Fahrplanes aufgrund der anfallenden Störungen günstig heranziehen. Dazu ist die beobachtete *häufigste Fahrzeit* (Umlaufzeit) mit der im Fahrplan vorgeschriebenen Fahr- bzw. Umlaufzeit zu vergleichen. Bei Straßenbahnlinien liegt eine Schwankung des häufigsten Wertes um die fahrplanmäßige Zeit vor; in einzelnen Fällen ist dieser Wert noch größer, was auf wiederholte Verspätungen deutet. Das zeigt, daß der Straßenbahnfahrplan aufgrund der häufigsten Werte erstellt wird. Die Analyse der Omnibuslinien ergibt hingegen, daß diese der fahrplanmäßigen Zeit gegenüber in der Regel (in jedem Falle der Erhebung) voreilen. Die Fahrzeuge kommen regelmäßig um 2 bis 3 Minuten früher in der Endhaltestelle an als vorgeschrieben. So steht eine gewisse Reserve für den Ausgleich von größeren Verspätungen zufolge von Störungen zur Verfügung.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die aufgrund von Umlaufzeitbeobachtungen konstruierten Häufigkeitsverteilungskurven dazu geeignet sind, daß daraus zur Verbesserung des Fahrdienstes Folgerungen für die Fahrplanbildung und die operative Verkehrsregelung gezogen werden. Bei der Erstellung des Fahrplanes können auf dieser Grundlage frühere Fahrpläne analysiert und anhand der Fahrgastzahl für die Bildung des neuen Fahrplanes verwendet werden; die *Fahrbediensteten* können aus diesen Kurven über die Zeitreserven unterrichtet sein und sich mit deren Hilfe auf die Behebung der voraussichtlichen Störungen vorbereiten.

43. *Die Poissonverteilung* ist im Falle von seltenen Ereignissen für die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens des »günstigen« Ereignisses in der Zeiteinheit kennzeichnend: im Verkehr für die Verteilung des Eintreffens oder Durchfahrens von Fahrgästen bzw. Fahrzeugen, doch auch für die Zahl der Verkehrsunfälle. Mit welcher Wahrscheinlichkeit stellen sich in gewissen als »Einheit« gewählten Zeitintervallen 0, 1, 2, 3 Fahrgäste in der Haltestelle oder bei der Abonnementskasse usw. ein? Der Parameter λ der Poissonverteilung stellt die voraussichtlichen Werte Wagen/h oder Fahrgast/h dar, und damit ist die Grundlage für die Eingangsrate der Theorie der *Warteschlangen* geschaffen.

Es soll betont werden, daß man eine Poissonverteilung lediglich im Falle von störungsfreien Strömungen erhält, eine Feststellung, die Folgerungen auf das *Vorhandensein von Störungen* zuläßt (Abb. 3). Wenn in den erwähnten Fällen die Annahme einer Poissonverteilung durch die *chi*-Quadrat-Probe nicht bekräftigt wird, so besteht der Verdacht einer Verkehrsstörung, der die Analyse der Komponenten erfordert.

44. Es wurde versucht, die Wahrscheinlichkeit von in gleichen *Zeitintervallen* eintretenden 1, 2, 3 günstigen Ereignissen durch eine Poissonverteilung zu kennzeichnen, doch soll zwischen dieser und einer zu einer EXPONENTIALEN Verteilung führenden Fragestellung ein Unterschied gemacht werden: mit welcher Wahrscheinlichkeit ergeben sich zwischen aufeinander folgenden

Zügen Zeitintervalle, Zugfolgezeiten von 1, 2, 3 Minuten? Eine exponentiale Verteilung liegt bei Lebens- und Zeitdauerangaben vor, wobei ihr Parameter λ auch hier Wagen/h., ihre Verteilungsfunktion $F = 1 - e^{-\lambda t}$ ist. Da das nachstehende Beispiel zeigt, wie bei Vorhandensein einer Kombinationsmöglichkeit von mehreren Linien die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens zunimmt, erhalten wir ausnahmsweise wieder bestätigt, daß eine horizontale Kooperation berechtigt ist, wenn zwei Verkehrszweige nebeneinander in Betrieb sind, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Störungen voneinander weitgehend unabhängig ist.

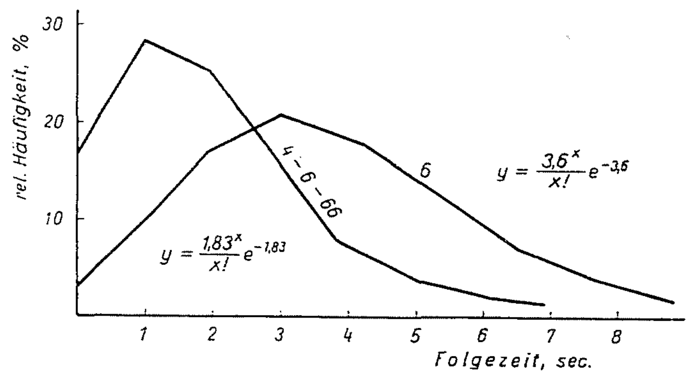

Abb. 3. Gemeinsame Folgezeit der Straßenbahnen auf dem Großen Ring

Eine derartige Frage liegt vor, wenn der Fahrgast z. B. auf dem Großen Ring nur die Linie 4 ($\lambda = 4{,}7$ Zug/h), nur die Linie 6 (18.6), nur die mit diesen parallele Omnibuslinie 12 (12.5) berücksichtigt, oder wenn von diesen eine jede ihm entspricht. Die auf dieser Grundlage für verschiedene Linien und Fahrzeugarten aufgebaute Berechnung ist in folgender Tafel bei zunehmender Wahrscheinlichkeit dargestellt:

$$F(\lambda, t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Im Falle von $t = 1/60$ und nur

Linie 6, $t = 0{,}31$,	$e^{-0.31} = 0{,}73345$,	$F = 1 - 0{,}73345 =$	26%
Linie 4	0,08	0,92312	7
Linie 12	0,21	0,81058	19
zusammen	0,60	0,54881	45

Im Falle von $t = 2/60$ usw. Linie 6

$0{,}62$, $e^{-0.62}$ $\quad$ 0,53794 $\quad$ 46%

Aus dieser Zusammenstellung ist die Nützlichkeit der Kombinationsmöglichkeit verschiedener Verkehrszweige, im vorliegenden Falle ihrer horizontalen Kooperation ersichtlich.

45. *Umlaufanalyse und Reservenbildung.* Nach einem Überblick über das Verhalten der *Umlaufzeit*-Komponenten, doch auch der Umlaufzeit als Ganzes, sollen Schlüsse gezogen und bei der Fahrplanbildung verwertet werden.

Eine Analyse aufgrund einer beträchtlichen Zahl von Beobachtungen liefert für die Verkehrsregelung folgende Erfahrungen:

a) der zahlenmäßige Streuungswert und das *Ausbreitemaß* (Quotient aus der maximalen Häufigkeit und der Streuung) erfordert auf dem betreffenden Abschnitt einen schleunigen Eingriff;

b) eine Änderung des Fahrplans ist begründet, wenn die nach der Kurve häufigste Umlaufzeit vom im Fahrplan angegebenen Wert *wesentlich abweicht*;

c) weist die theoretische Verteilungslinie einen Knick auf, so deutet das auf Überlastung und Störungen;

d) eine Verzerrung der normalen Verteilung in der Endhaltestelle deutet auf regelmäßige Verspätungen, und unterschreitet die durchschnittliche Haltezeit in der Endhaltestelle das häufigste Vorkommen, so stellt die Einfügung des letzteren oder umgekehrt des Durchschnittswertes in den Fahrplan eine Zeitreserve — in abträglichem oder nutzbringendem Sinne — dar;

e) anhand einer unter ungünstigen Witterungsverhältnissen aufgezeichneten Kurve sind Umlaufzeiten und Wagenanzahl für voraussichtliches schlechtes Wetter festzulegen;

f) die Regressionsgleichungen der Störfaktoren ermöglichen die Vorausberechnung letzterer und ihre Einarbeitung in die Umlaufzeiten;

g) die Häufigkeit der Abweichungen vorgegebener Größe von den fahrplanmäßigen Umlaufzeiten und der Zuläßigkeitsgrad ergeben die Aktualität des Einsatzes von Reserven.

Welchen praktischen Vorteil hat es, zu kennen, ob die betrachtete Veränderliche zur normalen Verteilung gehört [5]? In Kenntnis der Verteilung läßt sich nämlich ermitteln, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Werte der Veränderlichen in einer beliebigen gegebenen Umgebung des voraussichtlichen Wertes stehen. Das ist für den sich in den Straßenverkehr einordnenden städtischen Massenverkehr wegen seiner zahlreichen Störfaktoren von erstrangiger und spezifischer Bedeutung. Da bereits festgestellt wurde, daß die Umlaufzeitgestaltung bzw. deren Streuung dem »normalen« Verteilungstyp angehört, sind lediglich zwei Parameter — der aus einer großen Anzahl von lokalen Messungen hergeleitete, voraussichtliche μ-Wert und die Streuung — erforderlich, um für eine Linie die konkrete Verteilungskurve (»Häufigkeitsverteilungsfunktion«) aufzuzeichnen. Bei normaler Verteilung hat die Streuung eine anschauliche Bedeutung: 68% der Werte fallen in den Intervall $\mu \pm \sigma$, zwischen die Konfidenzgrenzen von je 2σ links und rechts 95,45%; dies wurde

z. B. bei der repräsentativen Verkehrszählung mit Befragung nach Quelle und Ziel benutzt, da die Stichprobendurchschnittswerte im Sinne des *Ljapunow*schen zentralen Grenzverteilungssatzes, von der Grundgesamtheit unabhängig, eine annähernd normale Verteilung aufweisen. Aus der obigen Deutung der Konfidenzintervalle wissen wir also, daß 95,45% der tatsächlichen Umlaufzeiten zwischen die Grenzen $\mu \pm 2\,\sigma$ und 4,55% außerhalb dieser Grenzen fallen; werden jedoch nur die Verspätungen berücksichtigt, so entfallen »auf eine Seite« 2,28%.

Tabelle 5

Wahrscheinlichkeit der Verspätungen über dem Signifikanzkriterium, bei Bezeichnung des Streuungsmultiplikators durch das übliche t

Bei	$t = 0.5$	30,85%
	$t = 1$	15,87%
	$t = 1.5$	6,68%
	$t = 2$	2,28%
	$t = 2.5$	0.62%

Um auf unser konkretes Thema zurückzukommen, können zwei Gedankengänge verfolgt werden: unter Angabe in Minuten der maximal zulässigen Abweichung lassen sich aus der vorstehenden Tafel die Wahrscheinlichkeit bzw. die der Überschreitung dieser Abweichung feststellen, was man zur Kenntnis nimmt; liegt eine Abweichung über dem Zulässigkeitsgrad vor, so wird — unter der Voraussetzung, daß bereits zur Regelung des Verkehrs alles getan ist — die Umlaufzeit so *verlängert*, daß der Verspätungsprozent den Zulässigkeitsgrad unterschreitet. Eine andere Lösung besteht darin, die Umlaufzeit unangetastet zu lassen und in der Endhaltestelle *Reservewagen* bereitzustellen, die dann eingesetzt werden, wenn die Verspätung die in der Umlaufzeit mit inbegriffene Haltezeit in der Endhaltestelle übersteigt, und durch diese Maßnahme — sehr richtig — eine Häufung der Verspätung, eine verspätete Rückfahrt vermieden werden soll. Bei der Wirksamkeitsberechnung des Einsatzes von Reservewagen kann z. B. eine Verspätung von 1 Min. bei der Abfahrt, d. h. eine geringe Wahrscheinlichkeit der verspäteten Abfahrt, zugelassen werden, was zur Weglassung des Einsatzes von Reservewagen oder zur Verminderung von deren Anzahl führen könnte, doch ist ein derartiges Vorgehen nicht zu empfehlen. Es ist vielmehr zu überlegen, daß man in der *gemeinsamen Endhaltestelle* mehrerer Linien die gemeinsame Wahrscheinlichkeit der Verspätungen über dem zulässigen Wert ermittelt, und da diese gewiß gering und erträglich ist, lieber auf die Reservenbildung je Linie verzichtet und gemeinsame Reserven vorsieht. Darin besteht ein Vorteil der Knotenpunkte mit mehreren Endhaltestellen, besonders wenn dort auch noch eine mit UKWG ausgerüstete »komplexe« Brigade, bestehend aus einem Reparaturfachmann und einem Fahrbediensteten, in Dienst gestellt wird, die auf mehreren Linien eingesetzt werden kann.

Beispiel. Omnibuslinie 39A, mit einer vorgeschriebenen Halbumlaufzeit von 48 Min. und einer mittleren Laufzeit von 46 Min. bei einer Streuung von 5,12 Min. Zu bestimmen ist die Häufigkeitsverteilungsfunktion:

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

Bei der Rückfahrt kommt eine Verspätung von 1 Min. vor, wenn — unter Berücksichtigung der Haltezeit von 2 Min. — bei der Ankunft eine Verspätung $\Delta = 3$ Min. vorlag, die $= t\,\sigma$ ist, d. h. es gilt: $t = \Delta/\sigma$.

Im Falle einer Verspätung bei der Rückfahrt von $\Delta = 3$, ist $t = 3/5 \cdot 12 = = 0{,}587$, die zu diesem Wert gehörigen beiderseitigen Konfidenzgrenzen betragen 44%; 56% fallen also außerhalb dieser Grenzen; die halbteilige Wahrscheinlichkeit beträgt

$$\frac{56}{2} = 28\,\%\,.$$

Bei einer Rückfahrtsverspätung von 2 Min. ist

$$\Delta = 4,\ t = 0{,}78,\ \text{beiders. } 56\%$$

$$\text{halbt.} = \frac{44}{2} = 22\,\%\,.$$

Bei einer Rückfahrtsverspätung von 3 Min. ist

$\Delta = 5$, $t = 0{,}975$, beiders. 67%, halbt. $= 33/2 = 16{,}5\%$.

Hier stellt sich die Frage, ob man es dulden darf, daß in 28% der Fälle eine verspätete Rückfahrt vorkommt, da im entgegengesetzten Falle die oben erörterten Maßnahmen zu treffen sind.

Bei einer Häufigkeit von 3 Min. fällt eine ganze Fahrt dann aus, wenn die Verspätung 5 Min. beträgt, weil dann der Wagen gerade im für die nächste Fahrt bestimmten Zeitpunkt abfährt: die Wahrscheinlichkeit, daß dies vorkommt, ist — wie man es oben gesehen hat — 16,5%. Soll das nicht zugelassen werden, dann sind Reservewagen einzusetzen. Wenn von einer gemeinsamen Endhaltestelle zwei dem Ansatz vollkommen entsprechende Linien abfahren, dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß bei beiden Linien gleichzeitig der Einsatz eines Reservewagens erforderlich wird, nach dem Multiplikationstheorem $0{,}165 \cdot 0{,}165 = 2{,}72\%$. Da von diesem Fall abgesehen werden kann, begnügt man sich mit einem einzigen Reservewagen.

In Kenntnis der Normalverteilung können besonders interessierende *Wirksamkeitsüberlegungen* angestellt werden. Unter der Voraussetzung, daß auf der Strecke bereits alles für die Einhaltung des Fahrplans getan ist, muß — falls die durch die Störungen verursachte Streuung nicht haltbar scheint — die Linienlänge vermindert werden; Wirksamkeitsüberlegungen sind auch erforderlich, um zu bestimmen, bei welchem Verspätungsprozent ein Reservewagen gefordert werden darf, wenn neben der Abschreibung des Wagens auch der Lohn des Personals berücksichtigt wird. Endlich sind wir im Besitz eines unzweideutigen Mittels, mit dessen Hilfe sich die maximale Linienlänge von Fall zu Fall ermitteln läßt, statt zu versuchen, mittlere Grenzwerte aufgrund von Erfahrungen rein gefühlsmäßig anzugeben.

5. Modelle der Operationsforschung

51. *Die auf die stochastischen Modelle gerichtete Tendenz der Entwicklung*

Bei der Analyse und Lösung von technisch-ökonomischen Problemen mit Hilfe von mathematischen Modellen wurden in der zeitgemäßen Betriebsleitung mehrere Modelltypen entwickelt, die wir fertig erhalten und zweckmäßig bei den Untersuchungen über den städtischen Verkehr anwenden können: unter diesen nimmt — neben den bereits erörterten — die stochastische Theorie einen immer bedeutenderen Platz ein.

Es soll hier nicht näher auf die *Vorrats-, Ersatz- und Warteschlangenmodelle* [10] eingegangen werden, da erstere für den Verkehrsprozeß nicht spezifisch kennzeichnend sind (obwohl auch die Vorrats- und Ersatzmodelle in stochastischer Form das Interesse erregen); die Häufigkeitsverteilungsfunktionen der Generalüberholung, wirtschaftlichen Lebensdauer und des Tageslaufes werden mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode miteinander in Zusammenhang gebracht [7]; da die Anwendung bereits im Verkehr verbreitet ist, sollen lediglich einige Beispiel aufgezählt werden:

Warteschlangen in Haltestellen, bei Abonnements- und Fahrkartenschaltern;

Anzahl der schlangestehenden Wagen vor Tankstellen und Reparaturgruben;

Zeitkartenkontrolle; Zeiten der Befragung von Fahrgästen; erforderliche Anzahl der Parkplätze bei großen Veranstaltungen;

Vorgänge vor Lichtsignalen und Schranken: erforderliche Zahl der Gleise (Wagenstandplätze) in Endhaltestellen; Fernsprechzentrale usw.

Das Eintreffen weist — der Natur der Dinge gemäß — meistens eine Poissonverteilung auf, während die Abfertigung — als Zeitraum — schon zufolge des Zusammenhanges exponential (oder konstant) verteilt ist.

Allokationsmodelle und deren Lösung mit Hilfe von Programmierungsmethoden werden ausgedehnt und charakteristisch gerade im Verkehr bereits seit verhältnismäßig langer Zeit verwendet. Es steht fest, daß dies vor allem für die Transportaufgaben usw. des Lkw-Verkehrs zutrifft, ähnliche Leerlaufkilometer-Untersuchungen können jedoch auch im Personenverkehr unternommen werden, wenn die Endhaltestellen den Wagenschuppen (Garagen) zugeordnet sind. Es kann von Interesse sein, weitere Verallgemeinerungen vorzunehmen und für die optimale *Personalbeordnung* zwischen Wohngebietschwerpunkten und Betriebshöfen Berechnungen durchzuführen. Da es sich hier nicht um die Vorführung verschiedener bekannter Programmierungsverfahren handelt, wird die Personalbeordnung bei der Lösung durch lineare Programmierung in der Zufallsspieltheorie erörtert.

52. *Netzwerktechnik in der Prozeßplanung und in der Verkehrsanalyse*

Die Methoden der Netzwerkplanung spielen in der Untersuchung von Verkehrsproblemen eine wichtige Rolle. Die mathematische Grundlage dieser Methoden wird durch die Theorie der Graphen geliefert. Die Transportprobleme tragen einen Netzcharakter, auf dem sich die netzwerktechnische Analyse der Anordnungen und Belastungen von Verkehrsströmen, ferner die Bestimmung des auch im Verkehrsbauwesen benutzten kritischen Weges aufbauen. In der Netzwerktechnik ist jede Kante (jeder Streckenabschnitt) mit irgend einem Aufwendungskennwert c versehen (diese Kennwerte werden im übertragenen Sinne auch Widerstände genannt) und hat Eintritts-, Austritts- und Zwischenknotenpunkte.

Eine *Verkehrsanalyse* setzt sich nun aus folgenden Schritten zusammen:

1. Berechnung — mit Hilfe von Analogiemodellen — der Größe der zwischen sämtlichen Punkten des Verkehrsnetzes vorhandenen oder geplanten Fahrgastströme;

2. Bestimmung der *Aufwendungskennwerte* für sämtliche Wegstrecken und Knotenpunkte, wobei die erhaltenen Werte letzterer vor die Streckenabschnitte angeschlossen werden;

3. bei Neuplanungen und wenn bei Verkehrszählungen mit Befragung nach Quelle und Ziel nicht auch nach der Wegstrecke gefragt werden konnte, Ermittelung der *optimalen Wegstrecke* zwischen jedem Punktpaar, wobei meistens eine minimale Fahrzeit angestrebt wird;

4. *Verteilung dieser Strömungen* um die optimale Wegstrecke, wenn angenommen wird, daß nicht jeder Fahrgast die optimale Wegstrecke findet oder aus irgenwelchem Grunde neben der Fahrzeit auch andere Belange berücksichtigt;

5. aus sämtlichen Kombinationen und deren Verteilungsalternativen werden für jeden Streckenabschnitt die erhaltenen »Belastungen« summiert, und nach einem Vergleich mit der zur Verfügung stehenden *Leistungfähigkeit* wird die ganze Operation mit der die Leistungsfähigkeit übersteigenden Fahrgastzahl wiederholt, denn würde dies unterlassen, so würde der fahrzeitver-

längernde Einfluß der unerwünschten Verkehrsstauungen ohnehin umleitend wirken;

6. die *Wechselbeziehungen mit der städtebaulichen Planung* werden berücksichtigt, da zwar das Verkehrsnetz nach den bekannten Netzplanungsgrundsätzen in erster Reihe tatsächlich auf den Stadtplan abgerichtet ist, würde jedoch der Verkehr irgendwo versagen, so ist auch mit Rückwirkungen auf die Stadtentwicklungsplanung zu rechen;

7. schließlich wird erwogen, ob die vorgesehenen Strömungen eine *direkte Linie* erfordern; bejahendenfalls wirkt dieser Umstand auf die Knotenpunktplanung aus; im entgegengesetzten Falle ist die Berechnung mit der die Erreichungszeit verlängernden, zusätzlichen Zeit für das Umsteigen zu wiederholen, vor allem wenn auch die mit dem Umsteigen verbundene Unbequemlichkeit berücksichtigt wird (nach PATZ mit einem Gleichwert von 2 Minuten [11]).

zu 1. Nach dem Überblick über diesen Planungsgedankengang sollen zuerst zwei *Anlogienmodelle* betrachtet werden. Ähnlich dem Newtonschen Gesetz wurden sog. »Gravitationsgesetze« für zwischen zwei Punkten generierte Fahrgastzahlen aufgestellt, wo die Anziehungs- und Abstoßungseigenschaften durch die Einwohnerzahl des Gebietes (Lill), der Zahl der Werktätigen oder der Arbeitsstellen gekennzeichnet wird [12], und der Nenner nun schon vielmehr durch die Reisezeit ersetzt wird.

Tabelle 6

Werte des im Lillschen Gesetz die Umstände kennzeichenden Beiwertes k für Budapest

Zwischen Industrie- und Industriegebiet	$11 - 35 \cdot 10^{-6}$
Wohn- und Wohngebiet	$8 - 30 \cdot 10^{-6}$
Industrie- und Wohngebiet	$7 - 24 \cdot 10^{-6}$
Verwaltungs- und Industriegebiet	$470 - 1400 \cdot 10^{-6}$
Verwaltungs- und Wohngebiet	$40 - 100 \cdot 10^{-6}$

Zwar ist es schwiering und nicht immer möglich, die Verwaltungsbezirke in derartige Kategorien einzureihen, macht sich in der Korrelation doch der auf die Verkehrsbedürfnisse steigernd wirkende Einfluß der administrativen Stadtviertel und die mäßigende Tendenz der Wohnviertel geltend.

Auf das zweite Analogiemodell, das aus dem Kirchhoffschen Gesetz ausgeht, soll bei der Behandlung der Strömungsverteilung eingegangen werden.

zu 2. Die Aufwendungskennwerte c der Streckenabschnitte bedeuten meistens *Reisezeiten*, da im Verkehr, als Ortsveränderungsprozeß, der Zeitaufwand erstrangig ist. Aus gewissen Gründen können auch Wegstreckenlänge, Kosten, Energie vorkommen. Hier muß noch auf zwei Fragen kurz eingegangen werden:

a) Veranlassungen, durch die die zeitliche Wahl der Wegstrecke beeinflußt wird, wie Umsteigen, Mehrkosten und psychologische Werte, werden durch einen Zeitgleichwert, mittels vergrößernder oder vermindernder Multiplikatoren gekennzeichnet.

b) Es darf nicht um jeden Preis eine Einsparung an Zeit gefordert werden, wenn diese mit einer ernstlichen Kostenzunahme verbunden ist, was dann vorkommt, wenn die Linie mit kürzerer Reisezeit länger ist, jedoch ein rascheres Vorwärtskommen ermöglicht; auf betrieblicher Ebene ist in diesem Falle der auf die Amortisation der Fahrzeuge vermindernd wirkende Einfluß der *kürzeren Reisezeit* den höheren Betriebskosten des längeren Weges gegenüberzustellen $(h_2 - h_1)$, jedoch auch den, längere Reisezeiten herbeiführenden Energieverlusten. Den Grenzwert erhält man aus der Formel

$$(h_1 - h_2) < \frac{114\, c_w Q v^2 + 0{,}176\, c_j \left[t_A + v \left(\frac{1}{g} + \frac{1}{f} \right) \right]}{2 c_w Q w + 0.176_j c_j\, 1/v}$$

wo c_w die Einheitskosten für die Arbeit des Fahrzeuges und c_j für dessen Amortisation, Q das Bruttogewicht, v die maximale Geschwindigkeit in m/sec, g die Beschleunigung und f die Bremsverzögerung, t_A die Wartezeiten auf der Strecke bedeuten (es wurde angenommen, daß die längere Reisezeit durch ein volles Anhalten in jedem Haltestelleninterval verursacht wird).

Durch die Überschreitung dieser Grenze wird von Forint auf Zeit umgerechnet die Reisezeit gleichwertartig verlängert.

zu 3. Bei der Planung des Fahrgastflusses ist die optimale Wegstrecke die Wegstrecke mit der kürzesten Gesamtzeit, im Gegensatz zum kritischen Weg, wo die maximale Zeitdauer der aufeinander folgenden Tätigkeiten als maßgebend betrachtet wird. Die optimale Wegstrecke läßt sich mit Hilfe der netzwerktechnischen Verfahren von MOORE, DIJKSTRA oder HASSE (Matrix) aussuchen. Von deren Erläuterung wird hier wegen des großen Umfangs abgesehen, doch sind sie in den im Literaturverzeichnis angegebenen Abhandlungen von KÖRÖNDI [13] und RICHTER [14] genau beschrieben.

Wie bei der Ermittlung des kritischen Weges nach der CPM die Zeit der Tätigkeiten deterministisch als konstant, und nach der PERT Methode in Beta-Verteilung als stochastisch angenommen und die Streckenzeit mit

$$t = \frac{a + 4m + b}{6}$$

berechnet wird, kommt auch bei der Auswahl des optimalen Weges die Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Geltung, wenn daran erinnert wird, daß die Reisezeiten auch zwischen zwei Haltestellen *normal* verteilt sind, wobei in Anbetracht der Symmetrie der Verteilung ihr voraussichtlicher Wert gleich dem Durchschnitt ist.

zu 4—5. Nach Dresdener Erfahrungen sind die Fahrgäste um die optimale Wegstrecke normal verteilt. Wir wollen hier die Anwendung des Kirchhoffschen Analogiemodells zeigen, das darauf beruht, daß die Abzweigstromstärken den Widerständen umgekehrt verhältnisgleich sind. Zur Dämpfung der Streung müssen wir jedoch die Widerstände zu Potenzexponenten zwischen 6 und 10 heben, da nach unseren Erfahrungen niedrigere Exponenten nicht richtig sind (in Warschau z. B. 5); ferner scheint es, daß es sich wegen des niedrigen Fahrgastanteils nicht lohnt, mehr als 3 Alternativen zu berücksichtigen (Abb. 4).

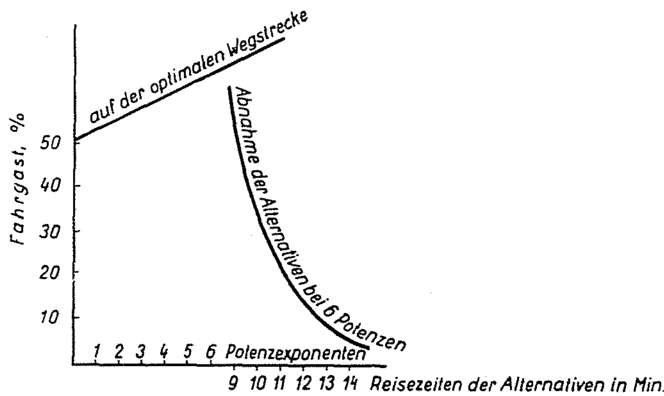

Abb. 4. Zahl und Potenzexponenten der Alternativen für die optimale Wegstrecke

Der Einfluß der obigen Feststellungen über die Potenzexponenten und die Alternativenzahl, sowie der in Punkt 2/a erwähnten aufwendungsverändernden Faktoren soll an einem Beispiel gezeigt werden. In der Annahme von 10 000 von Punkt 4 abfahrenden Fahrgästen ist nicht nur die Änderung der Verhältnisse zu sehen, in einzelnen Fällen verschiebt sich, verändert sich auch die optimale Wegstrecke. Aufgrund der in Abb. 5 eingetragenen Reisezeiten ist die optimale Wegstrecke ursprünglich 4 — 3 — 5 — 2, bei einer Mindestreisezeit von 9 Minuten.

Tabelle 7

Reisezeiten und optimale Wegstrecken in Abhängigkeit von den Umständen

Wegstrecke	Min.	Fahrgastzahl	Wegen Umsteigen	Aus psych. Gründen	3 → 1 = 5 Min.	Schranke
4—3—5—2	9	*4760*	1460	*3880*	*5960*	*4000*
4—3—2	12	840	2400	680	1050	1020
4—3—1—2	10	2530	960	2060	640	3100
4—1—2	11	1440	*4140*	2600	1810	1760
4—1—3—2	17	100	80	290	120	120
4—1—3—5—2	14	330	960	490	420	—

Nach dem ursprünglichen Ausgang wurde in Punkt 3 eine reine Kreuzung angenommen (wodurch dort in abbiegender Richtung Umsteigen erforderlich wird); sodann wurde wieder aus der ursprünglichen Annahme ausgehend zufolge der Anziehungskraft des Streckenabschnittes 1—4 ein die Zeit vermindernder Multiplikator 0,8 vorausgesetzt; ferner, daß die Reisezeit von 2 Minuten auf der Strecke 1—3 in entgegengesetzter Richtung nicht die gleiche ist, sondern wegen Stauungen 5 Minuten beträgt; schließlich, daß die Leistungsfähigkeitsschranke des Abschnitts 3—5 bei 4000 Fahrgästen liegt (Abb. 5).

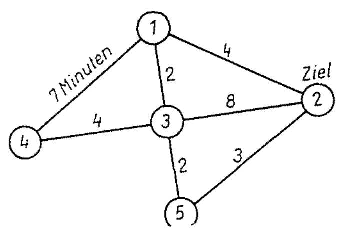

Abb. 5. Beispiel zu Abschnitt 52

zu 6. Die obenangeführte Anwendung des Kirchhoffschen Modells soll an einem einfachen Beispiel gezeigt werden. a) *Die entlastende Wirkung von (Teil-) Kreisringlinien*, wie die Straßenbahnlinie 13 Pesterzsébet-Kerepesi-Straße, ist allgemein bekannt. 98% der Fahrgäste zwischen Pesterzsébet und Kőbánya (zusammen mit den von Csepel kommenden) werden durch diese Linie erfaßt. Es unterliegt keinem Zweifel, daß die Anziehungskraft einer Ringlinie mit zunehmendem Mittelpunktswinkel, also mit wachsender befahrener Bogenlänge abnimmt; in der Annahme von durchschnittlichen Daten und nach Differenzierung liegt der Grenzwert des Mittelpunktwinkels zwischen 85 und 104°. Darum nimmt nur ein geringerer Teil der Fahrgäste zwischen Pesterzsébet und Zugló die Linie 13, wobei sich auch die Wirkung des (aus anderen Gründen gerechtfertigten) Umsteigens bei der Kerepesi-Straße verschärfend geltend macht. So werden jetzt 46,1% des betreffenden Stromes durch diese Linie befördert, wenn man jedoch nicht umsteigen müßte, so würde dieser Anteil 55% betragen.

$$\frac{\left(\frac{1}{21}\right)^6}{\left(\frac{1}{21}\right)^6+\left(\frac{1}{41}\right)^6+\left(\frac{1}{47}\right)^6}=\frac{1170}{1196}=98\,\%$$

Hier beträgt auf Linie 13 die Fahrzeit 21 Minuten und 41 bzw. 47 Minuten auf den Umgehungslinien.

$$\frac{\left(\frac{1}{45}\right)^6}{\left(\frac{1}{45}\right)^6+\left(\frac{1}{49}\right)^6+\left(\frac{1}{51}\right)^6}=\frac{0012}{0026}=46.1\ \%$$

$$\frac{\left(\frac{1}{45-4}\right)^6}{\left(\frac{1}{41}\right)^6+\left(\frac{1}{49}\right)^6+\left(\frac{1}{54}\right)^6}=55\ \%$$

b) Bei einer *Ausweitung der Verkehrsspitzen* ist die Ermittlung der optimalen Wegstrecke unerläßlich, damit die Folgen, die aus einer Veränderung der Wechselstunden der Arbeitsschichten auf den Radiallinien auch auf den Verbindungslinien entstehen, in Erwägung gezogen werden, um dort nicht eine Verschlimmerung der Lage herbeizuführen. Nehmen wir z. B. die Strecke der Obuslinie 75 auf dem Hungária-Ring und beziehen wir das Beispiel auf 100 Fahrgäste — doch auf die tatsächliche Reisezeit —, was eigentlich Prozente bedeutet, und sich auf eine beliebige Fahrgastzahl in den Spitzenstunden anwenden läßt.

Gesetzt es fahren z. B. vom Ujpester Brückenkopf zwischen 6 Uhr 5 Min. und 6 Uhr 20 Min. 100 Fahrgäste je Minute nach dem Zalka-Máté-Platz ab, und vom Bosnyák-Platz ebenfalls 100 Fahrgäste je Minute zum Volkspark, jedoch zwischen 6 Uhr 15 Min. und 6 Uhr 30 Min. Es läßt sich nach der Mooreschen Methode entscheiden — doch berechneten wir es auch —, daß 98% der ersteren und 87% der letzteren die Obuslinie 75 nehmen. Aus Ujpest kommend passieren 98 Fahrgäste je Minuten z. B. die Kreuzung der Kerepesi-Straße zwischen 6 Uhr 43 Min. und 6 Uhr 58 Min., die von Zugló kommenden Fahrgäste zwischen 6 Uhr 28 Min. und 6 Uhr 43 Min. Wenn nun z. B. auf ein Ansuchen von Kőbánya für die von Ujpest kommenden der Arbeitsbeginn auf eine um eine Viertelstunde spätere Zeit verlegt würde, würden sich die beiden Fahrgastströme gerade treffen, und statt höchstens 98 Fahrgästen würden sich 185 pro Minute einstellen.

53. *Wirksamkeitsentscheidung zwischen den Verkehrszweigen*

a) Bei der Simulierung von strategischen Spielen stehen zwei vernünftige und bedachtsame Partner einander gegenüber, von denen jeder die Möglichkeiten des anderen mit sämtlichen Folgen kennt, doch nicht weiß, wie der andere seine Möglichkeiten ausnutzen wird. Die Wahrscheinlichkeit besteht gerade im Verhalten, wie er die optimal zweckmäßigste und wirtschaftlichste Lösung wählen wird.

In Punkt 5 der Prozeßplanung werden abschnittsweise Fahrgastzahlen bestimmt, die für das einzusetzende Fahrzeug sowohl hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit als auch der Leistungsfähigkeit vor allem maßgebend sind. Soll versucht werden, die Einflußfaktoren der Wirksamkeit der Verkehrszweige im Stadtverkehr zahlenmäßig zu kennzeichnen, so kann man für diese eine *Wirksamkeitsmatrix* aufstellen und sich bei den Entscheidungsproblemen spieltheoretischer Modelle bedienen [13]. In der vertikalen Kooperation des städtischen Massenverkehrs — die man als gemeinsames »Grundnetz« zu bezeichnen pflegt — muß die Entscheidung über die auf den einzelnen Strecken einzusetzenden Verkehrsträger vor allem unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeits- und Leistungsfähigkeitsgrenzen, doch auch aus der Sicht der Geschwindigkeit, Attraktivität (Bequemlichkeit usw.) getroffen werden, wobei im Falle eines intensiven Fahrgastverkehrs vor allem eine schienengebundene Verkehrsart zu wählen ist. In den Zeilen der Matrix sind die einzelnen Verkehrszweige, in den Spalten $H_1 - H_4$ die zahlenmäßigen Werte der die Wirksamkeit beeinflußenden Faktoren einzutragen; unter letzteren sind leider bei jeder Fahrzeugart den übrigen gegenüber ungünstigere bzw. auch günstigere Werte zu verzeichnen. Eine vereinfachte Form der Matrix in der üblichen Reihenfolge ist wie folgt:

Tabelle 8

	H_1	H_2	H_3	H_4	Min.
Schnellbahn	8	1	10	2	1
Straßenbahn	5	2	8	7	2
Obus	2	3	4	5	2
Omnibus	3	5	3	4	3

Würde das Maximum der pessimistisch ausgewählten Minima angestrebt, so fällt hier die Wahl auf den Omnibus. Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens dieser Faktoren kann auch gewogen werden, und bei gleicher Wahrscheinlichkeit ($p_i = 1/4$) des Eintritts wird der Rentabilitätswert für den Obus am günstigsten ausfallen:

$$2\frac{1}{4} + 3\frac{1}{4} + 4\frac{1}{4} + 5\frac{1}{4} = 14/4\,.$$

Nach KREKÓ [16] kann die Linearprogrammierung als ein spezifisches Spiel betrachtet werden, und ein Zweipersonenspiel mit der Summe Null ist der Lösung einer entsprechenden Linearprogrammierungsaufgabe gleichwertig [16]. Deshalb soll hier auf die Lösung von Allokationsmodellen mit Hilfe der linearen Programmierung eingegangen werden.

b) Die Wagenschuppen, aus denen zu den Endhaltestellen der eingeplanten Linien Wagen zugestellt werden, sollen — unter zusätzlicher Berücksichtigung der Fahrzeugtypisierung — so gewählt werden, daß sich ein Minimum der summierten Leerläufe ergibt. Durch diese Maßnahme wird bereits eine Einsparung an Dienstzeit erzielt, was von großer Bedeutung ist, doch auf ähnliche Weise läßt sich auch das Problem lösen, wie der Betriebshof mit dem geringsten Aufwand an Zeit und Mühe erreicht wird!

In der bekannten Matrix der Linearprogrammierung sind z. B. die Schwerpunkt-Km-Entfernungen, in den Zeilen die Personenzahlen der in den einzelnen Wohnbezirken wohnhaften Belegschaftsmitglieder, in den Spalten die durch die Verkehrshöfe geäußerten Ansprüche einzutragen [17].

Tabelle 9

Abgangsprogramm nach der Vogel—Korda-Methode

					Person
5	3	2	6	1	150
1	5	5	7	2	200
4	2	10	9	3	400
7	3	8	2	5	250
Person:					
180	110	160	300	250	1000

					Person
5	3	2^{150}	6	1	150
1^{180}	5	5^{10}	7^{10}	2	200
4	2^{110}	10	9^{40}	3^{250}	400
7	3	8	2^{250}	5	250
180	110	160	300	250	1000

und der gesamte Dienstweg ergibt sich zu:

$$2 \cdot 150 + 1 \cdot 180 + 5 \cdot 10 + 7 \cdot 10 + 2 \cdot 110 + 9 \cdot 40 + 3 \cdot 250 + 2 \cdot 250 = 2430 \text{ km/Tag}$$

Die wirkliche *Allokationfrage* ist das Umgekehrte dieses Gedankenganges: Wie sollen bei neuen Verkehrsplanungen für eine weitere Herabsetzung des vorigen Minimums die Standorte der Wagenschuppen gewählt werden?

Besonders in der Güterbeförderung nach einer großen Anzahl von Bestimmungsorten wird ferner das Rundreiseprobelm (das Modell des Geschäftsreisenden) verwendet, aus dem das »Einsatzverbindungsmodell« entwickelt wird. Diese sind jedoch — obwohl sie zum selben Bereich gehören — ***keine spezifischen Probleme des liniengebundenen städtischen Massenverkehrs.***

Literatur

1. Szabó, D.: Városi tömegközlekedés menetirányítása (Fahrdienstleitung im städtischen Massenverkehr). Közlekedéstud. Egyesület, Budapest, 1960.
2. Kádas, K.—Juba, J.—Magyar, I.: Matematikai módszerek a tömegközlekedési forgalom meghatározásához és előrebecsléséhez (Mathematische Methoden zu Verkehrsanalysen und Prognosen im Massenverkehr). ÉKME, Budapest, 1964.
3. Kádas, K.: Statisztika (Statistik) II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1966.
4. Turányi, I.: A modern forgalomirányítás módszerei (Methoden der zeitgemäßen Verkehrsregelung). Közlekedéstudományi Egyesület, Budapest, 1964.
5. Köves, P.—Párniczky, G.: Általános statisztika (Allgemeine Statistik). Tankönyvkiadó, Budapest, 1964.
6. Kindler, J.: Matematikai statisztika (Mathematische Statistik). Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.

7. CSIKI, K. (Herausg.): Gépjárműközlekedési üzemgazdaságtan (Betriebswirtschaftslehre des Kraftverkehrs). Műszaki Könyvkiadó, 1966.
8. GILICZE, E.—PÁLMAI, G.: Közlekedéstudományi Szemle, **17**, 212//1967).
9. VINCZE, Cs.—SZEGEDI, L.—VARGA, Z.: Rövid és hosszú autóbuszviszonylatok alkalmazásának gazdasági, üzemi és műszaki kérdései (Ökonomische, Betriebs- und technische Fragen des Einsatzes von kurzen und langen Omnibuslinien). Diplomarbeit an der Technischen Universität für Bau- und Verkehrswesen Budapest, 1965.
10. FAZEKAS, F.: Operációkutatás (Operationsforschung) II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1966.
11. GYULAI, G.: Közlekedéstudományi Szemle **14**, 547 (1964).
12 BÉNYEI, A.: Számítógépek alkalmazása a városi úthálózat tervezésében (Einsatz von Rechenanlagen bei der Planung von Stadtstraßennetzen). Közlekedéstudományi Egyesület, Budapest, 1967.
13. KÖRÖNDI, G.: Közlekedéstudományi Szemle **16**, 129 (1966).
14. RICHTER, R.: Kapacitás-korlátozás nélküli optimális irányítási vonalak számítása (Berechnung optimaler Richtungslinien ohne Leistungsfähigkeitsbeschränkung). Közlekedéstudományi Egyesület, Budapest, 1964.
15. GYULAI, G.—PÁLMAI, G.—GILICZE, E.—TARNAI, J.: Operációkutatás a városi közlekedésben (Operationsforschung im Stadtverkehr). Forschungsthema TU Budapest. Budapest, 1967.
16. KREKO, B.: Lineáris programozás (Lineare Programmierung). Közgazdasági Kiadó, Budapest, 1966.
17. JÁNDY, G.: Szállítási és telepítési operációkutatás (Operationsforschung im Transportwesen und in der Standortwahl. Műszaki Könyvkiadó. Budapest. 1966.

Zusammenfassung

Im Vergleich zur Intensivierung des Urbanisationsvorganges wird die für den Verkehr zur Verfügung stehende Fläche verhältnismäßig immer enger. Zahlreiche Komponenten des Stadtverkehrs lassen sich durch genaue Formeln nicht erfassen, doch werden durch die in den gesättigten Straßen verkehrenden Einzelverkehrsteilnehmer die Kriterien der Massenhaftigkeit und der Zufallsbestimmtheit erfüllt. Daher wurden die stochastischen Modelle der mathematischen Statistik und der Operationsforschung darauf untersucht, wo, wie und welche Methoden für die einzelnen Elemente des Stadtverkehrsprozesses verwendet werden könnten. Es wurde ermittelt, wie hoch die Umlaufzeit stochastisch zu bemessen ist, und welche Reserven erforderlich sind. Durch eine den einzelnen Schritten der Prozeßplanung entsprechende Anwendung der Analogiemodelle der Netzwerktechnik und der Kapitel der Allokations- und Spieltheorie wurde die Berechnung der Linienleistungsfähigkeit als Mittel der Linienpolitik gezeigt.

Géza GYULAI, Budapest, IX. Kinizsi u. 1, Ungarn