

ENTWICKLUNGSTENDENZEN DER MODELLE DES VERKEHRSFLUSSES UND DEREN LÖSUNG

Von

I. TURÁNYI

Institut für Verkehrstechnik und Organisation, Technische Universität, Budapest

Eingegangen am 17. März, 1976

Feststellungen zur Anleitung

Die Aufgabe des Ingenieurs — und das gilt auch für den Verkehrsingenieur — besteht in der Schaffung von für den optimalen Ablauf komplexer Prozeßsysteme geeigneten Mensch—Anlage—Maschine Systemen sowie in deren Untersuchung, Entwicklung, Instandhaltung, Steuerung und Wartung. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, soll der Verkehrsingenieur die Bewegungen einzelner Personen, Fahrzeuge, die Verkehrserscheinungen und -Prozesse, Strömungen, deren innere und äußere Parameter, die Gesetzmäßigkeiten und deren Veränderungsmöglichkeiten kennen.

Diese Kenntnisse des Verkehrsingenieurs, die sich unter dem Namen Verkehrsströmungslehre zusammenfassen lassen, wachsen im wesentlichen parallel zur Entwicklung der Wissenschaft, der Technik, dem Wesen und der Gesellschaft und sind in vielen Zügen den für andere technische Fachgebiete grundlegenden Strömungslehren oder den deren Verallgemeinerung anstrebenden Transport- und Ähnlichkeitstheorien ähnlich [25].

Die Strömungslehre des Verkehrs zudem auch der spezifische Fußgängerverkehr gehört, des Transports, der Förderung befaßt sich — *makroskopisch* betrachtet — mit der Bewegung der Ströme zwischen Knotenpunkten und mit den sich dabei ergebenden Erscheinungen und Prozessen der Verminderung, Anhäufung, Zusammensetzung und Entstehung, Bildung und Auflösung von Gruppen und Kolonnen und hauptsächlich mit den Diffusions- (Ineinanderströmen, Ausscheiden, Verflechtung, Kreuzen), Anschwellungs- und Speicherungsereignisse und Prozessen der sich in den weitgehend bestimmten Knotenpunkten treffenden Strömungen.

Der makroskopische Aspekt setzt die Verteilung der Geschwindigkeiten, Folgezeiten und Folgeentfernungen als bekannt vor und rechnet mit Durchschnittswerten. Diese im wesentlichen der Strömungslehre entnommene Methode eignet sich vor allem für die Ausgestaltung einer Betrachtungsweise, da sie weniger ausführlich ist.

Das selbe Problem kann *mikroskopisch* als Änderung der Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung einzelner Personen oder Fahrzeuge innerhalb des

Systems, als Nacheinanderfolge der Prozesse Überholen, Überqueren, Wechseln der Fahrspur (des Gleises), Ausscheiden, Einfahren und Steuern, als diskrete Erscheinung oder Prozeßmenge näher, ausführlicher, detaillierter betrachtet werden.

Beide Aspekte stoßen auf solche Probleme, wie z. B.:

Erscheinungen und Prozesse »unendlich« langer Bahn- und Straßenabschnitte:

- mit einer in einer Richtung befahrbaren Spur (»geradlinige« Bewegung),
- mit zwei in beiden Richtungen befahrbaren Spuren (Überholen).
- mit mehreren in einer Richtung befahrbaren Spuren (Überholen. Wechseln von Spuren),
- mit drei Spuren (Überholen).

Erscheinungen, Prozesse in Kreuzungen (reine Kreuzung und mit Vorfahrtsrecht)

- mit »rechts vor links« Regel (gleichrangig)
- mit »Stop«-Linie (über- oder untergeordnet)
- mit Signalregelung

Erscheinungen und Prozesse auf Fahrbahnen und in Netzen (Flächen) mit aufeinander abgestimmten Signalanlagen.

Sowohl die Verkehrswissenschaft als auch die Strömungslehre haben sich bei der Lösungen ihrer Probleme — von der Empirie ausgehend [11] — auf dem Wege des Aufstellens von Modellen und von deren Lösungsmethoden entwickelt.

Das Entwicklungstempo hing in großem Maße von Qualität und Anwendbarkeit (Lösbarkeit) der mathematischen Mittel der Modelle und von der Genauigkeit ab, mit der diese die Parameter der Strömungen erfassen und wie sie sich für die verkehrstechnische Planung eignen.

Neben dem Erfassen und Lösen der Modelle sollten notwendigerweise auch die Meß- und Beobachtungsmethoden laufend entwickelt werden. Da sich der Verkehr als in Raum und Zeit verlaufender Prozeß auf der Zeitebene besser erfassen ließ, entwickelten sich in erster Linie die diesbezüglichen Methoden. Im letzten Jahrzehnt haben sich jedoch die den räumlichen Zustand erfassenden bzw. die den räumlichen und zeitlichen Ablauf gleichermaßen registrierenden und analysierenden — neuerdings immer mehr mechanisierten und automatisierten — kybernetischen Methode durchgesetzt.

Die deterministischen Modelle

Vor 100 bis 150 Jahren, als die technischen Wissenschaften durch die Schaffung und verbale Formulierung von Begriffen und Zusammenhängen und von aus der Erfahrung abgeleiteten Modellen gekennzeichnet waren, fußten die Verkehrswissenschaft und Ingenieur Tätigkeit fast ausschließlich auf der Empirie, der Erfahrung. Diese Periode wurde aber den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung der Wissenschaften entsprechend, jedoch die bisherigen Erfahrungen in Ehren haltend — durch eine andere abgelöst, als man versuchte, den Inhalt und das Verhältnis der Parameter nach symbolischen, analytischen, mathematischen Methoden darzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen, spielt die Mathematik eine für wachsende Rolle.

Da für die Dimensionierung von Bahnquerschnitten gewisse Randbedingungen maßgebend waren und sich sowohl das mathematische Modellieren als auch die Lösungen auf dem Gebiet der technischen Wissenschaften im Anfangsstadium befanden, wurden die ersten Optimierungsmodelle in einem Aspekt aufgebaut, der mehr auf die Fahrbahn, als auf das Fahrzeug, den Verkehr abgerichtet war, da man durch weitgehende Abstraktion, gleichzeitig durch Vereinfachung näher zum statischen als zum Strömungszustand gelangte.

Dieser Einstellung entsprach auf dem Gebiet des Verkehrs z. B. die sogenannte Leistungsfunktion [4]

$$N = \frac{T}{t}$$

wobei N — die Anzahl der einen Bahnquerschnitt während der Zeit T passierenden Fahrzeuge, Züge, Personen

t — die Zeitdauer zwischen den Durchgängen zweier sich bewegend der Einheiten

bedeuten.

Da die Parameter dieser Funktion sich auf Zeitbasis aufbauen, waren sie leichter zu erfassen und zu messen. Beobachtung und Messung der die Räumlichkeit kennzeichnenden Parameter stellen auch heute noch ein kompliziertes doch schon gelöstes Problem dar.

Die Formel konnte bei verhältnismäßig langen Bahnabschnitten mit idealen Gegebenheiten zu einer Funktion mit zwei Variablen vereinfacht werden, sie konnte sogar — mit Hilfe weiterer Vereinfachungsbedingungen in Extremlagen — zu einer quadratischen Funktion mit einer Variablen reduziert werden, deren für die Dimensionierung des Bahnquerschnitts maßgebender, die Auslastung der Fahrzeuge (das Dienstleistungsniveau) vollkommen außer acht lassender Extremwert (die Leistungsfähigkeit) nach den Regeln der Analyse unmittelbar errechnet werden konnte [10].

Das Modell war stark vereinfacht und von deterministischem Charakter. Bei der Anwendung wurden vollkommen homogene Fahrbahn- und Fahrzeugverhältnisse sowie Fahrer mit gleichen Fachkenntnissen und psychisch-psychologischem Charakter vorausgesetzt. Der Mensch wurde durch einige deterministische Zahlenwerte ersetzt. Aus der Sicht der Strömungslehre wurden die Fußgänger- und Fahrzeugströme gleicherweise als gesättigte, stationäre, homogene Strömungen betrachtet. Es ist zu bemerken, daß dieser Zustand den Stufen D und E, in Extremstellung der Stufe F des in neuerer Zeit gebräuchlichen »Dienstleistungsniveaus« nahesteht [24].

Die Änderung der einseitig bahnzentrischen Einstellung begann infolge des massenhaften Einsatzes von Fahrzeugen mit immer größeren Geschwindigkeiten.

Die auf der vollkommenen Auslastung der („freien“) Geschwindigkeiten der sich auf gleicher Fahrbahn bewegendenden Fahrzeuge basierenden Modelle wichen aber von der Realität (den Möglichkeiten) mehr als die fahrbahnzentrischen ab. Der Zustand, in dem bei regem Verkehr Fahrzeuge mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten einander im Verkehr nicht stören, wurde immer mehr in die Welt der Ideen verdrängt. Die Bedeutung dieses Modells besteht jedoch darin, daß es die Aufmerksamkeit auf die Notwendigkeit von Kompromissen lenkte und geeignet war, die Anzahl der »erforderlichen«, gewünschten Überholungen als Bezugsbasis zu bestimmen. Vergleicht man diese Zahl mit den auf einem beliebigen Bahnabschnitt wirklich durchgeführten (möglichen) Überholungen, so kann auf die Auslastung des Abschnitts und das Dienstleistungsniveau geschlossen werden.

Von den moderneren, schon auf den Bewegungs-, Strömungs-, Verkehrserscheinungen gegründeten Varianten dieser Betrachtungsweise sei hier die Kontinuitätstheorie erwähnt, deren Grundgleichung wie folgt lautet:

$$\frac{\partial \kappa(\xi, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \tau(\xi, \tau)}{\partial \xi} = 0$$

wobei κ — die Konzentration (deren Annäherungswert die Dichte ist)
 ι — die Intensität (deren Annäherungswert die Strömungsgröße ist)
 ξ — den Raum
 τ — die Zeitkoordinate
 bedeuten.

Die Kontinuitätstheorie ist makroskopischer Einstellung und versuchte die modernen Flüssigkeitsströmungsanalogien an die Verkehrsflüsse anzupassen. Neben zahlreichen Ähnlichkeiten sind aber auch die Abweichungen sehr groß.

Es genügt die Elemente der Flüssigkeitsströmung und deren Beziehun-

gen und gleichzeitig das spezifische, aus diskreten Elementen zusammengesetzte Wesen der Verkehrsströme zu erwähnen, oder z. B. den Umstand, daß während bei der Flüssigkeitsströmung bei wachsendem Volumen auch die Geschwindigkeit zunimmt — ohne die Änderung des Flußbettes zu berücksichtigen — beim Verkehrsstrom bald ein Zustand auftritt, in dem sich die Strömungsgeschwindigkeit bei zunehmendem Volumen vermindert.

Andere Wissenschaftler haben wiederum — auch in der makroskopischen Betrachtungsweise — die Gesetzmäßigkeiten der kinematischen Gastheorie auf die Verkehrsströmungslehre anzupassen versucht [13]. Dadurch gelang es, gewisse in Verkehrsströmen erfaßbare longitudinale »Schwingungen« und die auf diesen basierenden Quasiinterferenzerscheinungen zu erklären. Diese Theorie nähert die Wirklichkeit am besten auf Stufe C des Dienstleistungsniveaus (Kapazitätsausnutzung) an [24].

Im Falle dieser herausgegriffenen Modelle sind im allgemeinen deswegen Schwierigkeiten — besonders auf dem Gebiet der Anwendung — aufgetreten, weil bei übermäßiger Betonung der Ähnlichkeiten die Abweichungen nur wenig beachtet wurden.

Die symbolischen Modelle bezogen sich — aufgrund mehr oder weniger willkürlich gewählter Annahmen und Analogien — in erster Linie auf sich in gleicher Richtung auf langer ein- oder mehrspuriger Bahn ohne Anschlüsse und Abzweigungen (im allgemeinen ohne Knotenpunkte) fortbewegende Strömungen. Man versuchte jedoch auch die Strömungsverhältnisse bei entgegengesetzter Richtung auf zwei oder sogar drei Spuren anzunähern. Die meisten Modelle bezogen sich auf »ideale« Bahnverhältnisse, doch wurden sie nicht selten erweitert, um z. B. »Sichtweite«, schlechte Sichtverhältnisse — als Umwelteinwirkungen — auch zu berücksichtigen (insbesondere Untersuchungen in Schweden und auch in England).

Um die durch zahlreiche Faktoren beeinflussten, komplexen Verkehrsströmungen zu beschreiben, wurden mehrere deterministische mathematische Modelle eingeführt, doch ist es nicht gelungen, allgemeingültige Modelle zu formulieren und wird auch kaum je gelingen.

Die analytisch-deterministischen mathematischen Modelle

— sind geeignet und auch erforderlich für die Formulierung der (makroskopischen) Betrachtungsweise und für die Erfassung der Elemente, Teilsysteme der abgegrenzten Teilprobleme,

- sie erfordern verhältnismäßig wenige Daten,
- beanspruchen wenige Maschinenzeit,
- ergeben unmittelbar die optimale Lösung,
- erfordern keine Simulation.

Ihr Vorteil besteht also in Schnelligkeit und Wirtschaftlichkeit.

Sie haben jedoch den Nachteil, daß sie

- für spezielle (Einzel-) Verkehrsnetze nicht anwendbar sind,

- bei der numerischen Bearbeitung konkreter Probleme die Ergebnisse im allgemeinen nicht mit hinreichender Genauigkeit liefern,
- mehr oder weniger vollständige Klärung der theoretischen Grundlagen und der breiter definierten Kausalbeziehungen erfordern bzw. die Wiedergabe nur soweit richtig ist, wie sie geklärt sind und dies im Modell zum Ausdruck kommt [38].

Die Bedeutung der deterministischen Modelle ist am meisten bei der Dimensionierung von Bahnbauten für Spitzenverkehr erhalten geblieben. Erfahrungen beweisen, daß die Kapazität der Bahnanlagen in Spitzenperioden der rasch wachsenden Motorisierung kaum folgen kann. Die Erhöhung des Auslastungsfaktors der Bahnkapazität ist also ein Problem größter Wichtigkeit.

Das Bestreben, große Fahrzeugmengen wirtschaftlich, schnell, bei gleichzeitiger guter Auslastung der geringen Bahnkapazitäten zu befördern, weist immer öfter auf Lösungen hin, die zum dichteren, geschlosseneren, die Subjektivität des Fahrers ausschaltenden Verkehr führen. Um dies zu erreichen, schlägt — falls keine andere Lösung vorliegt — die Bewegung in zwei Dimensionen in eine Dimension um. Beispiele dafür sind:

- Verlegen von Straßenfahrzeugen von der Straße auf die Schiene (sogar bis zum »Kabinentaxi«),
- Idee des Verkehrs mit gekoppelten Fahrzeugen,
- Eisenbahntransport von Straßenfahrzeugen (z. B. im La-Manche-Tunnel).

All dies bedeutet aber auch (in gewissen Perioden und auf gewissen Verkehrsstrecken ein Aufgeben der Illusion der Ungebundenheit, was Verzicht und Opfer im Interesse der Gemeinschaft verlangt, wobei das Optimum zu finden und anzuwenden ist, das dem jeweiligen Entwicklungsstand entspricht.

Stochastische Modelle

Mit der Zeit erfolgte auf dem Gebiet der Mathematik, insbesondere in der Wahrscheinlichkeitstheorie und der mathematischen Statistik, eine große Entwicklung. Auch die Betrachtungsweise änderte sich. Die Erscheinungen und Prozesse der Umwelt als stochastische zu definieren, wurde immer allgemeiner.

Da die Erschöpfung der Leistungsfähigkeit der Straßen, Problematik der Dimensionierung neuer Kapazitäten zuerst in Nordamerika auftraten, begegnete man auch hier zuerst dem Problem des Modellierens aufgrund einer neuen Betrachtungsweise.

Die Begründung der neuen Theorie ist mit dem Namen von WARDROP verbunden, der nach etwa 20 Jahren der Teil- [1] und ergänzenden Arbeit in

seinem 1952 veröffentlichten, umfassenden Werk [2] die Verkehrsströme auf grund der Wahrscheinlichkeitsrechnung behandelte und sie nach ADAMS (1936 !) durch die *Poisson-Verteilung** kennzeichnete, was offenbar nur bei einer Strömung geringer Dichte (Dienstleistungsniveaus A und B) möglich ist. Nun folgte auf die von WARDROP gegründete Theorie eine große Entwicklung und zahlreiche neue Tendenzen wuchsen daraus hervor [13].

Nachstehend möchte ich nur einige Ergebnisse dieser Entwicklung behandeln.

Die Modelle von MILLER [7] und RÉNYI [17] beziehen sich auf mehrspurige Einbahnstraßen und erstrecken sich auch auf die Bestimmung der Anzahl der möglichen und erwünschten (erforderlichen) Überholungen. Es wird eine bessere Annäherung der Realität angestrebt, von der jedoch diese Modelle sehr weit liegen.

Die *Folgetheorie von Fahrzeugen*, die sich auf mikroskopische Grundlage stützt, erschließt die auch in der Nähe des Sättigungszustandes noch vorliegenden Reserven.

Die *Überholungstheorie* genannte Tendenz ermöglichte die maximale Ausnutzung der Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge. Diese Theorie versuchte schon die Anwendung der *Warteschlangenmodelle* auszunutzen, sie lieferte sogar mit Hilfe des Warteschlangenmodells ein in erster Linie gedänkliches Modell, das die sich nach den Aufhalten statischen Charakters bei der Weiterfahrt ergebenden dynamischen Überholungsereignisse widerspiegelt.

In diesem Problemenkreis kann als allgemeiner Fall die unendlich lange, kreuzungsfreie, zweispurige Zweirichtungsbahn betrachtet werden. Das Gebiet des diesbezüglichen, auf Messungen und Beobachtungen gegründeten, stochastischen Modellierens wurde am weitgehendsten von dem schwedischen Forscher S. ERLANDER [12] erschlossen, der sich hauptsächlich mit dem Überholen befaßte. Es ist offenbar, daß die Strömungserscheinungen auf *nichtgeteilter* Fahrbahn komplizierter als auf geteilter sind, doch ist diese Lösung sowohl im Straßen- als auch im Eisenbahnverkehr üblich. Es ist aber Tatsache, daß wegen der Kompliziertheit mit verhältnismäßig großen Vereinfachungsbedingungen operiert werden muß. Erlander setzte voraus, daß

- soweit kein Überholen vorliegt, jedes Fahrzeug mit der gewünschten Geschwindigkeit fährt,
- gute Sichtverhältnisse gegeben sind (diese haben auf die Überholungsmöglichkeiten großen Einfluß),
- die »gewünschten« Geschwindigkeiten und die Dichte bekannt sind,
- die Strömungsparameter die Strecke entlang und in der Zeit konstant sind.

* Um einen Verkehrsprozeß als *Poisson-Prozeß* betrachten zu können, ist es erforderlich, daß die Folgezeitintervalle der Fahrzeuge eine negative exponentiale Verteilung aufweisen ($t_k = e^-$). Der *Poisson-Prozeß* ist im wesentlichen ein ungestörter Prozeß.

Auf dieser Grundlage erhielt Erlander eine nichtlineare Integralgleichung, wobei das Problem in der analytischen Auflösung der stochastischen Gleichung besteht. Erlander führt auch den Lösungsweg vor. Das Modell eignet sich auch für die Darstellung der Strömungsverhältnisse auf einer Dreispurbahn mit nicht getrennten Spuren.

Alle diese Theorien setzten im Extremzustand (sowohl im Raum als auch in der Zeit) einen stationären Zustand vor, was zur Folge hatte, daß sie nur für lange, kreuzungsfreie Abschnitte eine treue Nachbildung der Realität lieferten.

Die *stochastischen Modelle* haben den Vorteil, daß sie dem Verkehr als *diskrete und zufällige* Massenerscheinung von Anfang an näher liegen [34]. Setzt man sich aber die genauere Annäherung der Realität als Ziel und begnügt man sich nicht um dies zu erreichen z. B. mit dem Poisson-Modell, so stößt man auch hier auf schwierige mathematische Probleme. Der Umstand, daß bei genauer Untersuchung komplizierter, aus der Sicht des Ingenieurs wichtiger Erscheinungen die Unabhängigkeit der Ereignisse nicht immer vorausgesetzt werden darf, was für die Anwendung zahlreicher Modelle der Wahrscheinlichkeitsrechnung Grundbedingung ist, führt zu schwierigen Problem. Oft kann die Verteilung gewisser Wahrscheinlichkeitsvarianten nur grob oder gar nicht durch gut anwendbare Verteilungstypen angenähert werden, usw.

Eine wichtige Auswirkung der Forschungen war, daß die Beobachtungen vom Querschnitt (lokale Betrachtungsweise) auf die Strecke (momentane Betrachtungsweise) gelenkt wurden. Die Berechnungen unter Berücksichtigung der *Dichte* wurden allgemein, wodurch die Modellierung genauer und anschaulicher wurde. Der Begriff der *Leistung* wurde dynamisch betrachtet (in Fahrzeugkilometer/Zeit gemessen), wodurch das Interesse auf die Notwendigkeit eines Kompromisses zwischen Auslastung von Objekten und Fahrzeugen (optimale Lösungen) gelenkt wurde. Das Kontinuitätsgesetz des Verkehrs wurde auch durch Wahrscheinlichkeitsbegriffe definiert.

Auf dieser Grundlage gelang es, die früheren Verfahren mit lokaler sowie momentaner Betrachtungsweise zu integrieren (Raum-Zeit Methode), die früheren deterministischen Parameter mathematisch-statistisch zu definieren und zu verallgemeinern. Diese Entwicklungsaufgabe großer Bedeutung wurde von Prof. Christfreund und Mitarbeitern auf das Gebiet des Straßenverkehrs bezogen durchgeführt [18—22] und später von Prof. Leutzbach vereinfacht [17, 23, 26].

Die Hauptrichtung der Forschungen konzentrierte sich auf den Ausdruck des Zusammenhanges zwischen der Strömung (N), der Dichte ($s = l/l_k$) und der Geschwindigkeit ($v = l/t_k$), z. B. in der Form:

$$N = \bar{s} \cdot \bar{v}$$

wobei l_k — den Durchschnittswert des Folgeabstands
 t_k — den Durchschnittswert des Folgezeitintervalls
 bedeuten.

Die Formel läßt sich in verschiedener Weise deuten, je nach dem, ob man mit der zeitlichen oder der räumlichen (momentanen) Geschwindigkeitsbegriff (Verteilung) operiert.

N und v sind Funktionen von s , es kann sich darum um $N(s)$ bzw. $v(s)$ Funktionen handeln.

s hat auch ein Maximum und zwar im Falle, wenn

$$s_{\max} = l/l$$

wobei l die Fahrzeuglänge bedeutet.

Das *Maximum von N* stellt die Kapazität im Definitionsbereich zwischen 0 (kein Fahrzeug) und s_{\max} (vollkommener Verkehrsstau) dar. Bei beiden Extremwerten des Bereiches ist $v = 0$.

Obwohl die obengenannte Formel als die Grundgleichung (Fundamentalgleichung) der Verkehrsströmungslehre bezeichnet wird [32], kann sie nicht als eine für jeden Fall gültige, also fundamentale Gleichung betrachtet werden, da die Strömungserscheinungen und Prozesse (Verhalten von Personen im Verkehr) gleichzeitig durch viele Faktoren (mikroskopisch und makroskopisch) beeinflußt werden.

Das Modell hat eine nicht zu unterschätzende Bedeutung auch dann für die Gestaltung der Betrachtungsweise wenn es lediglich in gedanklicher, verbaler oder nicht auflösbarer symbolischer Form dargestellt werden kann [36], falls es aus einem gewissen Gesichtspunkt und in einer gewissen Situation die objektive Realität oder irgendeine Charakteristik derselben widerspiegelt. Dem Modell kann in dem Fall große Bedeutung beigemessen werden, wenn es ohne unzulässige Vereinfachungen durchzuführen aufgelöst werden kann und die erhaltenen Ergebnisse durch die Beobachtungsergebnisse und Meßwerten (nach eventueller Korrektur) bestätigt werden. Diese Erkenntnis und das Bestreben, die Theorie weiterzuentwickeln, trugen dazu bei, daß die Erschließung von Verkehrsströmen durch Beobachtungen und Messungen von Anfang an mit immer fortschrittlicheren Methoden fortgesetzt wurde.

Die auf diese Weise erhaltenen Datenmengen erlangten dann einen hohen Wert, als sich die mathematisch-statistischen, Wahrscheinlichkeits- und Operationsforschungstheorien und Prinzipien entfalteteten. Diese ermöglichten einen tieferen Einblick in die Prozesse und genauere Planung.

Davon ausgehend bewies Prof. POTTHOF-[9], daß die Erscheinungen und Prozesse, deren innere Zusammenhänge, die Struktur der am meisten beanspruchten Eisenbahnbetriebsobjekte (freie Streckenabschnitte, Bahnhöfe, Ablaufberg, Gleisgruppen, Lokomotivschuppen, Kassen, usw.) bei entspre-

chender Betrachtungsweise und genügender Genauigkeit nach den erläuterten Methoden anzunähern sind. Dadurch wurde der Weg frei für die Schaffung einer *allgemeinen Verkehrsströmungstheorie*, für das eingehende Studieren der Verkehrsprozesse, für die Erarbeitung einer Planungsmethodik und für die Entwicklung von Anlagen, also für die wissenschaftliche Begründung der bis dahin empirischen Verkehrstechnik, als praktische, angewandte Methodik.

Die Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung wurden bald auch bei sich begegnenden Verkehrsströmungen für die Untersuchung der Kapazitätsprobleme der betreffenden Punkte und Streckenabschnitte angewendet.

Warteschlangenmodell

Das Warteschlangenmodell spielte — besonders was die Gestaltung der Betrachtungsweise anbelangt — im Vergleich zu anderen stochastischen Modellen eine hervorragende Rolle.

Bei sich begegnenden Verkehrsströmungen ist die am häufigsten behandelte Frage die Verzögerung, der die Fahrzeuge dabei ausgesetzt sind. Infolge der abwechselnden Befahrbarkeit des Knotenpunktes müssen mehr oder weniger Fahrzeuge warten.

Die Wartezeit hängt unter anderem von den Parametern der Strömungen, der Gestaltung des Knotenpunktes und von der Verkehrsordnung ab. Die optimale Voraussetzung der Entwicklung (Ausgestaltung) und der Konzeption der Verkehrsordnung ist, die Wartezeiten womöglich zu minimalisieren. Bei Fahrzeugen, die — im Gegensatz zu den Fußgängern — den Knotenpunkt nur nacheinander befahren können, wird auf die Verzögerung auch der Umstand einwirken, daß sich die Fahrzeuge beim Fahren gegenseitig hindern.

Dieses Problem wurde zuerst vielleicht von DORFWIRTH [6] mit Hilfe des Warteschlangenmodells untersucht. Auch viele andere Probleme können mit Hilfe dieser Methode überprüft werden (Parken, Tanken, sogar — wie schon erwähnt — auch das Überholen). Untersuchungen dieser Art sind auf theoretischer Ebene geblieben und falls man zu Zahlenwerten kam, gelang es auch kaum, diese nachzuweisen [5]. Oft ergaben sich große Abweichungen den Meßwerten gegenüber.

Das ist wahrscheinlich in erster Linie dadurch zu erklären, daß die Zeitintervalle des Nacheinanderfolgens der Fahrzeuge bei größeren Strömungen von der exponentiellen Verteilung immer mehr abweichen, wodurch die Verteilungskurve der Geschwindigkeit steiler wird und sich nach links verschiebt. Das heißt, daß sich die Fahrzeuge langsamer als mit der »gewünschten« Geschwindigkeit bewegen und sich die Geschwindigkeitsdifferenzen einzelner Fahrzeuge vermindern (z. B. auch bei Operationen wie Spurwechsel, Verpflechtung, Anschließen, usw.).

Für die Anwendungsmethode der Warteschlangentheorie kann der für Systemdenken kennzeichnende Gedankengang BÖTTGERS [15] angeführt werden. Sein Grundgedanke (Modell) ist, daß der bei der Verkehrsampel eintreffende Fahrzeugstrom (als Input) durch die Signalanlage transformiert wird und die Fahrzeuge am »Output« nach dem Signal in Gruppen bestimmbarer Größe erscheinen. Ist der Abstand zwischen den Signalen nicht größer als erwünscht (etwa 1000 m), dann lösen sich diese Gruppen nicht auf (sie lockern oder dehnen sich höchstens aus) und erscheinen am Input des nächsten signalgeregelten Querschnittes. Mit Hilfe dieses Gedankenganges kann das Steuerungssystem des Verkehrs einer Strecke oder eines Gebietes integriert werden. Das heißt, daß jedes zusammengesetzte Steuerungssystem modellierbar ist.

Im wesentlichen handelt es sich um ein Kompromiß zwischen makroskopischer und mikroskopischer Auffassung und dadurch um die Verminderung der Rechenarbeit. Aus methodischer Sicht ist dieses Verfahren teils als ein (analytisches) Berechnungs-, teils als ein Simulationsverfahren zu betrachten. Diese Methode kann auf Knotenpunkte, beliebige Strömungsverhältnisse (sich von rechts oder links anschließende, nach rechts oder links abbiegende, kreuzende, entgegengesetzte Strömungen usw.) ausgedehnt werden und eignet sich für die optimale Planung eines koordinierten Systems, für die Abschätzung von Verkehrsstörungen oder der Wirkung der Maßnahmen.

Soll ein verkehrabhängiges System projektiert werden oder verändern sich die durchschnittlichen Strömungsgrößen mit der Zeit (nichtstationäre Größen), so wird diese Methode kompliziert, doch sind Probleme dieser Art durch ein geeignetes Speichersystem und Iteration zu lösen.

Um die Varianten miteinander zu vergleichen, wurden von Böttger »Gütemerkmale« verwendet:

- die Wahrscheinlichkeit des Wartens,
- die durchschnittliche Wartezeit,
- durchfahrende Fahrzeugmenge,
- »grüner« Zeitanteil, der nicht ausgenutzt ist,
- Länge des Rückstaus beim Aufleuchten des roten Lichtes.

Die stochastische Simulation

Da die symbolischen Modelle von der Wirklichkeit wesentlich abweichen, wurde aufgrund von Meßergebnissen der Schluß gezogen, daß die Wirklichkeit durch eine genauere Methode widerspiegelt werden soll, um diese auch für die Lösung praktischer Probleme anwenden zu können. Dies trug dazu bei, daß die stochastische Simulation in den Vordergrund gerückt wurde.

Die stochastische Simulation beschäftigt sich mit aufgrund einer stochastischen Betrachtungsweise durchgeführter Modellierung und mit der Auf-

lösung des Modells durch die Simulation von Prozessen und Erscheinungen. Diese Technik ermöglicht, bei der Untersuchung viele Umstände und Bedingungen genau — wirklichkeitsnäher — in Betracht zu ziehen als es bei der Anwendung theoretisch-mathematischer, mathematisch-statistischer Modelle möglich ist, wo man der besseren Handhabung, der Auflösbarkeit wegen oft gezwungen ist, Vernachlässigungen, Vereinfachungen anzuwenden. Aus diesem Grund ist die stochastische Simulation eine nützliche, in der Analyse des komplexen Systems mit Erfolg verwendbare Methode.

Die Simulationsmodelle sind sozusagen von beschreibendem Charakter und eignen sich besonders für die Erfassung der Auswirkung irgendeiner Erscheinung, einer Parameteränderung, um den Zusammenhang zwischen In- und Output zu schildern (Black-Box-Prinzip). Für die (unmittelbare) Bestimmung der optimalen Variante eignen sie sich schon weniger. Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Simulationsverfahrens lassen sich erhöhen, indem das Problem mit Hilfe zweier oder mehrerer Modelle untersucht wird [33].

Die durch die stochastische Simulation gebotenen Möglichkeiten werden seit 10 bis 15 Jahren, insbesondere in den letzten Jahren immer öfter und mit immer besserem Erfolg auch für die Untersuchung von Verkehrsströmen verwendet.

Die erwähnten Untersuchungen waren in England schon auf die Simulation abgerichtet. In den USA wurde diese Methode für die Lösung von Problemen bei Autobahnen angewendet, wie:

- Prozesse und Erscheinungen auf langen Abschnitten ohne Knotenpunkt (Spuränderung, Überholen, Ausweichen, usw.),
- optimaler Abstand zwischen Knotenpunkten, Länge der Beschleunigungsstrecke,
- Wirkung der Auf- und Ausfahrten an der linken Straßenseite,
- Anordnung des Signals vor der Ausfahrt,
- Wirkung der Größe der Strömung und des Verhältnisses der Lkw,
- Folgen der Geschwindigkeitsbeschränkung,
- Wirkung von Neigungen,
- Gestaltung des Zusammentreffens und Trennens von Strömen,
- Wahl der Regelung von Strömungen auf Strecken mit mehreren Knotenpunkten, usw.

An der TU Karlsruhe arbeitet man — aufgrund der am Ort und Stelle geführten Untersuchung des tatsächlichen Verkehrs — an der Schaffung von Simulationsmodellen, die den Verkehrsstrom genauer widerspiegeln sollen.

Als Ergebnis der lediglich als Beispiel erwähnten und mehrerer anderer Untersuchungen sind heute viele stochastische Simulationsmodelle für den Verkehr bekannt. Viele Wissenschaftler arbeiten daran, nach den Annäherungsmodellen immer genauere und kompliziertere Modelle zu schaffen. In Ungarn wurden die bedeutendsten Untersuchungen im KKTK und in deren Rahmen

von DR. BOLDIZSÁR VÁSÁRHELYI [27] durchgeführt. Er untersuchte unter anderem mit Hilfe stochastischer Simulation die Probleme der Regelung des Vorfahrtsrechtes durch Markierung der Unter- oder Überordnung und das erarbeitete Simulationsmodell wurde erfolgreich auf der Rechenanlage durchgerechnet.

Verwendet man das stochastische Simulationsverfahren, so müssen zuerst die Untersysteme (Fahrbahn, Fahrzeug, Fahrer) des Verkehrsstromes sowie deren »Eigenschaften« und »Umgebung«, ferner deren Wirkungen so umfassend und genau wie möglich, jedoch dem makroskopischen Systemdenken entsprechend, aufgrund von gedanklichen Modellen und Überlegungen abgegrenzt und geklärt werden. Danach wird das Simulationsmodell erarbeitet und wieder das Rechenprogramm aufgestellt, dessen Güte von den Unterprogrammen und der Genauigkeit der verwendeten Daten, Parameter abhängt.

Die stochastische Simulation liefert nur dann ein wahres Bild der beobachteten Erscheinung, wenn das Verhalten der wichtigsten Elemente, der numerische Wert der kennzeichnenden Parameter und deren Veränderungen mit der erforderlichen Genauigkeit, mit entsprechender statistischen Zuverlässigkeit bekannt sind. Dafür sind die Teilerscheinungen des Stromes gründlich und systematisch zu untersuchen sowie die Werte vieler kennzeichnender Daten zu bestimmen, die bei globalen Näherungsverfahren mit keiner solchen Genauigkeit ermittelt werden müssen.

Von den Forschern wurden ihre in Simulationsform gebildeten Vorstellungen durch Messungen und Beobachtungen nachgeprüft und meistens mit Korrelationsformeln ausgedrückt, die Simulationsmodelle auch in symbolischer Form makroskopischen Charakters abgebildet. Wie gesagt, darf die Simulation als ein etwas empirischer Schritt in Richtung eines »eleganteren« analytischen Verfahrens betrachtet werden, doch kann sie auch infolge ihrer Methode als analytisch angesehen werden [28].

All dies hebt die Bedeutung der an Ort und Stelle unter verschiedenen Umständen durchgeführten Beobachtungen und der sich darauf beziehenden Methoden und Geräte hervor.

Es handelt sich neben den üblichen Zahlenwerten um Parameter bzw. Klärung der Wertbereiche wie z. B.:

- die Verteilungen von Geschwindigkeiten, Folgeabständen und Zeit (auch im momentanen und lokalen Sinne) der im Strom fahrenden Fahrzeuge, die bei dieser Methode beliebig sein kann,
- Größe der Geschwindigkeitsdifferenz, die zur Überholung bewegt,
- zeitlicher Abstand zwischen dem die Spur wechselnden Fahrzeug und den auf der Nachbarspur vor und hinter ihm fahrenden Fahrzeugen,
- Verzögerungs- und Beschleunigungswerte usw.

Die veränderlichen und konstanten Parameter des Simulationsmodells beziehen sich auf Fahrbahn, Fahrzeug, Fahrer, Strömung und Umgebung.

Es können sogar auch menschliche und gesellschaftliche Faktoren in das Modell einbezogen werden. Verwendet man die Simulation, so sollen nicht nur ideale (geradlinige, waagerechte, genügend breite Straßen ohne Ein- und Ausfahrten sowie ohne Sichtbeschränkung und andere Hindernisse) Straßen erfaßt werden. All das ermöglicht besonders bei Stadtautobahnen und Straßen mit gemischtem Verkehr die zum Erzielen praktisch anwendbarer Ergebnisse erforderliche Annäherung der Wirklichkeit. Der Gültigkeitsbereich der Simulationsmodelle in einem gegebenen (einzelnen) Aufgabenkreis ist wesentlich größer als bei Optimierungsmodellen.

Die einzelnen Fahrzeuge, Transporteinheiten, Personen treten meistens in die abgegrenzte Einheit zufallsbedingten, durch Zahlengenerator erregten Zahlen entsprechend ein, werden mit Input-Parametern versehen und bewegen sich im System nach vorbestimmten Regeln und Gesetzmäßigkeiten (Subroutinen), scheiden dann aus diesem aus.

Es ist zu gewährleisten, daß:

- die Veränderung der für die Untersuchung der Elemente wichtigen Parameter und ihr Verhalten während oder am Ende des Passierens des (Modell-) Systems sowie die Veränderung des Systemzustandes ständig verfolgt werden und

- die betreffenden Informationen (Parameter) auf geeignete Weise bestimmt, registriert, gespeichert und gedruckt werden.

Das Ziel der Simulation besteht darin, daß diese Informationen auch dann ermittelt werden, wenn es mit analytischen Methoden:

- entweder nur sehr schwer
- oder die Wirklichkeit sehr vereinfachend
- oder gar nicht möglich wäre.

Bei der Simulation der stochastischen Prozesse des Verkehrs enthält das Programm im allgemeinen auch Zeitmessung.

Dem Charakter der Digitalrechner entsprechend wird im gegebenen Zeitpunkt (der Zeitpunkt kann an gleiche Zeitintervalle z. B. eine Sekunde oder an das Eintreten eines Ereignisses gebunden sein) das System durch das Programm überprüft; es sichert den Ablauf der »aktuellen« Ereignisse und nach Speichern der Informationen wird die Zeit weitgeschoben. Um die Raumkoordinaten anzugeben, wird die Fahrbahn in dichte Blöcke — z. B. mit Kantenlängen von 1 m — aufgeteilt [35] und auch der Ablauf der Prozesse wird vom Block zu Block registriert.

Die Maschinenzeit der Simulation beträgt nur einen Bruchteil der Dauer des untersuchten Prozesses.

Es ist auch dieser flüchtigen Erläuterung zu entnehmen, daß die mehr dem mikroskopischen (die Elemente sind einzelne Fußgänger, Fahrzeuge, Fahrzeuggruppen) Aspekt nahestehende (symbolische) stochastische Simulation eine für die Untersuchung von diskreten Strömungserscheinungen des

Verkehrs geeignete »Versuchsmethode« ist, die durch ihren »verbalen« Charakter leicht zu verstehen und anzudeuten ist (Vorteil im Unterricht!).

Es steht fest, daß Erscheinungen und Prozesse der Verkehrsstrecken und Straßen mit Modellen — die die wirkliche Lage realistisch beschreiben und auf in genügend breiten Grenzen auf die gewünschte Weise veränderbare Einflußfaktoren aufgebaut sind — nur mit hochleistungsfähigen Rechenanlagen großer Operationsgeschwindigkeit zu simulieren sind. Es steht auch fest, daß auf dieser Weise tiefere Zusammenhänge des Verkehrsstromes erfaßt werden, die man auf anderem Wege nicht annähern könnte, obwohl deren Kenntnis zu der sicheren und wirtschaftlichen Abwicklung des Verkehrs wesentlich beiträgt.

Die Rolle menschlicher und gesellschaftlicher Faktoren

Aufgrund des Gesagten läßt sich feststellen, daß die Strömungserscheinungen und Prozesse »unendlich« langer, anschluß- und verzweigungsfreier Straßenabschnitte — unter gewissen Vereinfachungsbedingungen — in mehr oder weniger annehmbarer Weise modellieren werden können.

Als vorwiegendes Element der *Verkehrslinien außerhalb der Stadt* zeichnet sich die Strecke zwischen voneinander verhältnismäßig weit entfernten Knotenpunkten aus. Die vorige Feststellung trifft also vor allem für diese zu. Bei Verkehrsströmen auf Fernverkehrsstraßen und Autobahnen stellen auch die Modellierung und Steuerung der Strömungserscheinungen im Knotenpunkt (z. B. Anschluß) ein kompliziertes Problem dar. Als vorwiegende Untersysteme der *Netz innerhalb der Stadt* zeichnen sich die Knotenpunkte aus.

Als Knotenpunkt kann hierbei die Stadt, ein Teil derselben, ein Betrieb, sogar ein einziger Knotenpunkt von Straßen oder Eisenbahnlinien als abgegrenztes Untersystem bezeichnet werden.

Die zwischen den Knotenpunkten liegenden Strecken sind verhältnismäßig kurz und ihre Kapazität kann nur selten ausgelastet werden; sie stellen also in Planung, Dimensionierung, Entwicklung, Steuerung ein den Teilprozessen im Knotenpunkt unterstelltes, im allgemeinen nicht maßgebendes Problem dar. Aus der Sicht der Strömungslehre ist für diese Strecken die periodische Strömung veränderlicher Dichte der die Knotenpunkte in Intervallen verlassenden, sich in Gruppen (nur in Extremfällen in Kolonnen) fortbewegenden Fahrzeuge kennzeichnend [15].

Die Probleme und Aufgaben sowie die für die Strömungserscheinungen und Prozesse des Verkehrs kennzeichnenden Eigenschaften sind in den Knotenpunkten wahrscheinlich deshalb besonders verwickelt und maßgebend, da in diesen die Strömungsprozesse selbst annähernd nicht als stationär angesehen werden dürfen. Diese Feststellung wird auch dadurch bestätigt, daß

— die die Umstände und die einzelnen Eigenschaften genauer widerspiegelnden Simulationsmethoden in Vordergrund gerückt sind,

— der individuelle Charakter der Untersuchung, Planung, Entwicklung, Regelung stark betont wird,

— Gesellschaft und Mensch eine vorrangige Rolle spielen [8].

Die Simulationsmodelle beschreiben auch die Strömungsverhältnisse im Knotenpunkt besser, genauer als die sich auf die Wellenbewegung der Flüssigkeiten beziehenden und die diffusen analogen Modelle, besonders falls die Knotenpunkte in geringerer Entfernung voneinander als üblich — unter 1000 m — liegen [16].

Es ist für die Verkehrsprozesse kennzeichnend, daß (besonders bei den nicht schienengebundenen Verkehrssystemen, jedoch im gewissen Maße auch bei den schienengebundenen) auf der gegenwärtigen und auch auf der künftigen Entwicklungsstufe — von den Spitzenverkehrsperioden abgesehen — die individuellen Fahrer der Einheiten mehr oder weniger Möglichkeit haben, die Bewegungsparameter (auch während der Fahrt) zu ändern und dadurch die Struktur, das Verhalten des Systems, die Strömungsverhältnisse zu gestalten.

Um Sicherheit und Ausnutzung der Kapazität zu erhöhen, wird die Entwicklungsrichtung so festgelegt, daß schließlich die sich in der Streckenwahl in der Regelung der Geschwindigkeit realisierenden, individuellen Entscheidungen miteinander abgestimmt werden. Oft wird die Entscheidung zentral ohne Mitwirkung der Fahrer der Fahrzeuge getroffen. Doch wirken — kybernetisch formuliert — letzten Endes auch in diesem Falle Steuerungselemente bzw. Untersystem (Regler) in den Systemelementen (z. B. Fahrer) sowie über diesen (z. B. Dispatcher, Fahrdienstleiter, Verkehrspolizist, Automatik) und innerhalb des Systems bewußt auf die Erscheinungen und Prozesse.

Anders formuliert heißt es, daß Parameter und Struktur (Bewegung und Geschwindigkeit der Fahrzeuge, Überholen, Streckenwahl, usw.) im Verkehrsstrom — insbesondere in gewissen Strömungsdichtebereichen — sich nicht nur und eventuell in erster Reihe zufallsbedingt verändern, sondern auch durch bewußte, zielstrebige, diskrete oder kontinuierliche — jedoch auch unter gleichen Umweltbedingungen sehr verschiedene — menschliche Tätigkeiten geändert werden.

Als Beispiel könnte das »Verhalten« des in Kolonne fahrenden Fahrers in bezug auf den Folgeabstand genannt werden. Nähert sich der Fahrer zu eng dem vor ihm fahrenden Fahrzeug und merkt er es, dann vergrößert er den Abstand mehr als nötig. Als Ergebnis schwankt der Folgeabstand um einen auch von der Geschwindigkeit abhängigen Wert. Diese Schwankung wirkt ständig innerhalb der Kolonne.

Hierfür kann auch als Beispiel dienen, wie die Fahrer die zum Spurwechsel notwendigen Abstände anderer Fahrzeuge einschätzen.

Im wesentlichen gehören zu diesem Begriffskreis auch die sich auf die-

selben Prozesse oder Teilprozesse beziehenden, jedoch verschiedenen Verkehrsregeln und Gewohnheiten (z. B. Regeln für Überholen und Spurwechsel auf mehrspurigen Straßen in Europa und Amerika).

Systemtheoretisch formuliert, handelt es sich um ein anpassungsfähiges Lehrensystem [30] und um dessen Verhalten zu verstehen, muß man unbedingt die Gesetzmäßigkeiten der Psychologie, Soziologie und Pädagogik kennen. Bei der Modellierung, Planung und Steuerung solcher Systeme wird diesen Gesetzmäßigkeiten große Bedeutung beigemessen.

Dadurch läßt es sich erklären, warum gewisse Verkehrsprozesse und Erscheinungen (z. B. in der Stadt) nicht mit hinreichender Genauigkeit und mit Hilfe von Modellen allgemeiner Gültigkeit angenähert werden können. Deshalb ist das Erfassen der Strömungserscheinungen in Knotenpunkten auch mittels der bekannten mathematisch-statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden sehr kompliziert.

Deshalb ist auf dem Gebiet der Modellierung, Planung und Steuerung von Verkehrserscheinungen und Prozessen auch über die stochastische Betrachtungsweise hinaus weiterzugehen. Für die Untersuchung psychologischer Motive wurde von den Wissenschaftlern dieses Fachgebietes die *Faktoranalyse* entwickelt [37]. Diese darf als eine allgemeinere Methode der Korrelationsrechnung und ein Modellierungsverfahren angesehen werden, das mit anderen Mitteln zusammen auch für die Untersuchung von Verkehrsprozessen verwendet werden soll. Dafür hat man schon einige praktische Beispiele [29 31], die Anwendung ist aber noch zweifellos im Anfangsstadium.

Zusammenfassung

1. In der Betrachtung von Verkehrsströmen sind grundlegende Veränderungen durchzusetzen, um den menschlichen und gesellschaftlichen Faktoren größeres Gewicht beimessen zu können.

2. Auf dem Gebiet der Methodik müssen

- 2.1. die sich möglicherweise wiederholenden, sogar kontinuierlichen Messungen und Beobachtungen größere Bedeutung erhalten,
- 2.2. die in den Meß- und Beobachtungsergebnissen verborgenen, sich auf das gegebene Untersystem beziehenden speziellen Beziehungen müssen bei der praktischen Anwendung erkannt und entweder eliminiert oder mit größter Aufmerksamkeit verfolgt werden,
- 2.3. die durch wiederholte und kontinuierliche Messungen ermittelten, großen Datenmengen müssen um Übersichtlichkeit und die Ermittlung der Eigenschaften zu gewährleisten mit dem modernsten rechentechnischen Methoden systematisiert, zusammengefaßt und verwendet werden,
- 2.4. um die Modelle zu lösen, müssen zur Zeit in erster Reihe die Simulationsmethoden, die Rechentechnik herangezogen werden.

3. Im Besitz von Verallgemeinerungen aufgrund genügender Information und Erfahrungen

- 3.1. können Erwartungswerte für langfristige (nicht operative) Planung festgelegt und die Streuung und Verteilung (womöglich die Dichtefunktion) müssen geklärt werden,
- 3.2. nach Festlegung der für die Dimensionierung maßgebenden Lage, sind für deren engere Umgebung gültige, einfachere (in Extremlagen deterministische) Modellformen und Lösungen anzustreben.

4. Für operative Prozess- und Erscheinungssteuerung sowie für die Bestimmung der Auswirkungen von Maßnahmen (Veränderung von Aktionsparametern) eignen sich zur Zeit die weiterentwickelten Simulationsmethoden.

5. Die Parameter dieser Modelle sind unter Berücksichtigung der menschlichen und gesellschaftlichen Faktoren zu bestimmen und auf dieser Grundlage sind auch die betreffenden Gültigkeitsbereiche und Randbedingungen festzulegen.

Literatur

1. REUSCHEL, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. Österreichische Ing. Archiv, 1950. 4.
2. WARDROP, F. G.: Some Theoretical Aspects of Road Traffic. Research. Road Paper No. 36. 1952.
3. LIDTHILL, M. J.—WHITHAM, G. B.: On kinematic Waves. Proc. Royal Soc. London A 229, 1955.
4. TURÁNYI, I.: Grundbegriffe der Verkehrskapazitätstheorie. ÉKME Jahrbuch 1955—56. Budapest.
5. PACEY, G. M.: The Progress of a Bunch of Vehicles Released from a Traffic Signal. T.T.L. R.N. (2665) GMP 1956.
6. DORFWIRTH: Wartezeit und Rückstau von Kraftfahrzeugen an nicht signalgesteuerten Verkehrsknoten (Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen) Neue Folge, Heft 43. Kirschbaum Verlag 1961.
7. MILLER, A. J.: A Queueing for Road Traffic Flow. Journal of the Royal Statistical Society, Series B. 23. 1961.
8. TODOSIEV, E. P.: The Action Point Model of the Driver-Vehicle System. The Ohio State University Call. Ohio Rep. 1963. Nr. 202. A. 3.
9. POTTHOFF, G.: Verkehrsströmungslehre 1, 2, 3, 4, Transpress VEB Verlag für Verkehrs-wesen, Berlin (1962—1972).
10. VÁSÁRHELYI, B.—SZABÓ, D.: Handbuch des Stadtverkehrs. Műszaki Könyvkiadó, Buda-pest. 1965.
11. LEUTZBACH, W.: Straßenverkehrstechnik im Umbruch von der Empirie zur Theorie. VDJ-Z. 109. (1967) Nr. 20. Juli.
12. ERLANDER, S.: A Mathematical Model for Traffic on Two-Lane Road. Vehicular traffic science. Proceedings of the third international symposium on the theory of traffic flow. New York 1965. American Elsevier Publishing Company, Inc. New York 1967.
13. TURÁNYI, I.: Darstellung eines allgemeinen Verkehrsströmungsmodelles. Közlekedéstudományi Közlemények 1968. Nr. 7. Budapest.
14. WIEDEMANN, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalen. Straßenbau und Straßenverkehrs-technik, Heft 74. 1968.
15. BÖTTGER, R.: Ein Verkehrsmodell für signalisierte Straßennetze. Straßenbau und Straßen-verkehrstechnik. 1969. Heft 86. Karlsruhe.
16. WIEDEMANN, R.: Pulkauflösung hinter Lichtsignalen. Straßenbau und Straßenverkehrs-technik 1969. Heft 86. Karlsruhe.
17. LEUTZBACH, W.—BARTON, P.: Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 86. 1969. Bonn.
18. CHRISTFREUND, W.—COERS, H.: Methodologie des Wissenschaftsgebietes »Straßenver-kehrsablauf«. Die Straße 10. Jahrgang, Heft 4. April 1970.
19. COERS, H. G.: Zum Charakter des Straßenverkehrsflusses. Die Straße 10. Jahrgang, Heft 6. Juni 1970.
20. COERS, H. G.: Die internationale Forschungsentwicklung und das räumlich-zeitliche Prinzip mikroskopischer und makroskopischer Untersuchungen des Verkehrsflusses. Die Straße 10. Jahrgang, Heft 7. Juli 1970.
21. COERS, H. G.: Grundlegende Ergebnisse mikroskopischer Untersuchungen des Verkehrs- flusses nach dem räumlich-zeitlichen Prinzip. Die Straße 10. Jahrgang, Heft 9. Septem-ber 1970.
22. COERS, H. G.: Grundlegende Ergebnisse makroskopischer Untersuchungen des Verkehrs- flusses nach dem räumlichzeitlichen Prinzip. Die Straße 10. Jahrgang, Heft 9. Septem-ber 1970.
23. LEUTZBACH, W.: Untersuchungen über die Möglichkeit Verkehrserhebungen im Rahmen städtischen, bzw. regionalen Verkehrsplanungen durch Verkehrsdichteerhebungen zu ersetzen. Forschung Stadtverkehr 1970. Nr. 2 und 4.
24. Schlußfolgerungen des XVI. Weltkongresses im Straßenwesen (UVATERV, Budapest 1971). Referat der Sowjetunion am XVI. Prager Weltkongreß.

25. SZÜCS, E.: Dialogen über die technischen Wissenschaften. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
26. LEUTZBACH, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1972.
27. VÁSÁRHELYI, B.: Theoretische Untersuchung der Abwicklung des Straßen- und Stadtverkehrs. Forschungsbericht TU Budapest Arbeitsgemeinschaft der Lehrstühle für Verkehrswissenschaften, Budapest 1972, 1973, 1974.
28. SIEGENER, W.: Was ist Verkehrssystemanalyse? 10 Jahre Institut für Verkehrswesen, IVV 1972, Heft 6. Karlsruhe.
29. LUBK, R.—NEUBERT, J.: Die Faktoranalyse der Arbeitsproduktivität und der Arbeitskräfte im Verkehrswesen. WAO im Verkehrswesen, Transpreß Verlag, Berlin 1973.
30. NEMÉNYI, V.: Leitung von ökonomischen Systemen. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest 1973.
31. PETRY, H.: Ergebnisse faktoranalytischer Untersuchungen im Hinblick auf unterschiedliche Unfallhäufigkeit bei Straßenbau und Omnibusfahrern. Verkehr und Technik 1973. Nr. 6.
32. BECKMANN, H.—JACOBS, F.—LENZ, H.—WIEDEMANN, F.—ZACKOR, H.: Das Fundamentaldiagramm. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 89. Kirschbaum Verlag Bonn, Badgodesberg, 1973.
33. AUTLEC—LEGLISE: Analyse critique de la conception et du comportement de cinq modèles de trafic. Transportation Research 1973 Dec.
34. JANETZKI, G.: Der stochastische Charakter von Transportsystemen. DDR Verkehr, 1974. Nr. 4.
35. VÁSÁRHELYI, B.: Stochastische Simulation des Verkehrs an Straßenkreuzungen nach dem «rechts vor links» Prinzip. Bericht Nr. 19. Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe, 1974.
36. FRICK, R.: Funktion und Struktur des Modellverfahrens in den technischen Wissenschaften. Die Technik, 1974 Nr. 4.
37. JAHN, W.—VAHLE, H.: Anwendung der Faktoranalyse. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest, 1974.
38. SCOTT, R. S.: Analytic assignment models. Traffic Quarterly 28 (1974) No. 3.
39. RICHTER, K. J.: Die Transportmatrix. Transpress VEB Verlag Berlin, 1974.

Prof. Dr. István TURÁNYI H-1450 Budapest Pf. 93