

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen
der Universität Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach

Dr.-Ing. Gottfried Willmann

**Zustandsformen
des Verkehrsablaufs
auf Autobahnen**

Heft 19



1978

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe. Sie wurde durch einen Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr unterstützt.

Herrn Professor Dr.-Ing. W. Leutzbach danke ich für die Übernahme dieses Forschungsauftrages und für das rege Interesse, das er meiner Arbeit entgegengebracht hat.

Herrn Professor Dr.-Ing. R. Wiedemann, meinem Referenten, gilt mein besonderer Dank für seinen sachkundigen Rat und für seine stete Bereitschaft zum Gedankenaustausch.

Herrn Professor Dr.-Ing. H.-G. Krebs, meinem Korreferenten, danke ich herzlich für die gründliche Durchsicht der Arbeit und für die kritische Überprüfung ihrer Ergebnisse.

In meinen Dank schließe ich die Institutsangehörigen ein, die mir von den Messungen an über die Programmierphase bis hin zur Anfertigung der Zeichnungen und der Reinschrift behilflich waren.

Die Rechenarbeiten wurden auf der UNIVAC 1108 des Rechenzentrums der Universität (TH) Karlsruhe durchgeführt.

Karlsruhe, im Dezember 1978

Gottfried Willmann

K u r z f a s s u n g

Willmann, G.

Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen
110 Seiten, 51 Abbildungen

Die Abgrenzung verschiedener Zustandsformen des Verkehrsablaufs ist eng verknüpft mit der Frage der Bewertung der Verkehrsqualität. Einige Qualitätsindikatoren werden auf ihre Abhängigkeit von den Einflußgrößen Verkehrsstärke und Wunschgeschwindigkeit untersucht. Als wesentlichstes Instrument der Untersuchung wird ein Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Richtungsfahrbahnen entwickelt. Der Vergleich mit empirischen Meßdaten zeigt, daß der gewählte Modellansatz das Verhalten der Verkehrsteilnehmer wirklichkeitsgetreu nachbildet.

Die für reinen Pkw-Verkehr ermittelten Zusammenhänge weisen den Übergang vom freien zum teilgebundenen Verkehr bei 800 - 1000 Fhz/h und die Grenze zwischen teilgebundenem und gebundenem Verkehr in der Nähe der Streckenleistungsfähigkeit bei 2700 - 3000 Fhz/h aus. Alle Indikatoren zeigen im teilgebundenen Verkehr eine lineare Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Das Geschwindigkeitsniveau, aus der Wunschgeschwindigkeit resultierend und durch die Verkehrsregelung steuerbar, beeinflußt zwar die quantitative Ausprägung der verkehrlichen Kenngrößen, verändert aber die qualitativen Zusammenhänge nur in geringem Maße.

S u m m a r y

Willmann, G.

Traffic Flow Characteristics on German Expressways
110 Pages, 51 Figures

The definition of the different operating levels of traffic flow is closely related to the question of evaluating the quality of traffic service. Some quality indicators were investigated with respect to their relation to the parameters 'traffic volume' and 'desired speed'. As an essential instrument for this investigation a microscopic simulation-model for the usual type of expressways (two-lanes per direction) has been developed that proved to fit empirical data quite realistically.

The results for passenger-car-traffic show a change of the operating level from free-flow situation to partly obstructed traffic at 800 - 1000 vehicles per hour. Partly obstructed traffic changes to obstructed traffic near to the capacity of that road type at 2700 - 3000 vehicles per hour. In the range of partly obstructed traffic all regarded indicators show a linear relationship with the traffic volume. Even though the speed level resulting both from the distribution of the desired speeds and from traffic regulations (speed limits) effects the well known parameters of traffic flow, it has only a few influence on the regarded quality indicators.

R é s u m é

Willmann, G.

Les états du déroulement du trafic aux autoroutes
110 pages, 51 illustrations

La définition des divers états du déroulement du trafic est étroitement liée avec la question pour l'évaluation de la qualité du trafic. Plusieurs critères pour la qualité du trafic furent vérifiés en considération de leur dépendance des données 'volume du trafic' et 'vitesse désirée'. Un moyen essentiel pour les recherches fut un modèle développé pour la simulation du déroulement du trafic aux chaussées à sens unique à deux voies. En le comparant avec les données empiriques observées il est prouvé que le comportement effectif des conducteurs fut simulé réellement.

Les relations déterminées pour le trafic à voitures démontrent un changement d'état de circulation libre à la circulation partiellement obstruite à 800 - 1000 véhicules/h, et la limite entre la circulation partiellement obstruite à l'état obstruit est tout près de la capacité de 2700 - 3000 véhicules/h. Tous les critères montrent une dépendance linéaire du volume du trafic à l'état de circulation partiellement obstruit. En effet, le niveau de vitesse, résultant de la vitesse désirée et à contrôler par la régulation du trafic, influence certainement les données quantitatives du trafic, mais le changement des relations qualitatives n'est que peu important.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

1.	Einleitung	1
2.	Kriterien zur Beurteilung des Verkehrsablaufs	4
2.1	Vorbemerkung	4
2.2	Verkehrsablauf und Einflußfaktoren	4
2.3	Qualitätsmaßstäbe des Verkehrsablaufs	7
2.4	Indikatoren für die Verkehrsqualität	14
2.5	Quantifizierbarkeit der Kenngrößen	17
3.	Simulation des Verkehrsflusses auf zweispurigen Richtungsfahrbahnen	19
3.1	Einführung	19
3.2	Äußere Bedingungen	20
3.3	Erzeugung von Fahrer-Fahrzeug-Elementen	21
3.4	Beobachtung von Fahrer-Fahrzeug-Elementen	26
3.5	Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug-Elementen	29
3.5.1	Interaktion bei Überholunmöglichkeit	30
3.5.2	Spurwechselverhalten	32

Seite:

4.	Programmierung des Simulationsmodells	39
4.1	Kenndaten der Fahrer-Fahrzeug- elemente	39
4.2	Erzeugung und Löschen von Fahrer- Fahrzeug-Elementen, Programmteile INPUT und OUTPUT	43
4.3	Wahrnehmungs- und Entscheidungs- prozeß, Programmteil DECS	45
4.3.1	Beteiligte Fahrzeuge	45
4.3.2	Prozedur INTAC2	46
4.3.3	Interaktion zwischen Fahrzeugen auf derselben Spur	47
4.3.4	Interaktion zwischen Fahrzeugen auf benachbarten Spuren	49
4.4	Bewegung und Beobachten der Fahr- zeuge, Programmteil MOVE	51
5.	Simulationsergebnisse	55
5.1	Randbedingungen und Einflußgrößen	55
5.2	Fundamentaldiagramme	58
5.3	Benutzung der Überholspur	62
5.4	Geschwindigkeiten	63
5.5	Freizügigkeit	70
5.6	Heftige Verzögerungen	73
5.7	Spurwechselhäufigkeit	74

Seite:

6.	Begleitende empirische Untersuchungen	77
6.1	Einleitung	77
6.2	Ausrüstung einer Meßstrecke	78
6.3	Durchführung der Messungen	79
6.4	Vergleich mit den Simulationsergebnissen	82
7.	Zusammenfassung	87
8.	Literaturverzeichnis	90
9.	Anhang (Bestimmung des Meßquerschnittabstandes)	94
10.	ALGOL - Programm	99
11.	Abbildungen	

1. Einleitung

Fragen der Leistungsfähigkeit und Sicherheit des Straßenverkehrs stehen in engem Zusammenhang mit der jeweiligen Zustandsform des Verkehrsablaufs. Unterscheidet man zwischen drei Zustandsformen des Verkehrsablaufs, dem freien, dem teilgebundenen und dem gebundenen Verkehr, so kann davon ausgegangen werden, daß die Theorie des freien Verkehrs aufgrund vieler Untersuchungen als im wesentlichen abgeschlossen gelten kann. Auch der Zustand des gebundenen Verkehrs ist theoretisch bereits ausführlich behandelt worden (Quellen s. LEUTZBACH 1972). Dagegen hat die modellhafte Beschreibung des Verkehrsflusses im teilgebundenen Verkehr bisher keine befriedigenden Ergebnisse erbracht. Dabei verdient beispielsweise der Übergang vom teilgebundenen zum gebundenen Verkehr, also der Bereich der Belastungsgrenze einer Straße, besondere Aufmerksamkeit, beinhaltet er doch die ungleichmäßigsten und damit unsichersten Verkehrszustände. Daneben besteht im Rahmen von Leistungsfähigkeitsbetrachtungen ein starkes Interesse, jene Belastungsgrenze einer Straße zu kennen, die nicht überschritten werden darf, wenn Zusammenbrüche des Verkehrs vermieden werden sollen.

Die Komplexität möglicher mathematischer Modelle des Verkehrsablaufs im Bereich des teilgebundenen Verkehrs und der hohe Aufwand empirischer Untersuchungen legen den Versuch nahe, die angesprochenen Fragestellungen mit Hilfe der digitalen Simulation auf numerischem Wege zu behandeln. Wenn sich der Bewegungsablauf einzelner Fahrzeuge und ihre Interak-

tionen wirklichkeitsgetreu durch ein Simulationsmodell beschreiben lassen, und alle bezüglich der Fragestellung relevanten Einflußgrößen in das Modell eingebracht werden können, dann sind auf dem Wege der Simulation durchaus allgemeingültige Aussagen über den Verkehrsfluß zu erlangen.

Das Problem der Quantifizierung der Übergänge zwischen den einzelnen Verkehrszuständen führt zunächst zur Frage möglicher Bewertungsmaßstäbe für gewisse Qualitätsmerkmale des Verkehrsflusses.

Kapitel 2 soll daher einen Überblick über denkbare Kriterien zur Beurteilung des Verkehrsablaufs geben und Indikatoren aufzeigen, die den Zusammenhang zwischen den veränderlichen Einflußgrößen und den Qualitätsmerkmalen widerspiegeln.

Die wesentlichen Modellvorstellungen über bestimmte Teilespekte des Verkehrsflusses, die bei der Aufstellung des Simulationsmodells Berücksichtigung fanden, sind in Kapitel 3 dargestellt. Kapitel 4 beschreibt die gewählte Programmstruktur und soll die für weitere Anwendungen und Modifizierungen notwendige Transparenz herstellen, zu der auch die Verwendung der leicht verständlichen Programmiersprache ALGOL nicht unwesentlich beiträgt.

Simulationsergebnisse, die zur Klärung der aufgeworfenen Fragestellung beitragen können, werden in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert. Bei der Fülle denkbarer Variationen von Einflußgrößen war hier eine Beschränkung auf wenige Parameter-Kombinationen unumgänglich, womit die dem Simulationsmodell inne-

wohnenden Möglichkeiten keineswegs voll ausgeschöpft sind.

Aussagen auf der Basis von Modellbetrachtungen müssen mit Hilfe empirisch gewonnener Erkenntnisse eingehend auf ihre Übereinstimmung mit der Wirklichkeit hin überprüft werden. Dies geschieht in Kapitel 6 anhand eigener Messungen und bereits bekannter Forschungsergebnisse.

2. Kriterien zur Beurteilung des Verkehrsablaufs

2.1 Vorbemerkung

Bei der Planung neuer oder der Bewertung bestehender Verkehrsanlagen stellt sich immer die Frage, welche Qualitätsanforderungen an den Verkehrsablauf gestellt werden sollen. Je nach den subjektiven Präferenzen des befragten Verkehrsteilnehmers wird die Antwort auf diese Frage eine unterschiedliche Reihe von Qualitätsmerkmalen umfassen. Es erscheint sinnvoll, die Vielfalt möglicher Qualitätsangaben unter die globalen Qualitätsanforderungen Schnelligkeit, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Bequemlichkeit einzuordnen (TRAPP 1971). Diese sind von der Verkehrsanlage nach Maßgabe des übergeordneten Planungsziels mehr oder weniger zu erfüllen. Die der jeweiligen Verkehrsaufgabe angemessene optimale Qualität des Verkehrsablaufs kann aber erst festgestellt werden, wenn quantifizierende Bewertungsmaßstäbe gefunden sind, die den Zusammenhang zwischen den veränderlichen Einflußgrößen und den geforderten Qualitätsmerkmalen widerspiegeln.

2.2 Verkehrsablauf und Einflußfaktoren

Unter dem Begriff "Verkehrsablauf" sei auf Straßen mit zweispurigen Richtungsfahrbahnen die Gesamtheit der Bewegungsvorgänge aller in einer Richtung fahrenden Kraftfahrzeuge verstanden mit der zusätzlichen Einschränkung, daß nur der Verkehr auf der "freien Strecke" betrachtet werden soll. Die speziellen

Fahrvorgänge an Aus- und Einfahrten bleiben dabei ebenso wie ihre Folgeerscheinungen unberücksichtigt. In diesem Sinne kann man die auf den Verkehrsablauf einwirkenden Faktoren etwa folgendermaßen gliedern (PAMPEL 1955, HIGHWAY RESEARCH BOARD 1966):

a.) Von der Fahrbahn abhängige Faktoren:

- Linienführung im Grund- und Aufriß
(Gradiente, Kurvigkeit, Querneigung);
- Querschnittsgestaltung
(Fahrbahnbreite, Randstreifenbreite, Lichtraumprofil, Leiteinrichtungen);
- Fahrbahndeckenart und -zustand
(Fahrbahnoberfläche).

b.) Von den Fahrzeugen abhängige Faktoren:

- Fahrzeugtyp
(Abmessungen, Gewicht, Motorleistung, Fahrwerk);
- Fahrzeugzustand
(Motor, Reifen, Beladung);
- Fahreigenschaften
(Straßenlage, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungs- und Bremsvermögen).

c.) Von den Fahrern abhängige Faktoren:

- Fahrereigenschaften
(physische und psychische Leistungsfähigkeit, Fahrkönnen, Seh- und Schätzvermögen);
- Fahrverhalten
(Fahrweise, Sicherheitsbewußtsein, Fahrtmotiv, Fahrtdauer, Wunschgeschwindigkeit).

d.) Vom Verkehr abhängige Faktoren:

- Verkehrsstärke, Verkehrsdichte;
- Verkehrszusammensetzung,
(Fahrzeugarten, Schwerverkehr, Fahrtweiten, Fahrtzwecke).

e.) Sonstige Faktoren:

- Witterung
(Helligkeit, Wind, Regen, Schnee, Nebel);
- Verkehrsregelung
(Geschwindigkeitsbegrenzung, Überholverbot, Warnzeichen).

Nicht alle aufgezählten Einflußfaktoren können bei der vorliegenden Untersuchung in ihrer ganzen Variationsbreite berücksichtigt werden. So sind insbe-

sondere alle straßenabhängigen Einflüsse einschließlich unterschiedlicher Witterung ausgeklammert, indem mehr oder weniger ideale Fahrbahnbedingungen (gerade und ebene Linienführung, normale Fahrbahnbreite, ordentlicher Zustand der Fahrbahnoberfläche, gutes Wetter) vorausgesetzt werden. Von Fahrern und Fahrzeugen abhängige Faktoren werden nur insoweit global in Rechnung gesetzt, als sie sich in der statistischen Verteilung der Wunschgeschwindigkeit und in den sonstigen, das Fahrverhalten der simulierten Fahrer-Fahrzeug-Elemente bestimmenden Kenngrößen niederschlagen; gleiches gilt für die Verkehrsregelung.

Die Verkehrszusammensetzung beschränkt sich auf den Grenzfall des reinen Pkw-Verkehrs, wie er an Wochenenden mit Lkw-Fahrverbot oder in der Hauptreisezeit bei Beginn und Ende der Schulferien auftritt. Es verbleibt somit die Verkehrsstärke als der Hauptfaktor, dessen Einfluß auf die Qualität des Verkehrsablaufs eingehender untersucht werden soll. Darüberhinaus ist zu prüfen, inwieweit Verkehrszustände von unterschiedlichem Geschwindigkeitsniveau geprägt sind, wie es beispielsweise mit generellen Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Richtgeschwindigkeiten angestrebt wird.

2.3 Qualitätsmaßstäbe des Verkehrsablaufs

Es gibt eine Reihe von Kennwerten, die Wesentliches über den Verkehrsablauf aussagen und daher bereits allein zur Beurteilung seiner Qualität herangezogen werden können. So könnte die mittlere Geschwindig-

keit auf einer betrachteten Strecke durchaus einen solchen Qualitätsmaßstab abgeben. Darüberhinaus ist allerdings nicht zu übersehen, daß der Begriff Verkehrsqualität eine Vielzahl von Aspekten in sich vereinigt, die kaum alle durch einen einzelnen Kennwert aufgezeigt werden können. So wäre es unter dem Gesichtspunkt der Verkehrssicherheit beispielsweise angebracht, neben dem absoluten Geschwindigkeitsniveau auch die Streuung der Einzelgeschwindigkeiten in die Bewertung der Verkehrsqualität einzubeziehen, da große Geschwindigkeitsunterschiede in Verbindung mit höheren Verkehrsbelastungen auf instabile und damit wohl auch gefährlichere Verkehrssituationen hindeuten können,

Ein Weg, die unterschiedlichen Teilaspekte der Verkehrsqualität in deren Bewertung einfließen zu lassen, besteht in der Möglichkeit, durch Kombination mehrerer Kennwerte mit entsprechender Gewichtung komplexere Qualitätsmaßstäbe zu entwickeln. Für dieses Vorgehen gibt es insbesondere in der amerikanischen Literatur eine Reihe von Vorschlägen, systematisch zusammengestellt in einem Bericht des HIGHWAY RESEARCH BOARD (1972).

GREENSHIELDS (1961) benutzte die Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsänderungen als Indikatoren für die Verkehrsqualität, indem er einen Qualitätsindex Q definierte:

$$Q = \frac{K * S}{\Delta s * \sqrt{f}}$$

K = Konstante; dient zur Vermeidung
kleiner Zahlenwerte ($K = 1000$),

S = Mittlere Reisegeschwindigkeit für
den betrachteten Streckenabschnitt,

Δs = Gesamtbetrag aller Geschwindigkeits-
änderungen (Absolutwerte), die einen
gewissen Mindestwert überschreiten;
Dimension wie S,

f = Anzahl der zu Δs beitragenden Be-
schleunigungs- bzw. Verzögerungs-
vorgänge auf dem betrachteten
Streckenabschnitt.

Dabei steht die Reisegeschwindigkeit für den unter gegebenen Verkehrsverhältnissen erzielbaren Erfolg, während Betrag und Anzahl der Geschwindigkeitsänderungen als Maß für die dabei in Kauf zu nehmenden Belästigungen gelten (das Gewicht der Häufigkeit von Geschwindigkeitsänderungen wird durch die Quadratwurzel-Funktion abgeschwächt, da die häufiger auftretenden kleineren Geschwindigkeitsänderungen nicht genauso störend empfunden werden wie die weniger häufigen großen). Der so definierte Qualitätsindex ist nach Messung GREENFIELDS mit dem Benzinverbrauch korreliert und könnte demnach auch als gewisses Maß für die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs herangezogen werden. Die Aussagekraft des Qualitätsindex wird allerdings dadurch in Frage gestellt, daß sowohl Häufigkeit als auch Betrag der

Geschwindigkeitsänderungen stark von der individuellen Fahrweise abhängen und die erhaltenen Meßwerte daher erhebliche Streuungen aufweisen.

GEORGE (1961) kombinierte die Verkehrsdichte und den Variationskoeffizienten der Geschwindigkeitsverteilung und definierte einen Stauungsgrad R (Rating of traffic congestion):

$$R = k + \frac{k}{2 \sqrt{\epsilon}}$$

k = Verkehrsdichte (veh.p.m)

ϵ = Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsverteilung (Prozent)

Der erste Summand k ist proportional zum gesamten Zeitaufwand der n Fahrzeuge, die während eines Zeitraumes $T = 1$ (h) über eine Strecke $X = 1$ (mile) fahren; aus der Zustandsgleichung $q = k * \bar{v}_m$ folgt wegen

$$q = \frac{n}{T} \quad \text{und} \quad \bar{v}_m = \frac{X * n}{\sum t_i}$$

$$k = \frac{\sum t_i}{TX}$$

Der zweite Summand drückt die Unbequemlichkeit des Verkehrs (ebenfalls in der Dimension Zeitaufwand) aus. Die Verwendung des Variationskoeffizienten

der Geschwindigkeitsverteilung geschieht aufgrund der Erfahrung, daß bei freiem Verkehrsfluß relativ große Geschwindigkeitsstreuungen beobachtet werden können, während bei Verkehrsstärken in der Nähe der Leistungsfähigkeitsgrenze nur noch verhältnismäßig kleine Streuungswerte gemessen werden. Spätere Messungen (TREITERER 1970) haben jedoch gezeigt, daß bei noch dichterem Verkehr der Variationskoeffizient der Geschwindigkeiten wieder erheblich größer werden kann, so daß er allenfalls im Bereich des freien und teilgebundenen Verkehrs einen Anhaltspunkt für die durchschnittliche Behinderung der Verkehrsteilnehmer geben könnte.

PLATT (1963) hat ein speziell instrumentiertes Testfahrzeug (drivometer) eingesetzt, mit dem sowohl die Aktivitäten des Fahrers (Lenkradumdrehungen, Betätigungen des Gas- und Bremspedals) als auch die kinematischen Daten des Fahrzeugs (Geschwindigkeit, Beschleunigung) sowie besondere Straßenmerkmale und Verkehrssituationen registriert werden konnten, um einen umfassenden Qualitätsindex (Level of Service Index) LSI zu ermitteln:

$$LSI = \frac{\text{Quality of Traffic Flow}}{\text{Driver Effort}} + \frac{\text{Driver Satisfaction}}{\text{Driver Effort}} - \frac{\text{Driver Annoyance due to Delay}}{\text{Driver Effort}}$$

$$\frac{\text{Quality of Traffic Flow}}{\text{Driver Effort}} = \frac{\text{Average Speed}}{\text{Speed Change Rate} * \text{Change of Direction Rate}}$$

$$\frac{\text{Driver Satisfaction}}{\text{Driver Effort}} = \frac{\text{Average Speed}}{\frac{\text{Speed Change Rate} * \text{Reversal Rate}}{\text{Steering Reversal Rate}} + \frac{\text{Acceleration Rate}}{\text{Brake Application Rate}} - 2 * \text{Acceleration Rate}}$$

$$\frac{\text{Driver Annoyance due to Delay}}{\text{Driver Effort}} = \left(\frac{\text{Total Time}}{\text{Running Time}} \right)^3 - 1$$

Die so definierten Anteile am Qualitätsindex werden noch mit verschiedenen Gewichten belegt und ergeben dann zusammen Zahlenwerte in der Größenordnung von 1 bis 50, wobei ein höherer Index höhere Verkehrsqualität bedeutet. Abgesehen von der nur mehr oder weniger subjektiv zu begündenden Gewichtung ist gegen die Verwendung eines solchen Index einzuwenden, daß in ihm zwar eine ganze Reihe von Einflußgrößen berücksichtigt werden, jedoch durch die Zusammenfassung in einer einzigen Kennzahl die einzelnen Einflüsse sich gegenseitig möglicherweise wieder eliminieren. Außerdem sind die zur Fahrzeugsteuerung notwendigen Aktivitäten nur dann negativ zu bewerten, wenn sie ein gewisses Mindestmaß überschreiten, das zur Erhaltung der notwendigen Aufmerksamkeit erforderlich ist.

Das Highway Capacity Manual 1965 führte den "Level of Service" - Begriff zur Charakterisierung des Verkehrsablaufs ein. Darin sollten die Faktoren

- Geschwindigkeit und Reisezeit,
- Verkehrsstörungen
(ablaufbedingte Geschwindigkeitsänderungen),
- Manövrierfreiheit
(Freizügigkeit, Überholmöglichkeit),
- Sicherheit,
- Fahrkomfort und Bequemlichkeit,
- Fahrzeug-Betriebskosten

berücksichtigt sein. Der zahlenmäßigen Abgrenzung

der 6 Güteklassen A bis F des Verkehrsablaufs anhand der "operating Speed" (Einsatzgeschwindigkeit) einerseits und der "volume/capacity ratio" (Auslastung) andererseits haftet jedoch in gewisser Weise etwas Willkürliches an.

DREW (1965, 1968) hat den interessanten Versuch unternommen, die quantitative Bewertung der Einflußfaktoren mit Hilfe des Energie-Konzepts auf eine objektive Basis zu stellen. Er benutzt die "kinetische Energie" des Fahrzeugstroms als Maßstab für den Faktor Geschwindigkeit und drückt die Behinderungen und Unbequemlichkeiten in der inneren (verlorenen) Energie aus, die zusammen mit der kinetischen Energie die Gesamtenergie des Fahrzeugstromes ergibt. Unter der Hypothese konstanter Gesamtenergie ist der Verkehrsablauf optimal, wenn die kinetische Energie ihr Maximum und damit die innere Energie ihr Minimum erreicht. DREW versucht, diese Hypothese zu belegen, indem er zeigt, daß die so definierte innere Energie eines Verkehrszustandes durch die Kenngröße "acceleration noise" gemessen werden kann. Das DREW'sche Energieerhaltungsprinzip ist zwar in dieser Form wohl nicht haltbar (TREITERER 1970); trotzdem sollten sowohl die Bewegungsenergie des Verkehrsstroms als auch der Parameter "acceleration noise" (als Kennwert der Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen) zur Charakterisierung des Verkehrsablaufs beitragen können.

Wie die bisherigen Ausführungen zeigen, haben Qualitätsmaßstäbe für den Verkehrsablauf, die aus einer Verknüpfung unterschiedlicher Kenngrößen bestehen,

nur eine beschränkte Aussagekraft. Dies folgt zum anderen aus der Gefahr, entweder durch Verkörperung redundanter Kenngrößen deren Bedeutung zu überschätzen oder durch Kombination sich widersprechender Indikatoren deren Aussage zu unterdrücken. Es erscheint daher sinnvoll, die vorliegende Untersuchung auf die Ebene der Einzelkennwerte zu beschränken. Erst wenn gesicherte Erkenntnisse darüber vorliegen, wie die verschiedenen Indikatoren jeder für sich auf die Einflußgrößen reagieren, können auch komplexe Qualitätsindizes in Betracht gezogen werden.

2.4 Indikatoren für die Verkehrsqualität

Verkehrsqualität kann durchaus unterschiedlich beurteilt werden. Der Verkehrsteilnehmer mag die maximale Erfüllung seiner individuellen Bedürfnisse zum Ziel haben, rasches Vorwärtstkommen ohne Behinderungen, zumindest aber zügige Fahrt frei von Verkehrssituationen, die ein erhöhtes Sicherheitsrisiko beinhalten. Für den Verkehrsplaner stehen wohl Fragen der Leistungsfähigkeit, der kollektiven Sicherheit, der Wirtschaftlichkeit und der Auswirkungen auf die Umwelt im Vordergrund.

Als Indikatoren, die zur Beurteilung der Verkehrsqualität aus der Sicht des Verkehrsteilnehmers bzw. des Verkehrsplaners herangezogen werden sollen, kommen nur solche Kenngrößen des Verkehrsablaufs in Frage, in denen sich die zu bewertenden Einflüsse eindeutig und möglichst sensibel widerspiegeln. Der Versuch einer groben Gliederung der denkbaren

Kennwerte nach den Grundforderungen an die Verkehrsqualität, zu deren Bewertung sie möglicherweise herangezogen werden können, führt zu folgendem Ergebnis:

a.) Indikatoren für die Schnelligkeit:

- Querschnittsgeschwindigkeiten
(Verteilung, Mittelwert, Streuung,
85% - Percentile);
- Reisegeschwindigkeiten
(Verteilung und deren Parameter);
- Freizügigkeit
(Zeitanteil unbehinderter Fahrt
mit der jeweils angestrebten Ge-
schwindigkeit).

b.) Indikatoren für die Sicherheit:

- Häufigkeit gefährlicher Situationen
(Anzahl scharfer Bremsvorgänge);
- Häufigkeit sehr unterschiedlicher
Geschwindigkeiten
(hintereinander oder nebeneinander
fahrender Fahrzeuge);
- Ungleichmäßigkeit der Fahrt
(Betrag und Anzahl der Geschwindigkeits-
änderungen, acceleration noise);

- Spurwechselhäufigkeit.

c.) Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit:

- Kraftstoffverbrauch;
- Reisezeiten;
- Zeitverluste;
- Verkehrsleistung
(Summe der zurückgelegten Entfernung, bezogen auf den Reisezeitaufwand).

d.) Indikatoren für die Umweltbelastung:

- Luftverunreinigungen;
- Lärm und Erschütterungen.

e.) Indikatoren für die Bequemlichkeit:

- Gleichförmigkeit der Fahrt
(Geschwindigkeitsänderungen, acceleration noise, Spurwechsel);
- Behinderungen
(erzwungene Verzögerungen, Zeitverluste, verhinderte Überholungen, Haltezeiten).

Eine solche Aufstellung kann natürlich weder vollständig sein, noch eine eindeutige Zuordnung zwischen den Qualitätsbegriffen und den möglichen Indikatoren herstellen. Sie macht jedoch deutlich, daß als Qualitätsindikatoren möglichst "einfache" verkehrliche Kennwerte verwendet werden sollten.

2.5 Quantifizierbarkeit der Kenngrößen

Alle genannten Indikatoren können grundsätzlich im realen Verkehrsablauf beobachtet und durch entsprechend angelegte Messungen empirisch quantifiziert werden. Allerdings erfordern solche Untersuchungen vielfach einen hohen technischen und personellen Aufwand, sodaß in der Regel umfangreiche Meßreihen praktisch nicht durchführbar sind.

Der Verkehrsfluß ist in allen seinen Zuständen durch eine Vielzahl von Parametern gekennzeichnet, die für die jeweils zu beobachtenden Erscheinungen verantwortlich zu machen sind. Wenn zu untersuchen ist, nach welchen Gesetzmäßigkeiten die einzelnen Parameter den Verkehrsablauf bestimmen, müssen diese jeweils isoliert betrachtet werden können. Dem sind aber selbst bei großangelegten empirischen Untersuchungen enge Grenzen gesetzt, denn einerseits ist die Wahrscheinlichkeit gering, während einer begrenzten Meßdauer Verkehrszustände zu beobachten, die sich nur in einem einzigen Parameter unterscheiden, andererseits bleiben bestimmte Parameterkombinationen nur selten in ausreichend großen Betrachtungsintervallen stationär. "Allgemein gültige Aussagen über

den Verkehrsfluß können daher nur Modellbetrachtungen erbringen, die aber mit Hilfe der aus der Empirie gewonnenen Erkenntnisse eingehend auf ihre Übereinstimmung mit der Wirklichkeit hin überprüft werden müssen" (WIEDEMANN 1974).

Für die Behandlung der vorgegebenen Fragestellung eignen sich nur solche Modelle, die in der Lage sind, das ganze Spektrum möglicher Zustände des Verkehrsablaufs realistisch abzubilden. Da sich die Simulation bisher bei der Erforschung von Phänomenen des Verkehrsflusses als eine nützliche Methode erwiesen hat, zu qualitativen Aussagen und darüberhinaus mindestens zu Anhaltspunkten für quantitative Gesetzmäßigkeiten zu gelangen, wird in den folgenden beiden Abschnitten ein Simulationsmodell beschrieben, das den gestellten Anforderungen in hohem Maße entspricht. Mit seiner Hilfe sollen dann in Abschnitt 5 einige Indikatoren für die Verkehrsqualität auf ihren Zusammenhang mit den Einflußgrößen untersucht und in Abschnitt 6 mit den Ergebnissen von Messungen des realen Verkehrsablaufs verglichen werden.

3. Simulation des Verkehrsflusses auf zweispurigen Richtungsfahrbahnen

3.1 Einführung

"Der hohe Aufwand empirischer Untersuchungen kann reduziert und die Schwierigkeit der Darstellung komplexer, dem betrachteten Problem angemessener Modelle überwunden werden, wenn es gelingt, den Bewegungsablauf auf der Grundlage möglichst vieler, die Wirklichkeit hinreichend genau beschreibender Gesetzmäßigkeiten in einer für die elektronische Behandlung geeigneten Form nachzubilden" (WIEDEMANN 1974).

Das für die vorliegende Untersuchung aufgestellte Simulationsmodell basiert auf den von WIEDEMANN entwickelten Bausteinen zur Simulation des einspurigen Verkehrsflusses. Die Weiterentwicklung umfaßt neben programmierungstechnischen Verbesserungen vor allem die Behandlung der Interaktion zwischen Fahrzeugen auf benachbarten Spuren (Spurwechselverhalten).

Bei der hier angewandten zeitorientierten Simulations-technik wird jedes in der simulierten Untersuchungs-strecke befindliche Fahrzeug in starrem Zeittakt (1 sek) auf seine momentane Konstellation zu den Nachbarfahrzeugen hin überprüft. Aufgrund der er-mittelten kinematischen Daten und der Wunschvorstel-lung der simulierten Fahrer wird das für den nächsten Zeitabschnitt gültige Fahrverhalten hinsichtlich der Spurwahl und der Geschwindigkeit festgelegt. Nach-dem als Ergebnis der Behandlung aller auf dem betrach-

teten Streckenabschnitt befindlichen Fahrzeuge die Beschleunigungen bzw. Verzögerungen und eventuelle Spurwechselabsichten zur Verfügung stehen, werden die Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten am Ende dieses Zeitintervalls ermittelt, und es folgt die erneute Bestimmung des Fahrverhaltens. Außerdem muß während jedes Zeitschrittes überprüft werden, ob Fahrzeuge in die Simulationsstrecke einfahren oder diese verlassen.

Genau wie der Bewegungsablauf, so ist auch dessen Beobachtung zu simulieren, wobei sowohl momentane als auch lokale und räumlich-zeitliche Messungen ohne Schwierigkeiten nachgeahmt werden können. Das Grundschema der Simulation und die zeitliche Auffeinanderfolge der zu durchlaufenden Programmteile verdeutlicht das in Abb. 1 dargestellte vereinfachte Ablaufschema.

3.2 Äußere Bedingungen

Die Simulationsstrecke ist eine zweispurige Richtungsfahrbahn mit idealen Bedingungen in dem Sinne, daß das Fahrverhalten der einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Elemente nicht durch spezielle Eigenschaften der Straße beeinflußt wird. Das bedeutet im einzelnen, daß keine Steigungen oder Krümmungen vorhanden sind, ausgezeichnete Sichtbedingungen vorherrschen und keine Witterungseinflüsse auf die Fahrweise einwirken.

Die Länge der Simulationsstrecke ist eine variable Größe, die den Erfordernissen der Untersuchungen ent-

sprechend gewählt werden kann. Sie wird lediglich durch die verfügbare Kernspeicherkapazität der Rechenanlage begrenzt, aus der sich die maximal mögliche Anzahl gleichzeitig auf der Strecke befindlicher Fahrzeuge ableitet. Für jedes dieser Fahrzeuge muß eine Reihe von Speicherplätzen zur Aufnahme aller fahrzeugbeschreibenden Informationen reserviert werden.

3.3 Erzeugung von Fahrer-Fahrzeug-Elementen

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ließ es nicht sinnvoll erscheinen, Kenndaten für die einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Elemente aus Beobachtungen des realen Verkehrsablaufs aufzubereiten und direkt als Eingabegrößen in das Modell einzubringen. Zum einen wird es nur in den seltensten Fällen möglich sein, Verhältnisse zu beobachten, bei denen die Parameter der ablaufenden Prozesse auch über längere Zeit hinweg konstant bleiben. Zum anderen sind die spezifischen Kenngrößen der Fahrer-Fahrzeug-Elemente entweder überhaupt nicht direkt meßbar (z.B. Merkmale, die das Fahrverhalten charakterisieren) oder zumindest nicht für alle beobachteten Fahrzeuge bestimmbar (z.B. Wunschgeschwindigkeit von behinderten Fahrzeugen). Daher werden sämtliche Kenngrößen zur Beschreibung der Verhaltensweise der Fahrer und der Eigenschaften der Fahrzeuge mit Hilfe eines besonderen Modellteils aus vorgegebenen Verteilungsfunktionen erzeugt. Diese vorgegebenen Verteilungsfunktionen basieren auf umfangreichen empirischen Untersuchungen, die im Rahmen eigener und fremder For-

schungsarbeiten durchgeführt wurden (z.B. TODOSIEV 1963, MICHAELS 1965).

Die Festlegung des Zeitpunktes, zu dem ein neues Fahrzeug in die Simulationsstrecke einfährt, geschieht über die vorgegebene Verteilungsfunktion der Zwischenzeiten am Anfangsquerschnitt. Da über die Verteilung der Zwischenzeiten bei einspurigem Verkehr ausführliche Erkenntnisse vorliegen (z.B. SCHUHL 1955, CHIMINI und DAWSON 1968), wäre es zunächst naheliegend, die Zwischenzeiten für Fahr- bzw. Überholspur getrennt zu ermitteln. Dies würde aber vorauszusetzen, daß die jeweiligen Anteile der beiden Spuren an der Gesamtverkehrsstärke vorzugeben wären. Die Aufteilung auf die Spuren ist jedoch nicht unabhängig von den Parametern des jeweils untersuchten Verkehrsablaufs. Die Ermittlung dieser Abhängigkeiten ist aber eines der Untersuchungsziele, was wiederum zur Bedingung macht, daß die Verhältnisse am Anfangsquerschnitt einerseits möglichst wenig Einfluß auf den Verkehrsablauf der anschließenden Simulationsstrecke haben, andererseits bei allen Parameterkombinationen nach denselben Vorschriften geregelt werden sollten.

Diese Überlegungen führten zur Verwendung einer für beide Spuren gemeinsamen Verteilungsfunktion der Zwischenzeiten am Anfangsquerschnitt. Es wurde von exponential verteilten Zwischenzeiten ausgegangen, wie sie bei freiem, über die Zeit stationärem Verkehrsablauf zu erwarten sind. Der Parameter der Verteilung wird durch die gewünschte Verkehrsstärke bestimmt, die entweder für die gesamte Simulationszeit

konstant vorgegeben oder in beliebigen Zeitabschnitten variiert werden kann.

Die Wahl der zur Einfahrt in die Simulationsstrecke benutzten Spur wird im vorliegenden Modell aufgrund der momentanen Konstellation der bereits vorher eingefahrenen Fahrzeuge getroffen. Erlaubt die Verkehrslage einem Fahrer, sich unbehindert auf der Fahrspur zu bewegen, so schreibt das Rechtsfahrgebot der StVO die Benutzung der Fahrspur zwingend vor. Der bei größeren Verkehrsstärken häufiger auftretende Fall, daß beide Spuren durch vorausfahrende Fahrzeuge derart belegt sind, daß das soeben erzeugte Fahrzeug sich auf keiner der beiden Spuren unbehindert bewegen könnte, erfordert zusätzliche Überlegungen. Da die Überholspur wegen des Rechtsfahrgebotes im allgemeinen nur von Fahrzeugen benutzt wird, die gerade im Begriff sind, langsamere Fahrzeuge zu überholen, und da das Bedürfnis zu überholen eine Folge unterschiedlicher Wunschgeschwindigkeiten ist, werden die auf der Überholspur zu beobachtenden Wunschgeschwindigkeiten im Mittel größer sein als auf der Fahrspur. Diese "Entmischung" des Fahrzeugkollektivs wird bereits beim Einfahrvorgang berücksichtigt: Ein einfahrendes Fahrzeug benutzt die Fahrspur, wenn seine Wunschgeschwindigkeit kleiner ist als die des Vorausfahrenden. Hat das gerade einfahrende Fahrzeug dagegen eine größere Wunschgeschwindigkeit als das auf der Überholspur vorausfahrende, so benutzt es ebenfalls die Überholspur. Bei allen übrigen Konstellationen wählt der einfahrende Fahrer jene Spur, die ihm die höhere Fahrgeschwindigkeit erlaubt. Eine anschauliche Übersicht über die zur Spurwahl führenden Entscheidungen gibt das Ablaufdiagramm, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist.

Die erzeugten Fahrer-Fahrzeug-Elemente sind mit Kenngrößen auszustatten, die einerseits die Verhaltensweise des Fahrers und andererseits die Eigenschaften seines Fahrzeugs charakterisieren. Es sind dies

- die (μ, σ) -normalverteilte Wunschgeschwindigkeit, die Fahrerwünsche, Fahrzeugvermögen, Streckencharakteristik und die geltende Rechtsvorschrift (z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeit) impliziert;
- eine $(0.5, 0.16)$ -normalverteilte Kenngröße, die dem unterschiedlichen Sicherheitsbedürfnis Rechnung trägt;
- eine $(0.5, 0.16)$ -normalverteilte Kenngröße, die unterschiedliche Wahrnehmungsschwellen und unterschiedliches Schätzvermögen berücksichtigt;
- eine $(0.5, 0.16)$ -normalverteilte Kenngröße, mit deren Hilfe die Unterschiede des Beschleunigungs- und Bremsvermögens der Fahrzeuge nachgebildet werden und die impliziert, welchen Gebrauch der einzelne Fahrer davon macht;
- eine $(0.5, 0.16)$ -normalverteilte Kenngröße, mit der die untersten Schwellwerte der noch möglichen Kontrolle des Gaspedals zum Ausdruck gebracht werden.

Die Verteilung der Wunschgeschwindigkeit eines realen Fahrzeugkollektivs ist zwar a priori nur für den Fall des absolut freien Verkehrs meßbar (JACOBS 1970); die bei geringen Verkehrsstärken zu beobachtende gute Übereinstimmung gemessener Geschwindigkeiten mit der Normalverteilung spricht aber dafür, daß auch die Wunschgeschwindigkeiten normalverteilt sind. Fahrzeugart und Verkehrsregelung schlagen sich in unterschiedlichen Parametern der Verteilung nieder. Inwieweit einzelne Fahrer ihre Wunschvorstellung bezüglich der einzuhaltenden Geschwindigkeit aufgrund der jeweiligen Verkehrslage revidieren, ob extreme Wunschgeschwindigkeiten unter dem Eindruck großer Verkehrsdichte zeitweilig in Richtung eines mittleren Verhaltens des Fahrzeugstromes angepaßt werden, oder ob erlittene "Verspätungen" zur Erhöhung der Wunschgeschwindigkeit führen, ist bisher nicht nachweisbar. Im Simulationsmodell werden daher normalverteilte, über die Strecke und damit auch über die Zeit konstante Wunschgeschwindigkeiten angenommen, deren Mittelwert und Standardabweichung variable, bei jedem Simulationslauf vorzugebende Größen sind.

Das mit allen seinen Kenngrößen ausgerüstete Fahrer-Fahrzeug-Element muß beim Einfahren sofort dem auf der Strecke gültigen Verhaltensmodell unterworfen werden, damit seine aktuelle Position und Geschwindigkeit der vorliegenden Konstellation zum vorausfahrenden Fahrzeug angepaßt werden können. Für den Fall, daß kein Einfluß durch dieses Fahrzeug besteht, fährt das neue Fahrzeug mit seiner Wunschgeschwindigkeit in die Simulationsstrecke ein. Andernfalls wird ihm eine Geschwindigkeit zugewiesen, die einen

gefährlosen Annäherungsvorgang erlaubt. Kommt es infolge hoher Verkehrsbelastung zu Rückstauerscheinungen in der Nähe des Einfahrtquerschnittes, dann wird das einfahrende Fahrzeug auf den Mindestabstand zu seinem Vordermann positioniert und erhält dessen aktuelle Geschwindigkeit. Überschreitet der Rückstau eine Länge von 100 m vor dem Einfahrtquerschnitt, so wird die Erzeugung neuer Fahrer-Fahrzeug-Elemente durch Einschaltung einer zusätzlichen Zwischenzeit (3 sek) für eine gewisse Zeitspanne unterdrückt.

3.4 Beobachtung von Fahrer-Fahrzeug-Elementen

Da die Beobachtung ebenso wie der Verkehrsablauf selbst simuliert werden muß, die dafür benötigten Programmteile aber ebenfalls einen Teil der Kernspeicherkapazität beanspruchen, liegt der Gedanke nahe, die Simulationen des Bewegungsablaufs und der Beobachtung durch getrennte Programme nacheinander auszuführen. Dazu müßten nach jedem Rechenschritt die interessierenden aktuellen Bewegungsgrößen (das sind im wesentlichen Position und Geschwindigkeit aller Fahrzeuge auf der Simulationsstrecke) auf einem externen Datenträger zwischengespeichert werden. Für die Aufnahme sequentiell anfallender Datenmengen bietet sich beispielsweise die Verwendung von Magnetbändern an, deren Speicherkapazität außerordentlich groß ist. Jedoch sind einer solchen Arbeitsweise ebenfalls verhältnismäßig enge Grenzen gesetzt, die sich aus der Leistungsfähigkeit der Übertragungskanäle zwischen der Zentraleinheit der Rechenanlage und dem externen Speichermedium ableiten.

Die zu übertragende Datenmenge lässt sich nur dann erheblich reduzieren, wenn man auf die fahrzeugscharfe Dokumentation des simulierten Bewegungsablaufes verzichtet und stattdessen gewisse Fahrzeugkollektive zusammenfaßt, deren Meßwerte nur summarisch festgehalten werden. Die Bildung solcher Fahrzeugkollektive geschieht wie bei realen Messungen durch die Wahl eines konstanten Beobachtungs-Zeitintervalls und durch die Angabe einer beliebigen Anzahl von Meßquerschnitten, die die Simulationsstrecke in eine Reihe von Wegintervallen (Meßstrecken) aufteilen. Auf diese Weise wird der simulierte Ausschnitt des Zeit-Weg-Systems mit einem Raster überzogen, das die zu beobachtenden Fahrzeuggruppen voneinander trennt (Abb. 3). Neben den Intervallmessungen besteht die Möglichkeit, Beobachtungswerte über die gesamte Simulationszeit hinweg zu akkumulieren, um globale Aussagen über den simulierten Verkehrsablauf machen zu können.

Die vorgesehenen Beobachtungsverfahren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a.) Messungen in konstanten Zeitintervallen:

- momentane Messungen auf den Meßstrecken, die durch die Wahl der Meßquerschnitte festgelegt sind,
- lokale Messungen an den gewählten Querschnitten,

- räumlich-zeitliche Messungen in den Ausschnitten des Zeit-Weg-Systems, die durch die Wahl der Meßquerschnitte und des Beobachtungsintervalls festgelegt sind.

Die lokalen und räumlich-zeitlichen Meßdaten werden während eines Beobachtungsintervalls im Kernspeicher akkumuliert und am Ende des Meßintervalls zusammen mit den momentanen Meßdaten auf einem externen Medium zwischengespeichert. Die Auswertung der Intervallmessungen erfolgt durch ein oder mehrere getrennte Programme im Anschluß an den Simulationslauf.

b.) Globale Messungen über die gesamte Simulationszeit:

- lokale Messungen wie unter a.),
- räumlich-zeitliche Messungen wie unter a.).

Die globalen (lokalen bzw. räumlich-zeitlichen) Meßdaten werden vom Meßbeginn an über die ganze Simulationszeit im Kernspeicher akkumuliert und am Ende des Simulationslaufes ausgewertet.

Während der Testphase von Simulationsprogrammen ist es unerlässlich, das Verhalten der einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Elemente detailliert nachzuverfolgen. Einen guten Überblick über die Gesamtverkehrssituation eines Streckenabschnitts verschaffen Zeit-Weg-Diagramme. Sie erleichtern neben der Fehlersuche im Teststadium

auch die Ergebnisinterpretation bei Produktionsläufen. Es wurde daher die Möglichkeit geschaffen, in jedem Simulationslauf ein Zeit-Weg-Diagramm mit einem Auflösungsvermögen von 1 sec und 5 m über einen frei wählbaren Ausschnitt des simulierten Zeit-Weg-Systems anfertigen zu lassen.

3.5 Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug-Elementen

In Übereinstimmung mit WIEDEMANN (1974) werden beim Entscheidungsprozeß des Fahrers grundsätzlich zwei Situationen unterschieden. Solange das Fahrverhalten im wesentlichen von den Eigenschaften der Straße (z.B. Linienführung, Fahrbahnbeschaffenheit), des Fahrzeugs (z.B. Beschleunigungsvermögen, Maximalgeschwindigkeit) und des Fahrers (z.B. Temperament, Fahrkönnen) abhängt, wird vom "unbeeinflußten Fahren" gesprochen. Kommt zu den genannten Einflußfaktoren noch das Vorhandensein anderer Verkehrsteilnehmer, auf deren Verhalten die eigene Fahrweise abzustimmen ist, so handelt es sich um "beeinflußtes Fahren".

Das Verhalten beim unbeeinflußten Fahren wird im Simulationsmodell gesteuert durch die Wunschgeschwindigkeit, die ein Fahrer einzuhalten versucht. In dieser Kenngröße sind alle subjektiven und objektiven Gründe zusammengefaßt, die einen Fahrer veranlassen, eine bestimmte Geschwindigkeit anzustreben und diese auch bei völlig unbeeinflußtem Fahren nicht wesentlich zu überschreiten.

Im Zustand des beeinflußten Fahrens hat ein Fahrer bei

mehrspurigem Verkehr prinzipiell zwei Möglichkeiten, seine Fahrweise der momentanen Verkehrslage anzupassen: entweder wird er sein Verhalten auf die unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeuge der eigenen Spur ausrichten, oder er wird auf die benachbarte Spur ausweichen, um dort eventuell seinen in der Wunschgeschwindigkeit ausgedrückten Zielvorstellungen näher zu kommen. Auch im zweiten Fall wird er sein Verhalten mit den Verhältnissen auf der neuen Spur in Einklang zu bringen haben. Im folgenden soll daher zunächst die Interaktion zwischen Fahrzeugen auf derselben Spur bei fehlender Überholmöglichkeit bzw. im Anschluß an einen Spurwechsel behandelt werden, bevor das Spurwechselverhalten diskutiert wird.

3.5.1 Interaktion bei Überholunmöglichkeit

Das vorliegende Simulationsmodell behandelt die Interaktion zwischen Fahrzeugen auf derselben Spur in enger Anlehnung an das von WIEDEMANN (1974) entwickelte und ausführlich beschriebene Modell des einspurigen Verkehrsablaufs. Die Erläuterung der Vorgehensweise kann sich daher auf eine kurze Darstellung der wesentlichen Abläufe beschränken.

Ist der Abstand zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug so groß oder die entsprechende Geschwindigkeitsdifferenz so klein, daß der Fahrer zwar seinen Vordermann erkennt, die Annäherung jedoch unterhalb seiner Wahrnehmungsschwelle bleibt, so ist seine Geschwindigkeitswahl unabhängig von der des Vorausfahrenden. Die Fahrweise ist unbeeinflußt; die aktuelle Geschwindig-

keit entspricht etwa der Wunschgeschwindigkeit, oder der Fahrer strebt diese durch positive Beschleunigung an.

Wird die Wahrnehmungsschwelle überschritten, so beginnt der Fahrer, seine Geschwindigkeit der des Vordermanns anzugeleichen und den Abstand anzustreben, mit dem er dem vorausfahrenden Fahrzeug entsprechend dessen Geschwindigkeitsniveau folgen wird. Der Annäherungsvorgang ist dann beendet, wenn die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrzeugen so klein geworden ist, daß der Fahrer Relativbewegungen nicht mehr wahrnehmen kann.

Das Verhalten beim Folgevorgang zeichnet sich durch Pendelbewegungen um einen bestimmten Abstand aus. Dabei liegen die ausgeführten Beschleunigungen und Verzögerungen an der untersten Schwelle noch steuerbarer Gaspedalbetätigung. Die Pendelbewegung entsteht aus der Unfähigkeit, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs exakt zu kontrollieren, in Verbindung mit dem fehlenden Wahrnehmungsvermögen für kleinste Geschwindigkeitsdifferenzen. Als Folge unterschiedlicher Lage der Wahrnehmungsschwellen für positive und negative Geschwindigkeitsdifferenzen ist im allgemeinen ein Abtriftvorgang zu beobachten, währenddessen sich der Folgeabstand allmählich vergrößert. Dieses Abtriften vom eigentlich angestrebten Folgeabstand wird dem Fahrer zunächst nicht bewußt und daher oft erst bei deutlich größerem Abstand korrigiert.

Die verschiedenen Zustandsformen der Relativbewegung zwischen zwei Fahrzeugen veranschaulicht eine Darstellung in der $\Delta x - \Delta v$ - Ebene (Abb. 4 a).

3.5.2 Spurwechselverhalten

Randbedingungen der Spurwahl sind auf der einen Seite die Absicht des Fahrers, seine Zielvorstellungen - ausgedrückt in dem Wunsch, eine bestimmte Reisegeschwindigkeit einzuhalten - gegebenenfalls durch Spurwechsel zu realisieren, auf der anderen Seite die momentane Verkehrssituation, ausgedrückt durch Position und Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der unmittelbaren Umgebung, die seinen Bewegungsmöglichkeiten gewisse Grenzen setzen.

Solange sich ein Fahrzeug auf der rechten Spur befindet, und der Fahrer seine Fahrweise völlig unabhängig von vorausfahrenden Fahrzeugen wählen kann, besteht selbstverständlich kein Grund für einen Spurwechsel. Ein Spurwechselwunsch kann erst dann auftreten, wenn ein vorausfahrendes langsameres Fahrzeug die Freizügigkeit einzuschränken beginnt. Im Simulationsmodell wird dementsprechend angenommen, daß ein latenter Spurwechselwunsch vorhanden ist, solange sich ein Fahrer im Einflußbereich des Vorausfahrenden befindet.

Die Entscheidung darüber, ob der gewünschte Spurwechsel auch tatsächlich durchgeführt werden kann, hängt im wesentlichen von der Verkehrssituation auf der Nachbarspur ab. Nur in zwei relativ seltenen Fällen, die aber bei der Simulation nicht vernachlässigt werden dürfen, kann es vorkommen, daß ein Spurwechselwunsch allein wegen der augenblicklichen Konstellation auf der eigenen Spur nicht akut werden kann.

Der eine Fall tritt dann auf, wenn der momentane Abstand zum Vordermann durch irgendeinen Umstand, z.B. infolge einer scharfen Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs, so klein geworden ist, daß das Sicherheitsbedürfnis des Fahrers eine unverzügliche Reaktion verlangt. In einer solchen Situation wird der Spurwechselwunsch zurückgestellt. Im Simulationsmodell hat die unmittelbare Reaktion auf den Vordermann absoluten Vorrang, solange der minimale Folgeabstand unterschritten ist. Diese Vorschrift verhindert Spurwechsel, die fahrdynamisch unangenehm, gefährlich oder gar unmöglich wären.

Der andere Fall kann vorkommen, wenn Fahrer mit annähernd gleichen Wunschgeschwindigkeiten hintereinander herfahren. Würde sich der zweite Fahrer zum Spurwechsel entschließen, dann wären beide Spuren unter Umständen sehr lange blockiert. Um dies zu vermeiden und sicherzustellen, daß nur überholt, wer mit wesentlich höherer Geschwindigkeit fährt als der zu Überholende (StVO, § 5, Abs. 2), wird ein Spurwechselwunsch im Simulationsmodell erst dann akut, wenn die Wunschgeschwindigkeit um mehr als zufällige Schwankungen (ca. 6 km/h) unterschritten ist. Mit dieser Regelung wird außerdem eine bei Messungen (HOHLE 1974) beobachtete Verhaltensweise nachgebildet, die darin besteht, daß der Spurwechsel oftmals später eingeleitet wird als der entsprechende Verzögerungsvorgang bei Überholunmöglichkeit.

Im Normalfall hängt die Entscheidung, ob ein gewünschter

Spurwechsel tatsächlich vollzogen werden kann, von der aktuellen Fahrzeugkonstellation auf der Nachbarspur ab. Maßgebend sind dabei das unmittelbar vorausfahrende und das nachfolgende Fahrzeug. Im Modell wird davon ausgegangen, daß die Fahrer Abstände und Geschwindigkeitsdifferenzen zu Fahrzeugen auf der Nachbarspur, die sich nach einem Spurwechsel einstellen würden, in der gleichen Weise beurteilen wie ihre Beziehung zum Vorausfahrenden vor dem Spurwechsel.

Demnach unterbleibt ein Spurwechsel generell, wenn er in den Einflußbereich des neuen Vordermanns führen würde. Es wird unterstellt, daß der Spurwechsel in einem solchen Fall keinen Vorteil mit sich bringen würde. Darin liegt sicherlich eine Vereinfachung, denn man kann sich durchaus Situationen vorstellen, in denen ein Spurwechsel trotz neuerlicher Beeinflussung letztlich doch zu schnellerem Vorwärtskommen führen würde.

Ebenso unterbleibt ein Spurwechsel, wenn dadurch der Einflußbereich des auf der Nachbarspur folgenden Fahrzeugs tangiert würde. Auch diese Modellvorstellung entspricht nicht vollständig der auf Autobahnen zu beobachtenden Fahrpraxis. Sie folgt jedoch den Vorschriften der Verkehrsordnung und trägt außerdem zu einer Beruhigung des simulierten Verkehrsablaufs bei. Sie kompensiert damit teilweise eine Neigung des Simulationsmodells, in kritischen Situationen als Folge des in diskreten Zeitschritten ablaufenden Entscheidungsprozesses Überreaktionen zu erzeugen.

Fahrzeugkonstellationen, die ein Fahrer während der Fahrt beobachtet, haben immer eine ganz bestimmte Entwicklungstendenz, die sich aus den aktuellen Abständen und Geschwindigkeitsunterschieden sowie den individuellen Beschleunigungen bzw. Verzögerungen zwangsläufig ergibt. Da ein Fahrer laufend das Geschehen in seiner Umgebung beobachtet und den zeitlichen Ablauf der Vorgänge registriert, hat er die Möglichkeit, nicht nur die momentane Situation, sondern auch deren Entstehungsgeschichte und vermutliche Weiterentwicklung in seine Entscheidungen einfließen zu lassen. Dies ist jedoch bei der Simulation des Verkehrsflusses im allgemeinen nicht ohne verhältnismäßig großen Programm- und Speicherplatzaufwand nachzuvollziehen. Außerdem würde die Quantifizierung solcher praktisch kaum messbarer Einflüsse enorme Schwierigkeiten bereiten. Dennoch soll im Rahmen des vorliegenden Simulationsmodells versucht werden, diesen dynamischen Aspekt der Verkehrssituation in den Entscheidungsmechanismus bei der Spurwahl einzubeziehen.

Neben dem Zustand aktueller Beeinflussung durch die Fahrzeuge der unmittelbaren Umgebung - abgegrenzt durch den maximalen Folgeabstand und die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen - sollen die Fahrer einen Bereich potentieller Beeinflussung abschätzen können. Dieser Zustand soll dadurch gekennzeichnet sein, daß ein Fahrer zwar im Augenblick der Entscheidung seine Fahrweise noch nicht unmittelbar auf das Bezugsfahrzeug einzurichten braucht, z.B. weil er die momentane Geschwindigkeitsdifferenz nicht genau einzuschätzen vermag, aber aufgrund seiner Er-

fahrungen vermuten muß, daß sich die Situation in naher Zukunft zu seinen Ungunsten entwickeln wird. Als Grenzen des potentiellen Einflußbereichs dienen Vielfache des Folgeabstandes bzw. der Wahrnehmungsschwelle (Abb. 4b).

Würde ein Spurwechsel weder in den aktuellen noch in den potentiellen Einflußbereich eines Nachbarfahrzeugs führen, so kann er generell sofort vollzogen werden, wenn der entsprechende Wunsch akut wird (Abb. 5). Dagegen wird ein Spurwechsel in einen potentiellen Einflußbereich erst dann ausgeführt, wenn zusätzliche Kriterien erfüllt sind, die eine besondere Dringlichkeit oder Nützlichkeit des Spurwechsels anzeigen. So wird dem neuen Hintermann eine potentielle Reaktion nur zugemutet, wenn die momentane Geschwindigkeit des Spurwechselnden erheblich unter seiner Wunschgeschwindigkeit liegt. Die gleiche Voraussetzung muß erfüllt sein, damit sich ein Fahrer in den potentiellen Einfluß des neuen Vordermanns begibt. Überdies kommt ein solcher Spurwechsel nur dann in Frage, wenn der neue Vordermann erheblich schneller fährt als der alte, wenn sich also trotz möglicher Behinderung die Chance ergibt, schneller vorwärts zu kommen als auf der bisherigen Spur.

Das Fahrverhalten auf der linken Spur unterscheidet sich insofern grundsätzlich von dem auf der rechten Spur, als die Straßenverkehrsordnung das Fahren auf der Überholspur, wie deren Name schon sagt, nur zum Zweck des Überholens gestattet. Demnach kommt auf der linken Spur in der Regel das Rechtsfahrgesetz als Motiv für einen Spurwechsel in Frage. Spurwechsel

zum Zweck des Rechtsüberholens sind nur in ganz seltenen Fällen zu erwarten, wobei die für das Rechtsvorbeifahren geltenden Einschränkungen zu beachten sind. Dem unterschiedlichen Spurwechselmotiv entsprechend ist das Entscheidungsmodell für den Spurwechsel nach rechts anders aufgebaut als das für den Spurwechsel nach links (Abb. 6).

Wegen des Rechtsfahrgebots muß ein Fahrer auf der Überholspur eigentlich ständig einen latenten Spurwechselwunsch besitzen. Demgegenüber steht die Absicht, so schnell wie möglich vorwärtszukommen. Also scheidet ein Spurwechsel nach rechts immer dann aus, wenn das spurwechselnde Fahrzeug dadurch in einen aktuellen oder in einen potentiellen Einflußbereich geriete. Nur wenn die Aussicht besteht, anschließend eine gewisse Zeit frei weiterfahren zu können, ist ein Spurwechsel überhaupt in Betracht zu ziehen. Falls diese Voraussetzung erfüllt ist, muß zunächst geprüft werden, ob das soeben überholte Fahrzeug durch das Wiedereinscheren nach rechts behindert würde. Solange dies zutrifft, kommt ein Spurwechsel nicht in Frage. Auch eine potentielle Beeinflussung wird dem neuen Hintermann im allgemeinen nicht zugemutet, es sei denn, das Folgefahrzeug auf der Überholspur drängt auf einen baldigen Spurwechsel. Im Modell wird derartiges Verhalten des Hintermanns charakterisiert durch die Kombination einer hohen Wunschgeschwindigkeit mit verhältnismäßig dichtem Auffahren auf den Vordermann.

Aber auch das auf der Überholspur vorausfahrende Fahrzeug kann unter Umständen für die Spurwahl mit-

entscheidend sein. Befindet sich ein links fahrendes Fahrzeug nämlich im Einflußbereich des Vordermanns, so scheidet ein Spurwechsel solange aus, bis der Vordermann seinerseits wieder nach rechts eingeschert und vom betrachteten Fahrzeug überholt worden ist. Das gleiche Verhaltensmuster gilt im Modell auch für einen Fahrer im potentiellen Einflußbereich mit der Ausnahme, daß er einem drängenden Folgefahrzeug in dieser Situation ohne allzugroße Nachteile Platz machen kann.

Ein Spurwechsel dauert im Mittel etwa 3 Sekunden, wie bei früheren Beobachtungen festgestellt wurde (HÖLSKEN 1965). Während dieser Zeit benötigt das spurwechselnde Fahrzeug beide Spuren als Manövrierverfläche. Im Simulationsmodell wird dieser Sachverhalt in der Weise nachgebildet, daß ein Fahrzeug während der ersten beiden Sekundenschritte nach der Spurwechselentscheidung sowohl die Fahrspur, als auch die Überholspur belegt. Das bedeutet z.B. für einen Spurwechsel nach links, daß das auf der Überholspur nachfolgende Fahrzeug vom Zeitpunkt der Entscheidung zum Spurwechsel an, seinen neuen Vordermann kennt, daß aber die Fahrspur erst 2 Sekunden danach für den dort folgenden Hintermann frei wird.

4. Programmierung des Simulationsmodells

4.1 Kenndaten der Fahrer-Fahrzeug-Elemente

Bei der Einfahrt in die Simulationsstrecke werden jedem Fahrer-Fahrzeug-Element eine Reihe von Kenndaten zugeordnet und auf dem jeweils nächsten freien Platz in entsprechenden Listen registriert. Dort verbleiben die Kenngrößen während des gesamten Fahrtverlaufs und werden erst wieder gelöscht, wenn das Fahrzeug die Untersuchungsstrecke verlassen hat. Während des Rechengangs sind also alle Kenndaten eines Fahrzeugs auf der gleichbleibenden Position (I) in den Datenlisten gespeichert; (I) dient sozusagen als Kennzeichen des Fahrzeugs.

Unveränderliche Kenngrößen der Fahrer-Fahrzeug-Elemente sind:

- $W(I)$ Wunschgeschwindigkeit (m/sec);
- $Z_1(I)$ Maß für das Sicherheitsbedürfnis des Fahrers:
 $Z_1 = 1.0$ Fahrer mit sehr starkem,
 $Z_1 = 0.0$ Fahrer mit sehr geringem Sicherheitsbedürfnis;
- $Z_2(I)$ Maß für das Schätzvermögen des Fahrers:
 $Z_2 = 1.0$ sehr gutes,
 $Z_2 = 0.0$ sehr schlechtes Schätzvermögen;

- Z3(I) Maß für das Beschleunigungs- und Bremsvermögen des Fahrzeugs:
Z3 = 1.0 sehr gutes,
Z3 = 0.0 sehr schlechtes Bremsvermögen;
- Z4(I) Maß für die Unfähigkeit, sehr kleine Beschleunigungen zu realisieren:
Z4 = 1.0 sehr ungenaue,
Z4 = 0.0 exakte Kontrolle des Gaspedals;
- L(I) Fahrzeuglänge (m), einschließlich eines Mindestnettoabstandes (1.0 m) beim Stillstand.

Veränderliche Kenngrößen geben den jeweiligen Zustand des betrachteten Fahrzeugs an:

- S(I) Benutzter Fahrstreifen:
S = 1 Fahrspur,
S = 2 Überholspur;
- X(I) Wegkoordinate (m) bei Beginn des laufenden Zeitschritts;
- V(I) Geschwindigkeit (m/sec) bei Beginn des laufenden Zeitschritts;
- B(I) Mittlere Beschleunigung (m/sec^2) während des laufenden Zeitschritts;

- DX(I) Abstand (m) zum Vorausfahrenden auf der gleichen Spur bei Beginn des laufenden Zeitschritts;
- DV(I) Geschwindigkeitsdifferenz (m/sec) zum Vorausfahrenden auf der gleichen Spur bei Beginn des laufenden Zeitschritts;

- RV(I) Interaktionszustand:

RV	Interaktionszustand
o	unbeeinflußtes Fahren (WUNSCH) seit mindestens einem Zeitschritt,
1	unbeeinflußtes Fahren (WUNSCH) erstmals im laufenden Zeitschritt,
2	Folgevorgang (FOLGEN),
3	Folgevorgang (FOLGEN) mit erhöhter Reaktionsbereitschaft,
>3	beeinflußtes Fahren (BREMSBX bzw. BREMSAX) seit k Sekunden; k = RV - 3;

- RS(I) Zeitspanne (sek), die seit der letzten Spurwechselentscheidung bis zum Beginn des laufenden Zeitschritts vergangen ist;
- BR(I) Boole'sche Größe, die Aufschluß darüber gibt, wie stark das unmittelbar vorausfahrende Fahrzeug bremst:
 $BR = \begin{cases} \text{TRUE} & \text{der Vordermann bremst} \\ & \text{so stark, daß seine} \\ & \text{Bremslichter aufleuchten,} \end{cases}$

BR = FALSE die Bremslichter des
Vorausfahrenden leuch-
ten nicht auf.

Die räumlich geordnete Aufeinanderfolge der Fahrzeuge wird in der Indexliste (IND) gespeichert. Sie enthält, nach abnehmenden Wegkoordinaten geordnet, die Kennzeichen aller momentan auf der Simulationsstrecke befindlichen Fahrzeuge. Die Einführung der Indexliste erspart eine Reihe von Datenbewegungen im Speichersystem und verringert damit den Rechenzeitbedarf.

Die Verknüpfung der Indexliste mit den Kenndatenlisten ist in Abbildung 7 dargestellt. Auf dem n-ten Platz der Indexliste steht der Index (das Kennzeichen), unter dem die Kenndaten des i-ten Fahrzeugs abgespeichert sind. Man ersieht außerdem, welche Kenngrößen während der Simulation von den verschiedenen Programmteilen benötigt werden, und an welcher Stelle Veränderungen dieser Größen stattfinden. Abbildung 8 zeigt am Beispiel verschiedener Vorgänge, in welcher Weise die Belegung der Simulationsstrecke in der Indexliste repräsentiert wird. Die beiden Zeiger (NA) und (NE) geben zu jedem Zeitpunkt das erste (NA) bzw. das letzte (NE) Fahrzeug auf der Strecke an (Zählung entgegen der Fahrtrichtung).

Der erforderliche Umfang der Kenndatenlisten richtet sich nach der maximalen Anzahl (NMX) gleichzeitig auf der Simulationsstrecke befindlicher Fahrzeuge. Zur Abschätzung dieser Zahl verlangt das Programm die Eingabe eines Erwartungswertes KMAX (Fhz/km) für die

maximale Verkehrsdichte und berechnet NMX zu

$$NMX := KMAX * \frac{LSIM}{1000} + RES$$

mit LSIM = Länge der Simulationsstrecke (m),
RES = 30 = Reserve.

4.2 Erzeugen und Löschen von Fahrer-Fahrzeug-Elementen, Programmteile INPUT und OUTPUT

Während eines jeden Zeitschritts muß einmal festgestellt werden, ob ein oder mehrere Fahrzeuge in die Simulationsstrecke einfahren sollen (Programmteil INPUT). Die Häufigkeit der Einfahrten richtet sich nach dem vorzugebenden Erwartungswert für die Verkehrsstärke am Einfahrtquerschnitt, aus der sich die mittlere Zwischenzeit der Fahrzeugeinfahrten ergibt. Wie die zeitliche Aufeinanderfolge der Fahrzeuge beim Eintritt in die Simulationsstrecke vom Programm im einzelnen gesteuert wird, geht aus Abbildung 9 hervor.

Ist die Entscheidung getroffen, daß ein neues Fahrer-Fahrzeug-Element erzeugt werden soll, so ist noch festzustellen, ob in der Indexliste und damit in den Kenndatenlisten noch genügend Plätze frei sind (Abb. 10). Ist dies nicht der Fall, so bedeutet das, daß aufgrund eines unvorhergesehenen Ereignisses augenblicklich mehr Fahrzeuge auf der Strecke sind, als nor-

malerweise in diesem Simulationslauf auftreten dürften. Um in solchen Fällen die Programmausführung nicht ergebnislos abbrechen zu müssen, wird die Erzeugung zunächst einmal für eine gewisse Zeit (30 Sekunden) aufgeschoben.

Ob ein bestimmter Platz in den Kenndatenlisten frei ist, hängt vom Wert $S(I)$ ab:

$S(I) = 0$ der I-te Platz ist frei,
 $S(I) \neq 0$ der I-te Platz ist besetzt.

Die Nummer des nächsten freien Platzes wird im Programm durch den Zeiger INXT repräsentiert. Die Erzeugung der Kenn- und Zustandsgrößen bedarf hier über das in Abschnitt 3.3 Gesagte hinaus keiner weiteren Erläuterung.

Haben während eines Zeitschritts ein oder mehrere Fahrzeuge die Simulationsstrecke verlassen, so werden sie von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, indem lediglich der Zeiger NA auf der Indexliste verschoben, und der entsprechende Platz in den Kenndatenlisten freigegeben wird (Programmteil OUTPUT, Abb. 11). Dies geschieht einfach dadurch, daß der Wert $S(I)$ zu Null gesetzt wird.

4.3 Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozeß,
Programmteil DECS

4.3.1 Beteiligte Fahrzeuge

Den stärksten Einfluß auf die Fahrweise eines betrachteten Fahrzeugs (I) üben sicherlich die Fahrzeuge in der unmittelbaren Umgebung aus:

- (J1) das vorausfahrende auf der Fahrspur,
- (J2) das vorausfahrende auf der Überholspur,
- (K1) das nachfolgende auf der Fahrspur,
- (K2) das nachfolgende auf der Überholspur.

Im Programmteil DECS (Abb. 12) wird dafür gesorgt, daß vor jeder fälligen Entscheidung die jeweiligen Nachbarfahrzeuge wahrgenommen werden können. Ihre Kenn- bzw. Zustandsgrößen sind dabei über die Fahrzeugkennzeichen J1, J2, K1 und K2 zugänglich.

Es steht wohl außer Zweifel, daß ein Fahrer neben den unmittelbaren Nachbarfahrzeugen auch solche in seinen Entscheidungsprozeß einbezieht, die sich in einem weiteren Umfeld befinden, wenigstens solange er sie wahrnehmen kann. Bei der Simulation des Verkehrsablaufs wird diese Erscheinung immer nur sehr unvollständig nachgebildet werden können, da einerseits die vorgegebenen Leistungsgrenzen der Rechenanlagen zu gewissen Vereinfachungen zwingen und andererseits empirische Untersuchungen über den Einfluß der weiteren Umgebung bisher nicht vorliegen.
Das Simulationsprogramm berücksichtigt im allgemeinen

nur die unmittelbaren Nachbarfahrzeuge; lediglich über die Zustandsgrößen DX, DV und BR der vorausfahrenden Fahrzeuge sind einige Informationen über deren Vordermänner zugänglich (Position, Geschwindigkeit und Anzeige der Bremslichter).

4.3.2 Prozedur INTAC2

Den Kern des Programmteils DECS und damit des gesamten Simulationsprogramms bildet die Prozedur INTAC2. Hier fällt für jedes Fahrer-Fahrzeug-Element aufgrund der momentanen Konstellation zu den benachbarten Fahrzeugen die Entscheidung, welcher Fahrstreifen während des betrachteten Zeitschritts zu benutzen und mit welcher Beschleunigung bzw. Verzögerung auf die augenblickliche Verkehrssituation zu reagieren ist.

Die übergreifende Struktur des Unterprogramms zeigt Abbildung 13, aus der insbesondere hervorgeht, daß vor der Betrachtung des direkten Vordermanns zunächst die Beziehung zu den Fahrzeugen auf der Nachbarspur untersucht wird. Dies führt bei starker Verkehrsbelastung in den meisten Fällen zur schnellen Entscheidung, daß ein Spurwechsel schon deshalb nicht möglich ist, weil ein Nachbarfahrzeug auf etwa gleicher Höhe nebenher fährt. Außerdem wird ein Spurwechsel von vornherein ausgeschlossen, wenn seit der letzten Spurwechselentscheidung des betrachteten Fahrzeugs nicht eine bestimmte Mindestzeit (RSMIN) vergangen ist. Für RSMIN ist ein Wert von 7 Sekunden gewählt worden, da diese Zeitspanne

in praktisch allen vorkommenden Fällen notwendig ist, um eine beabsichtigte Überholung auch tatsächlich durchzuführen.

4.3.3 Interaktion zwischen Fahrzeugen auf derselben Spur

Wie in Abschnitt 3.5 bereits ausgeführt, wird die Interaktion zwischen einem betrachteten Fahrzeug und seinem unmittelbaren Vordermann weitgehend nach dem Wahrnehmungs- und Entscheidungsmodell von WIEDEMANN (1974) behandelt. Geringfügige zahlenmäßige Änderungen waren erforderlich, um auch sehr hohe Geschwindigkeiten (bis 180 km/h) und damit auch extreme Geschwindigkeitsdifferenzen zulassen zu können.

Je nach den augenblicklichen relativen Bewegungsgrößen und den verschiedenen Wahrnehmungsschwellen eines Fahrers wird zunächst sein momentaner Interaktionszustand ermittelt, und dann in den Unterprogrammen

- WUNSCH für unbeeinflußtes Fahren,
- FOLGEN für unbewußt beeinflußtes Fahren,
- BREMSBX für bewußt beeinflußtes Fahren,
- BREMSAX für Abwenden einer Gefahrensituation,

der entsprechende Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswert für den laufenden Zeitschritt errechnet. In Abbildung 14 sind die möglichen Interaktionszustände zusammen mit den Wahrnehmungsschwellen und den charak-

teristischen Abständen eines Fahrers dargestellt:

AX Bruttoabstand beim Stillstand:

$$AX = L(J) + Z1(I)$$

AX + BX Minimaler Brutto-Folgeabstand:

$$BX = (2 + 6 * Z1(I)) * \text{SQRT}(V)$$

SDX Grenzabstand für den Interaktionszustand
FOLGEN:

SDX = AX + EX * BX mit der Hilfsgröße

$$EX = 2 - Z2(I) + ZFN$$

SDV Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeits-
differenzen bei größeren Abständen:

$$SDV = \left(\frac{DX - AX}{CX} \right)^2 \text{ mit der Hilfsgröße}$$
$$CX = 20 * (1 + Z1(I) + Z2(I)) + 0,5 * V(I)$$

CLDV Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeits-
differenzen bei kleinen, abnehmenden Ab-
ständen ("Schließen"):

$$CLDV = SDV * EX^2$$

OPDV Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeits-
differenzen bei kleinen, zunehmenden Ab-
ständen ("Öffnen"):

$$OPDV = (-CLDV) * (1 + 2 * ZFN)$$

4.3.4 Interaktion zwischen Fahrzeugen auf benachbarten Spuren

Für die Wahrnehmung von Abständen und Geschwindigkeitsunterschieden zu den Fahrzeugen auf der Nachbarspur wird unterstellt, daß sinngemäß die gleichen Gesetzmäßigkeiten gelten wie bei der Interaktion zwischen Fahrzeugen auf der gleichen Spur. Die Abschätzung der relativen Bewegungsgrößen führt in diesem Fall zur Entscheidung, ob zum gegebenen Zeitpunkt ein Spurwechsel möglich und sinnvoll ist. In diesen Entscheidungsprozeß fließt jedoch nicht nur die momentane Verkehrssituation ein. Es ist darüberhinaus zu berücksichtigen, wie sich die augenblickliche Konstellation in naher Zukunft ändern könnte.

Im Simulationsmodell wird daher neben einem Zustand aktueller Beeinflussung (abgegrenzt durch den maximalen Folgeabstand SDX und die Wahrnehmungsschwelle SDV) ein Zustand potentieller Beeinflussung eingeführt (Abb. 15). Er umfaßt jene Situationen, in denen ein Fahrer vermuten könnte, daß er nach einem Spurwechsel bald in den Einflußbereich eines der betrachteten Nachbarfahrzeuge geraten würde. Zur Abgrenzung des potentiellen Einflußbereichs dienen solche Vielfache der Werte BX bzw. SDV , die sich bei der Erprobung des Simulationsmodells als brauchbar erwiesen haben:

$SDXP$ Grenzabstand für potentielle Beeinflussung:

$$SDXP = AX + FX * BX$$

Nachbarfahrzeug: J1 J2 K1 K2

FX: 4.0 2.0 1.8 2.0

SDVP Grenzgeschwindigkeitsdifferenz für
potentielle Beeinflussung:

$$SDVP = FV * SDV$$

Nachbarfahrzeug: J1 J2 K1 K2
FV: 0.5 0.5 0.5 0.5

Die in Abschnitt 3.5.2 erläuterten und in den Abbildungen 5 und 6 dargestellten Spurwechselstrategien sind im Simulationsprogramm als Entscheidungsbäume implementiert. Für die Bedingungen A, B und C haben sich in der Testphase folgende Ausdrücke als brauchbar erwiesen:

$$A = [V(I) < W(I) - 4.2]$$

Die aktuelle Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs (I) liegt mehr als 4.2 m/sec (ca. 15 km/h) unter seiner Wunschgeschwindigkeit;

$$B = [V(J2) > V(J1) + 4.2]$$

Fahrzeug J2 ist um mehr als 4.2 m/sec schneller als Fahrzeug J1,

$$C = [X(I) - X(K2) < AX + BX]
AND [W(K2) > W(I) + 4.2]$$

Der Abstand zum Fahrzeug K2 ist kleiner als der minimale Folgeabstand und seine Wunschgeschwindigkeit ist um mindestens 4.2 m/sec größer.

4.4 Bewegen und Beobachten der Fahrzeuge,
Programmteil MOVE

Im Programmteil DECS wurde, ausgehend von der Situation zum Zeitpunkt T, für alle Fahrzeuge festgelegt, auf welcher Spur und mit welcher Beschleunigung sie während des Zeitintervalls (T, T + 1) fahren. Der darauf folgende Programmteil MOVE (Abb. 16) übernimmt die Aufgabe, die Fahrzeuge dementsprechend weiterzubewegen, also die neuen Positionen und Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt T + 1 zu errechnen.

Dabei ergibt sich die Gelegenheit, festzustellen, ob ein Fahrzeug während des betrachteten Zeitschritts einen Meßquerschnitt überfährt. Ist dies der Fall, so können der exakte Überfahrungszeitpunkt und die dazugehörigen kinematischen Größen über die Bewegungsgleichung errechnet und registriert werden. Bei dieser "lokalen Messung" werden - an allen Meßquerschnitten nach Spuren getrennt - während eines Meßintervalls folgende Meßgrößen ermittelt und im Kernspeicher aufsummiert:

LOM	Fahrzeugmenge, Anzahl der Fahrzeugdurchgänge,
LOV	(lokale) Geschwindigkeiten (m/sek),
LOR	Reziprokwerte der Geschwindigkeiten (sek/m),
LOB	Beschleunigungen (m/sek ²),
LOVV	Quadrate der Geschwindigkeiten (m ² /sek ²).

Am Ende eines jeden Meßintervalls werden diese (akkumulierten) Meßgrößen spurweise auf ein externes Speichermedium ausgelagert und können nach dem Ende des Simulationslaufs von getrennten Auswerteprogrammen aufbereitet und weiterverarbeitet werden.

Ebenfalls im Programmteil MOVE wird die "momentane Messung" vorgenommen; die akkumulierten Meßgrößen sind:

MON	Fahrzeugmenge, Anzahl der beobachteten Fahrzeuge,
MOV	(momentane) Geschwindigkeiten (m/sec),
MOB	Beschleunigungen (m/sec^2),
MOVV	Quadrate der Geschwindigkeiten (m^2/sec^2).

Auch diese (und alle noch folgenden) Meßgrößen werden für alle Meßstrecken nach Spuren getrennt aufsummiert.

Die registrierten kinematischen Größen sind bezogen auf den Zeitpunkt T der momentanen Messung; lediglich bei den Beschleunigungen werden die Werte festgehalten, die im Zeitintervall $(T, T + 1)$ gelten.

Als drittes Meßverfahren ist im Simulationsprogramm die "räumlich-zeitliche Messung" implementiert. Diese in der Realität nur unter großem Aufwand (COERS 1970, BRILON 1973) durchführbare Methode bereitet keinerlei Schwierigkeiten bei der Programmierung.

Folgende Meßgrößen sind für die betrachteten Zeit-Weg-Flächen zu akkumulieren:

- RZDX zurückgelegte Wege der Fahrzeuge (m),
RZDT Fahrzeiten der Fahrzeuge (sek).

Im Auswerteprogramm können damit räumlich-zeitliche Dichten bzw. Stärken errechnet werden.

Neben den bisher erwähnten Messungen, deren gemeinsames Merkmal die zeitliche Aufteilung in bestimmte Meßintervalle ist, werden außerdem "globale Messungen" dargestalt vorgenommen, daß einige Meßgrößen über die gesamte Simulationszeit hinweg aufsummiert werden.

Dies ist allerdings im allgemeinen nur dann sinnvoll, wenn alle Parameter (Verkehrsstärke am Einfahrtquerschnitt, Wunschgeschwindigkeit usw.) während der Simulationszeit konstant gehalten werden. Als globale Meßgrößen werden verwendet:

- GDX zurückgelegte Wege der Fahrzeuge (m),
GDTV tatsächliche Fahrzeiten der Fahrzeuge (sek),
GDTW gewünschte Fahrzeiten der Fahrzeuge (sek),
GDTF "freie" Fahrzeiten (sek),
 Fahrzeiten bei freier Fahrt,
GDTB Bremszeiten (sek),
 Fahrzeiten mit scharfen Bremsungen,

GSW	Anzahl der Spurwechsel,
GLSV	lokale Geschwindigkeiten (m/sec),
GLSW	(lokale) Wunschgeschwindigkeiten (m/sec),
GLNV	Verteilung der (lokalen) Geschwindigkeiten, Klassenhäufigkeiten,
GLNW	Verteilung der (lokalen) Wunschgeschwindig- keiten, Klassenhäufigkeiten.

Die globalen Messungen werden am Ende des Simulationslaufes noch im Simulationsprogramm ausgewertet, und die Ergebnisse in Form von Tabellen und Kurven ausgedruckt. Dank der übersichtlichen Struktur des Simulationsprogrammes ist es ohne Schwierigkeiten möglich, weitere Meßgrößen zu erheben und den Erfordernissen entsprechend aufzubereiten und darzustellen.

5. Simulationsergebnisse

5.1 Randbedingungen und Einflußgrößen

In Abschnitt 2.2 ist bereits darauf hingewiesen worden, daß die Verkehrsstärke einer der beiden Faktoren ist, deren Einfluß auf die Qualität des Verkehrsablaufs in der vorliegenden Untersuchung aufgezeigt werden soll. Den zweiten stellt das Geschwindigkeitsniveau dar, insoweit es von äußeren Umständen, beispielsweise von Gesetzesvorschriften, bestimmt ist. Dabei werden zwei Fälle unterschieden, die auf Autobahnen am häufigsten auftreten, nämlich einmal der normale Verkehrsablauf ohne Einschränkung der Höchstgeschwindigkeit und zum anderen der Verkehr bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h. Für beide Fälle lagen Feldmessungen vor, anhand derer die Plausibilität der Simulationsergebnisse überprüft werden konnte. Mit zwei verschiedenen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen:

- 120/17: Erwartungswert \bar{w} = 120 km/h
- Variationskoeffizient ξ_w = 17 %
- Höchstgeschwindigkeit w_{\max} = 170 km/h
- Mindestgeschwindigkeit w_{\min} = 70 km/h

(entsprechend etwa der Geschwindigkeitsverteilung für freien Pkw-Verkehr ohne Geschwindigkeitsbegrenzung),

- 100/10 : Erwartungswert	\bar{w}	=	100 km/h
Variationskoeffizient	ε_w	=	10 %
Höchstgeschwindigkeit	w_{\max}	=	130 km/h
Mindestgeschwindigkeit	w_{\min}	=	70 km/h

(desgl. mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h),

wurden daher jeweils ca. 30 Rechenläufe durchgeführt, wobei der Parameter Verkehrsstärke am Eingangsquer- schnitt (oder gleichbedeutend die mittlere Zwischen- zeit der einfahrenden Fahrzeuge) von Lauf zu Lauf variiert, während eines jeden Durchlaufs jedoch konstant gehalten wurde. Die Simulationszeit wurde so gewählt, daß in jedem Fall etwa 1 000 Fahrzeuge beobachtet werden konnten, d.h. daß beispielsweise bei der Verkehrsstärke 500 Fhz/h zwei Stunden Realzeit (eine gewisse Anlaufzeit nicht mitgerechnet) simuliert wurden. Damit ist der Stichprobenumfang groß genug, um den Mittelwert der Wunschgeschwindigkeiten bei einem Konfidenzniveau von 95 % mit einer relativen Abweichung von höchstens 1 % zu messen.

Die Länge der Simulationsstrecke mußte im Hinblick auf den Kernspeicherbedarf des Programms und die zu erwartenden Rechenzeiten auf 4 000 m begrenzt werden. Fünf Meßquerschnitte (bei 500, 1 000, 2 000, 3 000, 3 500 m) unterteilen die Simulationsstrecke in vier Meßstrecken (Abb. 17). Die Länge der Simulations- strecke kann die Untersuchungsergebnisse in einem nicht zu unterschätzenden Ausmaß beeinflussen. Um dies zu verdeutlichen, wurden für einige Rechenläufe die lokalen Geschwindigkeitsmittelwerte über dem Weg aufgetragen (Abb. 18).

Auf der einen Seite bewirkt der gewählte Eingabemodus am Streckenanfang (weitgehende gegenseitige Unabhängigkeit nacheinander einfahrender Fahrzeuge), daß eine gewisse Einlaufstrecke benötigt wird, bis sich der Verkehrsablauf so eingependelt hat, wie er sich unter der Kontrolle des Interaktionsmodells abspielt. Stationäre Verhältnisse stellen sich umso später ein, je mehr die Überholmöglichkeiten mit steigender Verkehrsbelastung abnehmen. Dies hat zur Folge, daß die Geschwindigkeitsmittelwerte mit zunehmender Entfernung vom Einfahrtquerschnitt mehr oder weniger kontinuierlich abnehmen. Bei hohen Verkehrsstärken wird diese Tendenz durch gelegentliche Instabilitäten des Verkehrsflusses infolge wachsender Kolonnenbildung noch verstärkt. Bei Belastungen im Bereich der Leistungsfähigkeit können sich solche Instabilitäten entgegen der Fahrtrichtung fortpflanzen und sich dabei verstärken, so daß die mittlere Geschwindigkeit entgegen dem Strom abnimmt.

Auf der anderen Seite macht sich bei hohen Verkehrsbelastungen der Einfluß des Streckenendes bemerkbar, wo im Simulationsmodell die Fahrzeuge plötzlich verschwinden. Dies hat etwa die gleiche Wirkung wie eine plötzliche Aufweitung des Straßenquerschnitts auf beliebig viele Spuren, d.h. am Streckenende herrscht immer völlig freier Verkehrsfluß. Da dort keine instabilen Verkehrszustände auftreten können, zeigt der Verkehrsablauf im Bereich vor dem Streckenende eine gewisse Erholungstendenz.

Die hier angedeuteten Zusammenhänge sind jeweils im Auge zu behalten, wenn Simulationsergebnisse für

höhere Verkehrsbelastungen diskutiert werden. Darüberhinaus ist anzunehmen, daß auch bei Feldmessungen ähnliche Verhältnisse angetroffen werden, d.h., daß sich sprunghafte Änderungen der Verkehrszustände an Aus- und Einfahrten bei entsprechenden Verkehrsstärken bis weit in die benachbarten Streckenabschnitte hinein auswirken können.

Wie Abbildung 18 zeigt, ist ein "über den Weg statio-närer" Verkehrsablauf unter den genannten Einschränkungen bei den vorgegebenen Randbedingungen am ehesten auf der Meßstrecke S3 (2000 - 3 000) festzu-stellen. Soweit im folgenden Simulationsergebnisse dargestellt und interpretiert werden, handelt es sich daher um Beobachtungen auf der Strecke S3 oder am Querschnitt X3 (3 000 m).

5.2 Fundamentaldiagramme

Der stochastische Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte, ermittelt am Meßquerschnitt X3 = 3 000 m (Abb. 19), hat die aus vielen Beobach-tungen bekannte Form. Im Bereich des freien Verkehrs liegen die Meßwerte auf dem Radiusvektor der mittleren momentanen Wunschgeschwindigkeit und damit

$$- \text{ wegen } \bar{v}_m \leq \bar{w}_m \text{ und } \bar{w}_m \leq \bar{w}_1 -$$

etwas unterhalb der in den Darstellungen eingezeich-neten Geraden $q = \bar{w}_1 * k$, dem Radiusvektor der mitt-leren lokalen Wunschgeschwindigkeit.

Die maximale, aus 5-Minuten-Intervallen hochgerechnete Verkehrsstärke (Querschnitts-Leistungsfähigkeit) beträgt etwa 3 200 - 3 300 Fhz/h, sie wird bei einer Verkehrsdichte von 35 - 45 Fhz/km erreicht.

Der Übergang vom freien zum teilgebundenen Verkehr zeichnet sich im Fundamentaldiagramm nicht in auffälliger Weise ab. Es kann lediglich festgestellt werden, daß die Meßwerte mit zunehmender Stärke bzw. Dichte eine größere Streuung aufweisen und mehr und mehr vom Radiusvektor der Wunschgeschwindigkeit abweichen.

Vergleicht man die Fundamentaldiagramme der beiden Simulationsreihen miteinander (Abb. 20), so zeigt sich bei kleinen und mittleren Stärken deutlich der Einfluß der verschiedenen Wunschgeschwindigkeiten. Bei großen Verkehrsstärken überdecken die beiden Punktewolken praktisch den gleichen Streubereich, auch die erreichten Leistungsfähigkeiten sind etwa gleich groß. Dies war zu erwarten, wenn man wie im zugrundgelegten Modell des Fahrverhaltens davon ausgeht, daß die Kenngrößen, welche die Fahrweise der einzelnen Fahrer bestimmen, von der jeweiligen Wunschgeschwindigkeit unabhängig sind. Die beiden Fahrerkollektive unterscheiden sich lediglich in ihren Wunschgeschwindigkeiten, d.h. beider ist im Mittel bei gleicher Augenblicksgeschwindigkeit das gleiche Fahrverhalten und insbesondere die gleiche Abstandswahl gemeinsam. Außerdem besitzen beide Wunschgeschwindigkeitsverteilungen die gleichen Minima (70 km/h), was zur Folge hat, daß sich im Bereich der Leistungsfähigkeit, wo der Verkehrsfluß wegen geringer Überholmöglichkeiten im wesentlichen von den langsamsten Fahrzeugen bestimmt

wird, in beiden Fällen das gleiche Geschwindigkeitsniveau und damit auch die gleichen Verkehrsdichten einstellen.

Eine nach Spuren getrennte Analyse muß mindestens insoweit signifikante Unterschiede zwischen den Fundamentaldiagrammen zeigen, als auf mehrspurigen Straßen eine gewisse Entmischung der Fahrzeugkollektive nach den Wunschgeschwindigkeiten erfolgt. Das Rechtsfahrgesetz und abnehmende Überholmöglichkeiten führen dazu, daß die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur schon bei verhältnismäßig geringen Verkehrsstärken spürbar absinkt, während auf der Überholspur auch bei stärkerem Verkehr im Mittel annähernd mit Wunschgeschwindigkeit gefahren werden kann. Die Fundamentaldiagramme der Überholspur zeigen daher einen gestreckteren Verlauf als diejenigen der Fahrspur (Abb. 21 und 22).

Die maximalen Stärken liegen auf der Fahrspur bei 1600 Fhz/h, während auf der Überholspur bis zu 1800 Fhz/h beobachtet werden können. Dies deutet darauf hin, daß im Modell neben der Entmischung der Fahrzeuge nach ihrer Wunschgeschwindigkeit auch eine solche nach dem Abstandsverhalten eintritt. Dieses Phänomen tritt erfahrungsgemäß im realen Verkehr auf Autobahnen noch stärker in Erscheinung, denn dort werden i.a. auf der Fahrspur noch geringere Leistungsfähigkeiten beobachtet.

Das Fundamentaldiagramm der Fahrspur überdeckt bei beiden Simulationsreihen praktisch den gleichen Wertebereich (Abb. 23). Nur bei kleinen Verkehrsstärken machen sich die unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten be-

merkbar. Erheblich deutlicher stellt sich der Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugkollektiven im Fundamentaldiagramm der Überholspur dar. Hier wird auch bei starkem Verkehr im Durchschnitt schneller gefahren, wenn die mittlere Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugstroms größer ist. Daß dies auf der Fahrspur nicht in demselben Maße der Fall ist, liegt daran, daß die Wunschgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeugkollektive gleiche Minimalwerte aufweisen. Da aber das Verkehrsgeschehen auf der Fahrspur mit zunehmender Stärke von den gleichen langsamten Fahrzeugen bestimmt wird, können die Fundamentaldiagramme in diesem Fall keine ausgeprägten Unterschiede zeigen.

Mit wenigen Ausnahmen, die vorwiegend auf der Überholspur auftreten, zeigen die Fundamentaldiagramme nur Werte im aufsteigenden Ast. Es handelt sich dabei um "stabile" Verkehrszustände in dem Sinne, daß ihnen keine Veränderungstendenz innewohnt. Der abfallende Ast des Fundamentaldiagramms beschreibt demgegenüber "instabile" Zustände, die sich auf der freien Strecke nicht von selbst einstellen und sich bei Wegfall des auslösenden Moments wieder auflösen.

Ursache für instabile Verkehrszustände auf der freien Strecke ist immer eine Engpaßsituation. Dabei kann es sich um einen permanenten, sich aus der baulichen Situation ergebenden Engpaß auf der Strecke oder am Knotenpunkt, der die Strecke abschließt, handeln. Die gewählte Simulationsstrecke enthält aber keinen solchen Engpaß. Es kann jedoch auch ein temporärer Engpaß vorliegen, ausgelöst durch Folgevorgänge, die in der Fahrzeugfolgetheorie als lokal instabil be-

zeichnet werden. Sie führen bei bestimmten Konstellationen zu asymptotischer Instabilität von Fahrzeugkolonnen und unter Umständen sogar zum sogenannten "Stau aus dem Nichts". Die von temporären Engpässen dieser Art erzeugten Verkehrszustände pflanzen sich, wie die Kontinuumstheorie anschaulich zeigt, entgegen der Fahrtrichtung fort, solange die Verkehrsstärke des Zuflusses die Leistungsfähigkeit des Engpasses übersteigt. Daß bei den Simulationsergebnissen solche Zustände nur sehr selten erfaßt werden, erklärt sich aus der Lage der Meßstelle im hinteren Teil der Simulationsstrecke. Offensichtlich besteht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, daß auf den restlichen 1 000 Metern bis zum Streckenende solche Instabilitäten auftreten.

5.3 Benutzung der Überholspur

Zahlreiche frühere Untersuchungen haben übereinstimmend ergeben, daß die Aufteilung des Fahrzeugstroms auf die beiden Spuren von der jeweiligen Verkehrsstärke abhängt. Bei geringen Stärken wird überwiegend rechts gefahren, während bei hohen Stärken die linke Spur stärker belastet ist. Auch das Simulationsmodell liefert qualitativ das gleiche Ergebnis (Abb. 24). Die aus 5-Minuten-Intervallen berechneten Stärkeanteile der Überholspur steigen mit zunehmender Belastung an, erreichen bei $q = 1000 - 1800 \text{ Fhz/h}$ den Wert 50 % und bleiben bei hohen Belastungen bei 55 - 60 %.

Auffallend und für den stochastischen Charakter der Spurbelegung typisch ist die relativ große Schwan-kungsbreite der im Modell beobachteten Aufteilungs-werte. Dies erscheint aber nicht sehr verwunderlich, wenn man bedenkt, daß einige wenige besonders lang-same Fahrzeuge genügen, um das Überholbedürfnis und damit die Belegung der Überholspur sprunghaft an-steigen zu lassen. Aus diesem Grund war auch zu er-warten, daß der Stärkeanteil der Überholspur mit zu-nehmender Streuung der Geschwindigkeiten ebenfalls anwächst. Faßt man die Beobachtungswerte so zusammen, daß jeder mit konstantem Verkehrsstärkeparameter durch-gerechnete Simulationslauf genau einen Punkt liefert (Abb. 25), so wird der Einfluß der Geschwindigkeits-streuung besonders deutlich: die Simulationsläufe 120/17 erbrachten bei gleicher Verkehrsstärke durch-weg höhere Stärkeanteile der Überholspur als die Läufe 100/10.

5.4 Geschwindigkeiten

Die Mittelwerte der lokalen Geschwindigkeiten (Abb. 26) nehmen mit wachsender Verkehrsstärke kontinuierlich ab. Die aus dem Simulationsmodell erhaltenen Werte zeigen einen linearen Zusammenhang, wobei sich drei Bereiche mit jeweils konstanter Steigung abzeichnen. Bis zu einer Stärke von 700 - 800 Fhz/h ist der Abfall der Ge-schwindigkeiten sehr gering, dann folgt ein Bereich mit etwas stärkerer Abnahme bis in die Nähe der Leistungs-fähigkeit bei 3000 (120/17) - 3200 (100/10) Fhz/h, wo auch noch kleinere Mittelwerte auftreten.

Beide Simulationsreihen zeigen den gleichen qualitativen Zusammenhang. Die Verschiedenheit der Wunschgeschwindigkeitsverteilung drückt sich lediglich darin aus, daß die Geschwindigkeitsmittelwerte der Reihe 120/17 mit wachsender Verkehrsstärke mehr abnehmen, als es bei der Reihe 100/10 der Fall ist. Dies hat zur Folge, daß sich die beiden Punktewolken immer weiter annähern, bis sich im Bereich der Leistungsfähigkeit die mittleren Geschwindigkeiten nur noch wenig unterscheiden.

Die Geschwindigkeitsverteilungen (Abb. 27 und 28) verschieben sich mit zunehmender Verkehrsstärke erwartungsgemäß zu niedrigeren Geschwindigkeiten hin. Bemerkenswert ist die Feststellung, daß die Form der Verteilungsfunktionen gegenüber dieser Verschiebung im Großen und Ganzen invariant erscheint. Auch bei sehr starkem Verkehr verringert sich die Streuung der lokal gemessenen Geschwindigkeiten nicht wesentlich gegenüber der Streuung der Wunschgeschwindigkeiten.

Der lineare Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Verkehrsstärke bleibt auch dann erhalten, wenn man von der Betrachtung des Gesamtquerschnitts übergeht zur Untersuchung der Verhältnisse auf den einzelnen Spuren (Abb. 29). Darüberhinaus zeigt es sich, daß sich bei beiden Simulationsreihen im Bereich der Leistungsfähigkeit auf der Fahrspur die gleichen Geschwindigkeitsmittelwerte einstellen, während auf der Überholspur noch ein verhältnismäßig deutlicher Unterschied erkennbar bleibt. Die Ursache dafür ist wohl - wie bereits bei der Diskussion der

Fundamentaldiagramme bemerkt - darin zu suchen, daß die Untergrenze der Wunschgeschwindigkeiten bei beiden Simulationsreihen gleich groß ist.

Ein weiterer Unterschied zwischen den auf der Fahrspur bzw. auf der Überholspur beobachteten Geschwindigkeiten besteht darin, daß die Mittelwerte auf der Überholspur mit zunehmender Verkehrsstärke etwas schwächer abnehmen als auf der Fahrspur. Die Differenz zwischen den Geschwindigkeitsmittelwerten wird dementsprechend mit wachsender Verkehrsstärke größer (Abb. 30). Dieses zunächst kaum zu vermutende Phänomen erklärt sich daher, daß immer mehr schnelle Fahrzeuge auf die Überholspur ausweichen, wo sie relativ weniger behindert werden. Erst in der Nähe der Streckenleistungsfähigkeit zeigt diese Geschwindigkeitsdifferenz wieder abnehmende Tendenz.

Außerdem ist festzustellen, daß sich die größere Streuung der Wunschgeschwindigkeiten bei der Simulationsreihe 120/17 in einer entsprechend größeren Differenz der Geschwindigkeitsmittelwerte niederschlägt.

Die nach Spuren getrennte Darstellung der mittleren lokalen Wunschgeschwindigkeiten (Abb. 31) gibt näheren Aufschluß über die Entmischung der Fahrzeugkollektive. Erwartungsgemäß sinkt mit zunehmender Verkehrsstärke die mittlere Wunschgeschwindigkeit auf der Fahrspur, weil dort immer seltener Fahrzeuge mit hohen Wunschgeschwindigkeiten zu beobachten sind. Da aber gleichzeitig nur relativ wenige langsame Fahrzeuge nach links überwechseln, fällt der Wunschgeschwindigkeitsmittelwert auf der Überholspur nicht in demselben Maße ab.

Es nimmt daher mit wachsender Stärke auch der Entmischungsgrad zu. Daß die Entmischung beim Fahrzeugkollektiv 120/17 wesentlich stärker ausgeprägt ist, liegt sicherlich an der größeren Streuung der Wunschgeschwindigkeiten. Bei sehr starkem Verkehr steigt die mittlere Wunschgeschwindigkeit auf der Fahrspur wieder an. Dafür kann einerseits die im Simulationsmodell angewandte Regelung der Spurwahl am Einfahrtquerschnitt verantwortlich sein, denn auch ein Fahrzeug mit einer hohen Wunschgeschwindigkeit hat bei großer Verkehrsstärke nur wenig Chancen, die Spur zu wechseln und damit die ihm bei der Einfahrt in die Simulationsstrecke zugewiesene Spur zu verlassen. Im realen Verkehr ergeben sich ähnliche Situationen, wenn Fahrzeuge auf der Fahrspur "eingeklemmt" werden, nachdem sie für schnellere Platz gemacht haben und von einer nachfolgenden Kolonne am Wiedereinscheren auf die Überholspur gehindert werden. Andererseits werden bei starkem Verkehr auch Fahrzeuge mit verhältnismäßig kleinen Wunschgeschwindigkeiten öfter behindert und weichen dann bei der ersten sich bietenden Gelegenheit auf die Überholspur aus, wo sie unter Umständen für längere Zeit weiterfahren, weil das Wiedereinscheren auf die Fahrspur durch die Kolonnenbildung erschwert wird.

Betrachtet man die hier diskutierten Zusammenhänge zwischen mittlerer lokaler Geschwindigkeit und Verkehrsstärke, so bietet sich im Hinblick auf die Zustandsformen des Verkehrsablaufs folgendes Bild. Bis zu einer Stärke von 700 - 800 Fhz/h könnte man den Verkehrsfluß als frei bezeichnen; die Geschwindigkeitsmittelwerte liegen annähernd bei der mittleren Wunschgeschwindig-

keit. Der teilgebundene Verkehr umfaßt den gesamten Bereich der größeren Verkehrsstärken bis hin zur Leistungsfähigkeit der freien Strecke, die im Simulationsmodell bei 3 000 - 3 200 Fhz/h liegt. In diesem Bereich zeigt die mittlere Geschwindigkeit durchgehend eine gleichmäßige Abnahme. Gebundener Verkehr in dem Sinne, daß die mittleren lokalen Geschwindigkeiten erheblich unter die im teilgebundenen Verkehr erreichten Werte absinken, kann an einer Strecke ohne Engpaß - jedenfalls über eine längere Zeitspanne hinweg - praktisch nicht auftreten.

Das Verhalten eines Fahrers wird in starkem Maße davon bestimmt, welche Abstände zum Vordermann und zu den übrigen Fahrzeugen in der unmittelbaren Umgebung gegeben sind. Darüberhinaus ist zu vermuten, daß alle Fahrzeuge im Blickfeld des Fahrers ihm einen subjektiven Eindruck von der augenblicklichen Verkehrsdichte vermitteln und damit seine Entscheidungen mit beeinflussen. Eine Untersuchung der Geschwindigkeiten und ihrer Abhängigkeit von makroskopischen Parametern des Verkehrsflusses sollte daher auch die Verkehrsdichte in die Betrachtung einbeziehen.

Für den vorliegenden Fall einer Mittelwertbildung über jeweils alle Fahrzeuge der einzelnen Simulationsläufe eignen sich besonders die räumlich-zeitlichen Kennwerte des Verkehrsablaufs (COERS 1969 und 1970; LEUTZBACH, MARTIN 1973; BRILON 1973).

Die räumlich-zeitliche Dichte k_{RZ} ist definiert als

$$k_{RZ} = \frac{\sum t_i}{TX}$$

wobei $\sum t_i$ die Summe der von allen während der Beobachtungszeit T erfaßten Fahrzeuge zum Befahren der Beobachtungsstrecke X benötigten Zeiten ist. Die mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit \bar{v}_{RZ} ist definiert als

$$\bar{v}_{RZ} = \frac{\sum x_i}{\sum t_i}.$$

Dabei ist $\sum x_i$ die Summe der von allen Fahrzeugen in der Zeit-Weg-Fläche TX zurückgelegten Wegstrecken. Als Beobachtungsstrecke wurde, wie in Abschnitt 5.1 erwähnt, die Teilstrecke S3 gewählt; die Beobachtungsdauer erstreckte sich jeweils über einen ganzen Simulationslauf.

Betrachtet man die mittleren räumlich-zeitlichen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte (Abb. 32), so zeigen die Simulationswerte einen linearen Zusammenhang mit drei Bereichen konstanter Neigung. Die entsprechenden Dichtegrenzwerte liegen bei 6 - 7 Fhz/km und bei 32 - 33 Fhz/km, wobei sich der erste Bereich weniger deutlich abhebt, als dies bei der analogen Geschwindigkeits-Stärke-Relation (Abb. 26) der Fall ist. Auch hier zeigen beide Simulationsreihen qualitativ den gleichen Zusammenhang, jedoch werden in der Reihe 100/10 bei sehr starkem Verkehr etwas größere Dichten erreicht.

Festzuhalten ist darüberhinaus, daß im Bereich höchster Verkehrsdichten in beiden Fällen praktisch das gleiche räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsniveau erreicht wird,

während die mittleren lokalen Geschwindigkeiten auch beim stärksten Verkehr keineswegs zusammenfallen. Hier kommt ein grundsätzlicher Unterschied zwischen der lokalen und der räumlich-zeitlichen Erhebungsmethode zum Tragen, der darin besteht, daß die Geschwindigkeiten aller Einzelfahrzeuge bei der lokalen Messung mit demselben Gewicht in die Mittelwertbildung eingehen, während sie bei der räumlich-zeitlichen Messung mit der auf der Beobachtungstrecke verbrachten Zeit gewichtet werden. Dadurch beeinflussen langsamere Fahrzeuge das räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsmittel stärker als schnellere. Da aber die meisten Fahrzeuge des Kollektivs 120/17 auch bei sehr starkem Verkehr noch schneller fahren können als es beim Kollektiv 100/10 der Fall ist, läßt sich das Zusammenfallen der mittleren räumlich-zeitlichen Geschwindigkeiten nur so interpretieren, daß die stärker gestreuten Wunschgeschwindigkeiten häufiger lokale Instabilitäten und damit einzelne geringere Geschwindigkeiten zur Folge haben.

Die Linearität des Zusammenhangs zwischen den räumlich-zeitlichen Dichten und Geschwindigkeiten ist weniger augenfällig, wenn man die Geschwindigkeiten nach Spuren getrennt betrachtet und der Verkehrsichte auf der gesamten Fahrbahn gegenüberstellt (Abb 33). Auch die Knickstelle im Kurvenverlauf bei der Dichte 6 - 7 Fhz/h wird undeutlich. Es verbleibt die Feststellung, daß bei Dichten über 32 - 33 Fhz/km die mittleren Geschwindigkeiten auf der Überholspur merklich steiler abfallen.

Trägt man die räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsmittelwerte über der Verkehrsdichte der jeweiligen Spur auf, so sind sinngemäß die gleichen Zusammenhänge festzustellen (Abb. 34). Außerdem zeigt sich, daß bei der Simulationsreihe 100/10 im Bereich der Streckenleistungsfähigkeit sowohl auf der Fahrspur als auch auf der Überholspur höhere Dichten zu beobachten sind als bei der Reihe 120/17.

Auch bei räumlich-zeitlicher Betrachtung ist festzustellen, daß die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur mit wachsender Dichte bzw. Stärke mehr abnimmt als auf der Überholspur. Erst bei Verkehrsdichten über 30 Fhz/km zeigt sich die entgegengesetzte Tendenz; im Bereich der Streckenleistungsfähigkeit können die räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsmittelwerte auf Fahr- und Überholspur etwa die gleichen Werte annehmen (Abb. 35).

5.5 Freizügigkeit

Im Simulationsmodell ist die Hypothese implementiert, daß der Kraftfahrer stets versucht, eine bestimmte Wunschgeschwindigkeit einzuhalten, die als von der augenblicklichen Verkehrssituation unabhängig angesehen wird. Folgerichtig muß er die Güte des Verkehrsablaufs danach beurteilen, inwieweit es ihm gelingt, seine Vorstellung von der gewünschten Geschwindigkeit zu realisieren, bzw. in welchem Maß ihn Behinderungen zur Reduzierung seiner Geschwindigkeit zwingen.

Als Maßzahl für die Freizügigkeit ist das Verhältnis der mittleren Realgeschwindigkeit eines Fahrzeugstroms auf einem vorgegebenen Streckenabschnitt während eines bestimmten Beobachtungszeitraumes zu seiner mittleren Wunschgeschwindigkeit vorgeschlagen worden (HOHLE 1974). Da aber die mittlere Wunschgeschwindigkeit bei allen Simulationsläufen nur geringfügig vom Erwartungswert abwich, und dieser in den beiden Reihen 100/10 und 120/17 jeweils konstant gehalten wurde, kann anstelle des genannten Verhältnisses auch die mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit des Fahrzeugstroms selbst als Maß für die Freizügigkeit des Verkehrsablaufs betrachtet werden. Somit gilt das in Abschnitt 5.4 über die Geschwindigkeiten Gesagte sinngemäß auch unter dem Aspekt der Freizügigkeit, so daß sich eine weitere Diskussion an dieser Stelle erübrigt.

Wird ein Fahrer durch das jeweilige Verkehrsgeschehen zur Herabsetzung seiner Geschwindigkeit gezwungen, so hat das für ihn einen entsprechenden Zeitverlust gegenüber der unbehinderten Fahrt mit seiner Wunschgeschwindigkeit zur Folge. Summiert man die auf einer bestimmten Strecke erlittenen Zeitverluste, also die tatsächlichen Fahrzeiten abzüglich der Wunschfahrzeiten, und bezieht sie auf die Anzahl der beobachteten Fahrzeuge, so erhält man ein weiteres Maß für die Qualität des Verkehrsflusses.

Die Simulationsergebnisse (Abb. 36) zeigen einen generellen Anstieg des mittleren Zeitverlustes mit zunehmender Verkehrsstärke; im Bereich der Streckenleistungsfähigkeit wachsen die Zeitverluste sprunghaft an. Bei mittleren bis hohen Verkehrsstärken

weist die Simulationsreihe 120/17 deutlich größere Zeitverluste aus als die Reihe 100/10. Die am Zeitverlust gemessenen Behinderungen treten auf Fahr- und Überholspur jeweils annähernd gleich stark in Erscheinung (Abb. 37), wenn man davon absieht, daß bei geringen Verkehrsstärken nennenswerte Zeitverluste nur auf der Überholspur möglich sind, da dort bei Behinderungen keine Ausweichmöglichkeit auf eine andere Spur mehr gegeben ist.

Es ist denkbar, daß die Kraftfahrer Behinderungen nicht allein nach dem Ausmaß der Geschwindigkeitsminderung oder des Zeitverlustes beurteilen, sondern daß auch die Dauer des unerwünschten Zustandes eine Rolle spielt. Möglicherweise wird eine über längere Zeit hinweg anhaltende Behinderung als störender empfunden als eine kurzzeitige, auch wenn diese zu einer stärkeren Reduzierung der Geschwindigkeit zwingt. Um ein entsprechendes Qualitätsmaß für den Verkehrsablauf zu erhalten, wurde jedes Fahrzeug, während es die Untersuchungsstrecke S3 durchfuhr, in jedem Zeitschritt abgefragt, ob es mit seiner Wunschgeschwindigkeit fuhr oder nicht. Dabei wurde angenommen, daß die Wunschgeschwindigkeit bereits als erreicht gilt, wenn die Abweichung weniger als 10 km/h beträgt. Die Zeitanteile, in denen die beobachteten Fahrzeuge mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren konnten, wurden in Relation gesetzt zu der Summe der Aufenthaltsdauern aller Fahrzeuge auf der Untersuchungsstrecke. Die Simulationsergebnisse (Abb. 38) zeigen, daß der Zeitanteil freier Fahrt von annähernd 100 Prozent bei schwachem Verkehr auf etwa 30 - 50 Prozent bei sehr starkem Verkehr zurückgeht; wobei die Simulations-

reihe 120/17 bei gleichen Verkehrsstärken jeweils geringere Freizügigkeit ausweist.

Die spurweise getrennte Betrachtung (Abb. 39) läßt erkennen, daß auf der Überholspur bei mittleren Verkehrsstärken erheblich weniger lange mit Wunschgeschwindigkeit gefahren werden kann als dies auf der Fahrspur der Fall ist. Neben den bereits erwähnten fehlenden Ausweichmöglichkeiten dürfte dafür auch die Sortierung nach den Wunschgeschwindigkeiten (Abb. 31) verantwortlich sein.

5.6 Heftige Verzögerungen

Für jeden Simulationslauf wurde die Anzahl der Zeitschritte, in denen ein Fahrzeug stärker als mit 2.5 m/sec^2 bremsen mußte, registriert, und das Verhältnis zur gesamten Aufenthaltsdauer aller Fahrzeuge auf der Strecke gebildet (Abb. 40). Diese Größe soll als ein Maß für den Sicherheitsgrad des Verkehrsablaufs gelten, da heftige Verzögerungen im allgemeinen in gefährlichen Situationen erforderlich sind. Die absolute Häufigkeit starker Bremsungen, wie sie bei der Simulation registriert wurde, mag etwas höher liegen als die entsprechende Häufigkeit im realen Verkehrsablauf. Im Modell wird ja das Ausmaß notwendiger Verzögerungen, wie es auch bei allen übrigen Entscheidungen der Fall ist, in diskreten Zeitschritten festgelegt. Dies kann in kritischen Situationen zu stärkeren Reaktionen führen als bei einem kontinuierlichen Entscheidungsprozeß. Trotz dieser Einschränkung dürfte jedoch der generelle

Kurvenverlauf einen zumindest qualitativ zutreffenden Eindruck davon vermitteln, wie häufig gefährliche Konstellationen auch im realen Verkehr bei unterschiedlichen Verkehrszuständen auftreten. Der Zeitanteil heftiger Bremsungen steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Verkehrsstärke; er ist bei höheren und stärker gestreuten Wunschgeschwindigkeiten (120/17) geringfügig größer als bei niedrigen und weniger gestreuten (100/10).

5.7 Spurwechselhäufigkeit

Der Spurwechselhäufigkeit kommt bei der Beurteilung der Verkehrsqualität eine ambivalente Bedeutung zu. Auf der einen Seite birgt jeder Spurwechsel potentielle Gefahren in sich und vermindert dementsprechend die Sicherheit des Verkehrsablaufs. Unter diesem Aspekt ist derjenige Verkehrszustand besser einzustufen, bei dem weniger Spurwechsel geschehen. Auf der anderen Seite sind Spurwechsel notwendig, um die gewünschte Geschwindigkeit einzuhalten, wenn schnellere Fahrzeuge langsamere einholen. Müssen solche Spurwechsel aufgrund der momentanen Verkehrssituation für eine gewisse Zeit aufgeschoben werden, so wird dadurch die Freizügigkeit des Verkehrsablaufs beeinträchtigt.

Nach WARDROP (1952) und LEUTZBACH, EGERT (1965) ist die Anzahl der Überholungen pro Zeit- und Wegeeinheit, die erforderlich sind, damit alle Fahrzeuge ihre Wunschgeschwindigkeit beibehalten können, proportional dem Quadrat der Verkehrsstärke. Bei sehr schwachem

Verkehr gilt dies annähernd auch für die Zahl der Spurwechsel, denn zu einer Überholung gehören dann jeweils ein vorausgehender Spurwechsel nach links und ein nachfolgender Spurwechsel nach rechts.

Die Simulationsergebnisse (Abb. 41) zeigen einen annähernd quadratischen Anstieg der Spurwechselhäufigkeit nur bis zu einer Verkehrsstärke von 300 Fhz/h, dann verläuft die Kurve zunehmend flacher bis zu einem Maximum bei Stärken von 2 000 Fhz/h. Dies heißt aber nicht, daß bereits ab 300 Fhz/h die Freizügigkeit schon wesentlich eingeschränkt wäre, denn mit zunehmender Verkehrsdichte werden immer häufiger nach einem Wechsel auf die Überholspur nach-einander mehrere Fahrzeuge überholt, bevor der Spurwechsel zurück auf die Fahrspur erfolgt. Erst von etwa 1 000 Fhz/h an kann die Beobachtung, daß die Spurwechselhäufigkeit trotz zunehmender Verkehrsbelastung kaum noch weiter ansteigt, auf fehlende Spurwechselfähigkeiten zurückgeführt werden.

Bezieht man die Anzahl der Spurwechsel auf die geleisteten Fahrzeug-Kilometer (Abb. 42), so ergibt sich ein deutlich ausgeprägtes Maximum dieser spezifischen Spurwechselhäufigkeit bei Verkehrsstärken um 800 Fhz/h; mit wachsender Belastung geht die durchschnittliche Spurwechselhäufigkeit stark zurück. Ein Vergleich der beiden Simulationsreihen zeigt jeweils größere Spurwechselhäufigkeiten bei der Reihe 120/17. Dies stimmt zumindest im Bereich des freien Verkehrs mit der von WARDROP (1952) angegebenen Formel für die

notwendigen Überholungen bei normalverteilten Geschwindigkeiten überein:

$$\bar{U} = \frac{q^2 * \epsilon_m}{\bar{v}_m^2 * \sqrt{\pi}} \quad (\text{Überholungen pro Zeiteinheit und Wegeeinheit})$$

$$= \frac{q^2 * \epsilon_m}{\bar{v}_m^2 * \sqrt{\pi}}$$

\bar{v}_m = Mittelwert
 σ_m = Standardabweichung
 ϵ_m = Variantionskoeffizient } der
momente-
n Ge-
schwindig-
keiten

Danach müßte in erster Näherung ($\bar{v}_m \approx \bar{w}_m \approx \bar{w}_1$) gelten:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U} (120/17)}{\bar{U} (100/10)} &= \frac{\epsilon_m (120/17)}{\epsilon_m (100/10)} * \frac{\bar{v}_m (100/10)}{\bar{v}_m (120/17)} \\ &\approx \frac{0,17 * 100}{0,10 * 120} \approx 1,4 \end{aligned}$$

Die Ergebnisse der beiden Simulationsreihen stehen bei schwachem Verkehr zueinander in einem Verhältnis, das sich augenscheinlich in dieser Größenordnung bewegt.

6 Begleitende empirische Untersuchungen

6.1 Einleitung

Die im Rahmen der vorgegebenen Fragestellung erforderlichen Beobachtungen des Verkehrsablaufs wurden auf zwei Wegen realisiert, zum einen mit Hilfe der Simulation des Verkehrsablaufs auf einer elektronischen Rechenanlage, zum anderen durch direkte Messungen auf einem Autobahnteilstück. Die folgenden Abschnitte enthalten eine kurzgefaßte Beschreibung der Meßmethode und der Ergebnisse, sowie den Vergleich mit einigen Messungen anderer Autoren.

Empirische Untersuchungen zur Beschreibung des Verkehrsflusses müssen sich mit den Phänomenen sowohl eines Fahrzeugstroms (makroskopische Betrachtungsweise) als auch der diesen Strom bildenden Einzelfahrzeuge (mikroskopische Betrachtungsweise) befassen (WIEDEMANN 1972). Dementsprechend müssen einerseits makroskopische Größen wie Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Zusammensetzung und Geschwindigkeitsverteilung des Fahrzeugstroms gemessen werden, andererseits sollen aber auch mikroskopische Größen erfaßt werden, die das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeuge charakterisieren, beispielsweise Überholungen, Behinderungen, Geschwindigkeitsganglinien und Reisegeschwindigkeiten.

6.2 Ausrüstung einer Meßstrecke

Bei der Auswahl der Meßstrecke fanden folgende verkehrstechnische Kriterien Berücksichtigung:

- einheitliche Streckencharakteristik vor und im Bereich der Meßstrecke,
- ebene Fahrbahn ohne Krümmung, keine Ein- und Ausfahrten (Anschlußstellen bzw. Parkplätze) im Bereich der Meßstrecke,
- hohe Spitzenbelastungen des BAB-Abschnittes, um alle Zustandsformen des Verkehrsablaufs erfassen zu können.

Eine Meßstrecke, die diesen Anforderungen genügt, wurde auf dem Streckenabschnitt der BAB Mannheim-Karlsruhe zwischen den Anschlußstellen Bruchsal und Karlsruhe-Durlach (km 616.5 - 617.5) eingerichtet. In ihrem derzeitigen Ausbau enthält die Strecke neben den beiden 3,75 m breiten Fahrstreifen einen ebenfalls 3,75 m breiten Seitenstreifen, der in einer zukünftigen Ausbaustufe als dritter Fahrstreifen benutzt werden soll. In der Mitte der Meßstrecke befindet sich eine Brücke, die eine optische Überwachung des Verkehrsablaufs auf der Meßstrecke erlaubt.

Die Konzeption der Meßstrecke sah vor, die makroskopischen Größen lokal bzw. quasilokal an verschiedenen benachbarten Querschnitten zu messen. Die gegenseitige Entfernung der Meßquerschnitte wurde

so gewählt, daß die einzelnen Fahrzeuge über eine Reihe von Meßquerschnitten hinweg identifizierbar sein sollten. Damit war es einerseits möglich, die makroskopischen Größen auch räumlich-zeitlich (COERS 1969) zu erfassen, andererseits konnten auch einige mikroskopische Größen, insbesondere Spurwechsel und Reisezeiten, gemessen werden.

Die Wahrnehmung der Fahrzeuge an den Meßquerschnitten erfolgt über Induktionsschleifendetektoren, deren Impulse mit Hilfe des Verkehrsdaten-Erfassungsgerätes VDM 250 (Fa. Weiss-Prodata; EBERT 1971) auf Magnetband aufgezeichnet wurden. Der Abstand zwischen benachbarten Meßquerschnitten wurde mit 100 m so gewählt, daß einerseits mit den verfügbaren Mitteln eine möglichst lange Meßstrecke ausgerüstet werden konnte, daß aber andererseits die Wahrscheinlichkeit für nichtentdeckte Spurwechsel zwischen zwei Meßquerschnitten möglichst klein blieb (siehe Anhang).

6.3 Durchführung der Messungen

Nachdem die entsprechenden Auswerteprogramme für die elektronische Rechenanlage (UNIVAC 1108, Rechenzentrum der Universität Karlsruhe) fertiggestellt waren, wurden erste Testmessungen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, daß die ursprüngliche Konzeption einer vollautomatischen Erfassung und Auswertung des Fahrtverlaufs aller beobachteten Fahrzeuge über die gesamte Meßstrecke hinweg unter den gegebenen Umständen nicht realisierbar war.

Erstens liefern induktive Schleifendetektoren in einer stahlarmierten Betonfahrbahn nicht immer genaue digitale Abbildungen der erfaßten Fahrzeuge. Die unmittelbare Nachbarschaft der Stahlbewehrung führt dazu, daß die von den Induktionsschleifen aufgebauten Magnetfelder unter Umständen verzerrt werden. Insbesondere scheint die Höhe des Magnetfeldes über der Fahrbahn in diesem Fall reduziert zu sein. Dies hat aber zur Folge, daß die Fahrzeuge je nach ihrer Bodenfreiheit an unterschiedlichen Stellen erfaßt werden, wodurch die erreichbare Genauigkeit der Geschwindigkeits- und Längenmessung erheblich reduziert wird. Man kann zwar versuchen, die Empfindlichkeit der Detektoren zu erhöhen, doch läuft man dann Gefahr, daß auch solche Fahrzeuge noch registriert werden, die auf der Nachbarspur vorbeifahren.

Zweitens erreichte die bei einer gleichzeitigen Erfassung an 10 Querschnitten anfallende Datenmenge einen Umfang, der auch bei der zur Verfügung stehenden Großrechenanlage wirtschaftlich kaum vertretbare Rechenzeiten für die vollautomatische Auswertung erfordert hätte. Immerhin fallen schon bei einer mittleren Verkehrsstärke von 2 000 Fhz/h pro Beobachtungsstunde mindestens 60 000 Zeitpunkte und die entsprechenden 60 000 Eingangs-Kanalnummern in chronologischer Reihenfolge an.

Drittens war die Gesamtlänge der Meßstrecke (1 km) zu kurz, um die interessantesten mikroskopischen Phänomene, wie z.B. Annäherungs- oder Überholungsvorgänge, in ihrem ganzen Ablauf vollständig zu er-

fassen. Dazu kam noch die Schwierigkeit, die Fahrlinien der beobachteten Fahrzeuge zwischen den einzelnen Meßquerschnitten interpolieren zu müssen, was eine weitere Genauigkeitseinbuße zur Folge gehabt hätte.

Nachdem sich herausgestellt hatte, daß wesentliche Verbesserungen der Erfassungsgenauigkeit von der Geräteseite her mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht erreicht werden konnten, mußte die ursprüngliche Konzeption der Meßstrecke aufgegeben werden. Um die bereits installierten Anlagen weiterhin sinnvoll nutzen zu können, wurde die Zahl der für Geschwindigkeits- und Fahrzeuglängen-Messungen eingerichteten Querschnitte auf je einen am Anfang und am Ende und zwei in der Mitte der Meßstrecke reduziert. Um die Auswirkungen der Erfassungsgenauigkeiten zu vermindern, wurden außerdem die Bruttoabstände der beiden Induktionsschleifen vergrößert. An den restlichen 7 Querschnitten verblieb eine Induktionsschleife pro Fahrstreifen. Damit war es nach wie vor möglich, die Fahrlinien der Fahrzeuge an insgesamt 11 Punkten im Abstand von je 100 m zu erfassen. Registriert man die Fahrzeugdurchgänge in zweckmäßiger Weise auf dem Wachspapierstreifen eines Timerecorders, so kann zumindest die Anzahl der Spurwechsel auf der gesamten Meßstrecke sehr verlässlich durch manuelle Auswertung festgestellt werden (Abb. 43). Dieser Größe kommt bei der Eichung des Simulationsmodells für den mehrspurigen Verkehr besondere Bedeutung zu.

6.4 Vergleich mit den Simulationsergebnissen

Da sich die vorliegende Untersuchung auf reinen Pkw-Verkehr bezieht, mußten entsprechende Messungen an Sonntagen vorgenommen werden, an denen nur verschwindend wenige Nicht-Pkw unterwegs sind. Die beiden Messungen, deren Ergebnisse in diesem Bericht Verwendung finden, fanden am 17.11.1974 bzw. am 26.1.1975 statt. An beiden Tagen herrschte trockenes, sonniges oder leicht bedecktes Herbst- bzw. Winterwetter mit Temperaturen von 10 - 15 °C. Leider konnten, jahreszeitlich bedingt, nur kleine bis mittlere Verkehrsstärken beobachtet werden. In die Darstellungen der Meßergebnisse sind jeweils die Bereiche eingezeichnet, in denen sich die entsprechenden Werte der Simulationsreihe 120/17 bewegen.

Die gemessenen Fundamentaldiagramme des Gesamtquerschnitts (Abb. 44) und der einzelnen Fahrstreifen (Abb. 45 und 46) zeigen generell den gleichen Verlauf wie die simulierten. Auch die Streuung der Meßpunkte entspricht im Bereich der beobachteten q - k - Werte den Simulationsergebnissen. Es wurde durchschnittlich etwas schneller gefahren als im Simulationsmodell, was darauf schließen läßt, daß die mittlere Wunschgeschwindigkeit im realen Verkehr mehr als 120 km/h betrug.

Da bei den eigenen Messungen nur verhältnismäßig niedrige Verkehrsstärken beobachtet werden konnten, wurden die Simulationsergebnisse zusätzlich mit Messungen verglichen, die an einigen Wochenenden im Oktober 1968 auf der Bundesautobahn Salzburg-München

durchgeführt wurden (ZACKOR 1972). Die Gegenüberstellung der Simulationsreihe 120/17 mit dem Osterverkehr 1968 zeigt beim Fundamentaldiagramm des Gesamtquerschnitts (Abb. 47) befriedigende Übereinstimmung im ganzen Wertebereich. Lediglich im Bereich der Streckenleistungsfähigkeit wurden auf der BAB Salzburg-München teilweise höhere Verkehrsdichten gemessen als im Simulationsmodell auftreten. Dies hängt sicher auch mit der Lage der Meßstelle zusammen, die sich bei der Messung 1968 innerhalb eines auf längere Strecken hochbelasteten Autobahnabschnitts befand, während im Simulationsmodell schon 1 km nach der Meßstelle wieder freier Verkehrsfluß herrscht (siehe auch Abschnitt 5.1).

Während das gemessene Fundamentaldiagramm der Überholspur bis auf den Bereich großer Verkehrsdichten annähernd mit den Simulationsergebnissen übereinstimmt, zeigt sich bei den Meßwerten der Fahrspur ein auffälliger Unterschied (Abb. 48). Die Simulation ergibt auf der Basis von 5-Minuten-Intervallen Verkehrsstärken bis zu 1 600 Fhz/h auf der Fahrspur. Dagegen wurden auf der BAB Salzburg-München nur maximal 1 350 Fhz/h beobachtet. Zweierlei Erklärungen dieser Diskrepanz sind denkbar. Auf der einen Seite kann man annehmen, daß sich die Teilkollektive auf den beiden Fahrstreifen in ihrem Fahrverhalten in Wirklichkeit mehr unterscheiden als es bei der Simulation der Fall ist. Wenn die Fahrer auf der Fahrspur beispielsweise systematisch größere Folgeabstände anstreben als auf der Überholspur, dann können (bei gleicher Geschwindigkeit) auch nur geringere Verkehrsdichten und -stärken auftreten. Da im Simulationsmodell von

der Annahme ausgegangen wird, daß die Fahrer-Fahrzeug-Merkmale über die Zeit und über den Weg konstant bleiben, könnte man aus der damit verbundenen unrealistisch hohen Leistungsfähigkeit der Fahrspur den Schluß ziehen, daß sich die Fahrercharakteristiken in Wirklichkeit nach einem Spurwechsel zumindest teilweise verändern.

Plausibler erscheint jedoch eine Erklärung, die sich auf eine grundsätzliche Schwierigkeit bezieht, die bei der digitalen Simulation des Verkehrsablaufs auf der Basis mikroskopischer Verhaltens- und Entscheidungsmodelle auftritt. Sowohl die aus Wirtschaftlichkeitsgründen notwendigen Einschränkungen bezüglich Speicherbedarf und Rechenzeit als auch die Unvollständigkeit der bisher vorliegenden Erkenntnisse über die sicherlich äußerst komplexen Entscheidungsmechanismen lassen nur verhältnismäßig einfache Verhaltensmodelle implementierbar erscheinen. Wie bereits im Abschnitt 3.5.2 angedeutet, besteht eine der schwerwiegenden Abstraktionen darin, daß die simulierten Entscheidungen im wesentlichen auf der Grundlage der aktuellen Verkehrskonstellation in der Umgebung der einzelnen Fahrzeuge getroffen werden müssen. Dies widerspricht aber offensichtlich dem im realen Verkehrsablauf zu beobachtenden Verhalten, wie aus der Betrachtung des Spurverhaltens bei starkem Verkehr besonders deutlich hervorgeht. Die Wahrnehmung eines langsameren Fahrzeugs vor sich und die gleichzeitige Wahrnehmung eines schnelleren Fahrzeugs oder gar einer ganzen Kolonne hinter sich veranlaßt die Fahrer häufig zu vorzeitigen Spurwechseln. Dieser Verhaltensweise liegen einerseits Fehleinschätzungen bezüglich der voraussichtlichen Zeitpunkte der Überholungen

zugrunde, andererseits fürchten diese Fahrer offenbar, daß ihre Überholmöglichkeiten durch andere sie selbst überholende Fahrzeuge eingeschränkt werden könnten. Auf diese Weise entstehen auf der Fahrspur immer wieder große Zeit- und Weglücken, die die Verkehrsstärke und -dichte sowie die Leistungsfähigkeit entsprechend verringern. Das Simulationsmodell kann zwar noch weiter verfeinert werden, um auch das hier geschilderte Spurverhalten wirklichkeitsgetreuer abzubilden, doch zeigen sich hier wohl auch prinzipielle Grenzen der Simulation des Verkehrsablaufs.

Auch die Simulationsreihe 100/10 zeigt befriedigende Übereinstimmung mit entsprechenden Meßergebnissen, wenn man von der oben diskutierten Frage der Fahrspur-Leistungsfähigkeit absieht (Abb. 49). Die Meßwerte stammen ebenfalls von der BAB-Strecke Salzburg-München aus einer Zeitspanne, in der mit ferngesteuerten Wechselverkehrszeichen eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h angezeigt wurde.

Die Messungen der Überholspurbelegung auf der BAB Bruchsal-Karlsruhe (Abb. 50) ergaben geringfügige Abweichungen zu den Simulationsergebnissen dahingehend, daß die Überholspur im Bereich kleiner und mittlerer Verkehrsstärken in Wirklichkeit teilweise etwas weniger belastet ist. Dafür sind im wesentlichen zwei Gründe verantwortlich. Einmal kann man öfters beobachten, daß ein schnelleres Fahrzeug ohne Verminderung der eigenen Geschwindigkeit verhältnismäßig dicht an ein vorausfahrendes Fahrzeug heranfährt, bevor es schließlich auf die Überholspur ausschert. Voraussetzung für ein solches Fahrver-

halten ist allerdings, daß während des Annäherungsvorgangs die Überholspur völlig frei ist. Zum anderen ist bei schwachem Verkehr eine größere Bereitschaft zu beobachten, einzelnen schnelleren Fahrzeugen Platz zu machen, auch wenn dies kurzzeitige Geschwindigkeitsminderungen zur Folge hat. Offenbar wird dieses Verhalten ermöglicht durch die Gewißheit, daß die Freizügigkeit in solchen Fällen sehr schnell wieder hergestellt sein wird.

Die Spurwechselhäufigkeiten der Feldmessungen und der Simulationsergebnisse liegen bei schwachem und mittlerem Verkehr in der gleichen Größenordnung (Abb. 51). Daß die simulierten Werte bei stärkerem Verkehr etwas niedriger zu sein scheinen, kann als Folge des verhältnismäßig kleinen Stichprobenumfangs der Messungen zufallsbedingt sein. Möglicherweise sind aber auch hier noch Verbesserungen bei der Simulation des Spurwechselverhaltens denkbar.

7 Zusammenfassung

Die Komplexität möglicher mathematischer Modelle des Verkehrsflusses im Bereich des teilgebundenen Verkehrs legte den Versuch nahe, umfassendere Kenntnisse über die zu untersuchenden Gesetzmäßigkeiten auf dem Wege der numerischen Behandlung des Problems zu gewinnen. Auf der Basis bereits vorhandener Modellvorstellungen für den Verkehrsfluß auf einspurigen Richtungsfahrbahnen wurde ein Simulationsprogramm entwickelt und ausführlich beschrieben, das die simulationstechnische Behandlung des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Richtungsfahrbahnen ermöglicht.

Im Mittelpunkt der modellmäßigen Beschreibung der Interaktionen zwischen den Fahrer-Fahrzeug-Elementen auf der freien Strecke steht ein Wahrnehmungs- und Entscheidungsmodell für das Spurwechselverhalten. Die Simulationsergebnisse zeigen, daß der gewählte Modellansatz das Verhalten der Verkehrsteilnehmer hinreichend wirklichkeitsgetreu abzubilden vermag.

Die Abgrenzung verschiedener Zustandsformen des Verkehrsablaufs ist eng verknüpft mit der Frage der Bewertung der Verkehrsqualität. Die Betrachtung einiger aus der Literatur bekannter Vorschläge für Qualitätsmaßstäbe des Verkehrsablaufs führt zu der Erkenntnis, daß komplexe Qualitätsindizes, die aus einer Verknüpfung unterschiedlicher Kenngrößen hervorgehen, nur beschränkte Aussagekraft besitzen. Als Qualitätsindikatoren sollten vielmehr möglichst einfache verkehrliche Kennwerte verwendet werden, in

denen sich veränderte Einflußfaktoren eindeutig und sensibel widerspiegeln.

Mit Hilfe des Simulationsmodells wurden einige denkbare Indikatoren auf ihre qualitativen und quantitativen Abhängigkeiten von variablen Einflußgrößen untersucht, wobei aus der Vielfalt möglicher Einflußfaktoren die Verkehrsstärke einerseits und die Verteilung der Wunschgeschwindigkeit andererseits ausgewählt wurden.

Die Simulationsergebnisse lassen vermuten, daß die Zustandsform des teilgebundenen Verkehrs den Verkehrsstärkebereich von ca. 800 - 1 000 Fhz/h bis in die Nähe der Streckenleistungsfähigkeit bei ca. 2 700 - 3 000 Fhz/h umfaßt. Den Übergang vom freien zum teilgebundenen Verkehr signalisieren am deutlichsten die Indikatoren Spurwechselhäufigkeit und mittlere Geschwindigkeit; der Übergang vom teilgebundenen zum gebundenen Verkehr zeichnet sich am auffälligsten bei den Indikatoren Zeitverlust und mittlere Geschwindigkeit ab.

Die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten, annähernd beschrieben durch die Geschwindigkeiten im freien Verkehrsfluß und in gewissen Grenzen durch verkehrsregelnde Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Richtgeschwindigkeiten steuerbar, hat wohl einen Einfluß auf die quantitative Ausprägung der untersuchten verkehrlichen Kenngrößen, verändert jedoch nur in sehr geringem Maße die qualitative Form der Abhängigkeit zwischen den Kenngrößen und der Verkehrsstärke.

Wenn man den teilgebundenen Verkehr im Sinne einer Level of Service-Definition in weitere Teilbereiche unterschiedlicher Verkehrsqualität zu gliedern versucht, dann läßt sich aus den untersuchten Zusammenhängen nur eine Aufteilung begründen, die etwa gleichgroße Verkehrsstärkebereiche voneinander abgrenzt. Dies folgt aus der Tatsache, daß alle untersuchten Indikatoren im Bereich des teilgebundenen Verkehrs eine mehr oder weniger lineare Abhängigkeit von der Verkehrsstärke zeigen.

Die quantitativen Ergebnisse, die aus der simulations-technischen Behandlung der vorgegebenen Fragestellung resultieren, sind sicherlich nicht unbesehen für praktische Anwendungen zu übernehmen. Sie müssen vielmehr durch empirische Untersuchungen bestätigt und möglicherweise modifiziert werden. Die Kenntnisse der qualitativen Zusammenhänge kann aber entscheidend zur optimalen Auslegung der meist aufwendigen Messungen beitragen.

Mit dem entwickelten Modellansatz für das Spurverhalten wurde ein erfolgversprechender Weg aufgezeigt, wie man den mehrspurigen Verkehrsablauf simulativ nachbilden kann. Vergleiche der Simulationsergebnisse mit eigenen und bereits bekannten Meßergebnissen haben jedoch auch ergeben, daß weitere Verfeinerungen des Modells möglich sind. Insbesondere lassen die bisherigen Untersuchungen vermuten, daß das Spurwechselverhalten in bestimmten Verkehrssituationen stärker von makroskopischen Bedingungen geprägt wird als ursprünglich zu vermuten war.

8. Literaturverzeichnis

- BRILON, W.: Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern; Vorläufiger Bericht des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Nr. 18. Karlsruhe 1973.
- BECKMANN, H.; u.a.: Das Fundamentaldiagramm. Eine Zusammenstellung bisheriger Erkenntnisse; Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 89. Bonn-Bad Godesberg: Kirschbaum 1973.
- CHIMINI, L.A.; DAWSON, R.F.: The Hyperlang probability distribution - a generalised traffic headway model; Highway Research Record 230. Washington 1968.
- COERS, H.: Die internationale Forschungsentwicklung und das räumlich-zeitliche Prinzip mikroskopischer und makroskopischer Untersuchungen des Verkehrsflusses; In: Die Straße, 10(1970), Heft 7.
- COERS, H.: Über die Methodik der wissenschaftlichen Erforschung des Straßenverkehrsflusses; Dissertation, Technische Universität Dresden 1969.
- DREW, D.R.; KEESE, Ch. J.: Freeway level of service as influenced by volume and capacity characteristics; Highway Research Record 99. Washington 1965.
- DREW, D.R.: Traffic flow theory and control; New York: McGraw-Hill 1968.
- EBERT, H.-P.: Leistungsfähigkeit zukunftsorientierter Verkehrsdatensysteme; In: Straßenverkehrstechnik, 15 (1971), Heft 4.
- GREENSHIELDS, D.; GEORGE, H.P.; u.a.: Quality and theory of traffic flow; Bureau of Highway Traffic, Yale University, 1961.

HIGHWAY RESEARCH BOARD: Highway Capacity Manual:
Special Report 87. Washington 1965.

HIGHWAY RESEARCH BOARD: Variables influencing spot-speed characteristics. Review of the literature; Special Report 89. Washington 1966.

HIGHWAY RESEARCH BOARD: Measures of the quality of traffic service. A compendium; Special Report 130. Washington 1972.

HÖLSKEN, D.: Der mehrspurige Verkehrsablauf auf Stadtstraßen. Leistungsfähigkeit von zweispurigen Spurwechselstrecken; Fortschritt-Berichte VDI-Zeitschrift, Reihe 12, Nr. 8, 1965.

HOHLE, P.: Auswirkungen unterschiedlicher Verkehrsordnungen auf den Verkehrsablauf auf mehrspurigen Richtungsfahrbahnen in städtischen Verdichtungsgebieten; Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2408. Opladen: Westdeutscher Verlag 1974.

JACOBS, F.: Untersuchungen zur stochastischen Theorie des Verkehrsablaufs auf Straßen; Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 96, 1970.

LEUTZBACH, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses; Berlin: Springer-Verlag 1972.

LEUTZBACH, W.; EGERT, P.: Overtaking in free traffic; In: Proceedings of the second international symposium on the theory of road traffic flow, London 1963, Ed. Joyce Almond. Paris: OECD 1965.

LEUTZBACH, W.; MARTIN, W.: Untersuchungen über die Möglichkeit, Verkehrsstärkeerhebungen im Rahmen städtischer bzw. regionaler Verkehrsplanungen durch Verkehrsdichteerhebungen zu ersetzen. Zusatzuntersuchung zum Forschungsauftrag G5(18/69) des Bundesministers für Verkehr. Karlsruhe 1973.

MICHAELS, R.M.: Perceptual factors in car following; In: Proceedings of the second international symposium on the theory of road traffic flow, London 1963, Ed. J. Almond. Paris: OECD 1965.

MARTIN, W.: Verkehrsablauf auf Stadtstraßen mit Lichtsignalanlagen; Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen 1975.

PAMPEL, F.: Ein Beitrag zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Straßen; Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 15, 1955.

PLATT, F.N.: A proposed index for the level of traffic service; In: Traffic Engineering 1963.

SCHUHL, A.: The probability theory applied to distribution of vehicles on two-lane highways; In: Poisson and Traffic. Eno Foundation 1955.

STEIERWALD, G.: Einfaches Verfahren zur Erfassung des Verkehrsablaufs an einem Straßenquerschnitt; In: Straße, Brücke, Tunnel 1969, Heft 7/8.

THILO, P.; DREBINGERS, K.: Ein Datenerfassungssystem für den Straßenverkehr mit dem Verkehrsregistriergerät VRG 1630; In: Straßenverkehrstechnik, 14(1970), Heft 2.

TODOSIEV, E.P.: The action point model of the driver-vehicle system; Ohio State University Eng. Exp. Station Rep. Nr. 2o2A-3. Columbus, Ohio 1963.

TRAPP, K.H.: Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf Landstraßen; Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 113, 1971.

TREITERER, J. et al.: Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetry techniques; Interim Report EES 278-3. Ohio State University 1970.

WARDROP, J.G.: Some theoretical aspects of road traffic research; Proc. Instn. Civ. Engrs, Part II, 1952.

WIEDEMANN, R.: Möglichkeiten zur Beschreibung des Verkehrsflusses; In: Zehn Jahre Institut für Verkehrswesen, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 6. Karlsruhe 1972.

WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesens der Universität Karlsruhe, Heft 8. Karlsruhe 1974.

ZACKOR, H.: Beurteilung verkehrsabhängiger Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen; Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 128, 1972.

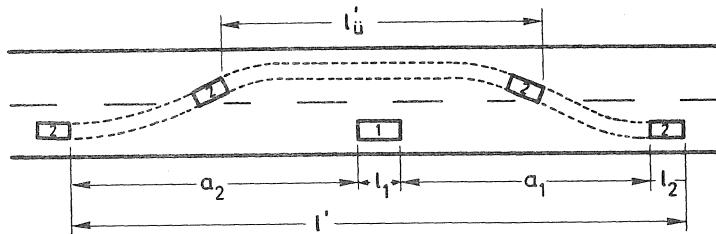
9. Anhang

Bestimmung des Meßquerschnitt-Abstandes

Sowohl die Kapazität des Datenerfassungsgerätes als auch die verfügbaren finanziellen Mittel begrenzten die Anzahl der Meßquerschnitte auf etwa zehn. Um Einzelfahrzeuge über geraume Zeit beobachten zu können, sollte die Meßstrecke möglichst lang sein. Andererseits durften zwei Meßquerschnitte nicht so weit voneinander entfernt sein, daß zwischen ihnen Überholvorgänge ablaufen können, bei denen das überholende Fahrzeug nicht wenigstens einmal auf der Überholspur registriert wird.

Betrachtet man den Überholvorgang zweier Fahrzeuge, die mit gleichbleibender Geschwindigkeit fahren, (das schnellere mit v_2 , das langsamere mit v_1) vom Beginn des Ausscherens bis zur Beendigung des Einscherens des überholenden Wagens, dann verschiebt sich das schnellere Fahrzeug gegenüber dem langsameren um die relative Strecke l' mit der relativen Geschwindigkeit $v_2 - v_1$. Der in Wirklichkeit zurückgelegte Weg l , der Überholweg ist

$$l = l' * \frac{v_2}{v_2 - v_1}$$



Die Abstände a_2 bzw. a_1 , bei denen die Spurwechsel eingeleitet bzw. abgeschlossen werden, hängen ab von der Dauer eines Spurwechsels und vom Sicherheitsabstand zwischen den beiden Fahrzeugen. Nimmt man für die numerische Berechnung an, die Dauer eines Spurwechsels betrage im Mittel 2 sek (unterer Grenzwert), und der unbedingt einzuhaltende Sicherheitsabstand werde nach der "Halber Tachoabstand" - Regel gewählt, dann ist bei großen Geschwindigkeitsdifferenzen ($v_1 < \frac{3}{4}v_2$) die während des Spurwechsels zurückgelegte Wegstrecke größer als der Sicherheitsabstand, d.h. der Spurwechsel muß eingeleitet werden, bevor der Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug unterschritten wird. Bei kleineren Geschwindigkeitsdifferenzen ($v_1 > \frac{3}{4}v_2$) bestimmt dagegen der erforderliche Sicherheitsabstand den Zeitpunkt des Spurwechsels.

$$a_2 = \begin{cases} \frac{1}{2} v_2 & \text{für } v_1 > \frac{3}{4}v_2 \\ 2 (v_2 - v_1) & \text{für } v_1 < \frac{3}{4}v_2 \end{cases}$$

$$a_1 = \begin{cases} \frac{1}{2} v_2 & \text{für } v_1 > \frac{3}{4}v_2 \\ 2(v_2 - v_1) & \text{für } v_1 < \frac{3}{4}v_2 \end{cases}$$

Nimmt man weiterhin an, daß ein überholendes Fahrzeug erst dann mit Sicherheit von einer Induktionsschleife auf der Überholspur gemeldet wird, wenn es bereits ca. 2/3 der Spurwechselstrecke a_2 zurückgelegt hat, und daß es schon in der Entfernung $\frac{1}{3}a_1$ nicht mehr auf der Überholspur erfaßt werden kann, dann ergibt sich der vom überholenden Fahrzeug auf der Überholspur zurückgelegte Weg zu

$$l_{\ddot{u}} = \frac{1}{3}a_2 + l_1 + \frac{1}{3}a_1$$

und

$$l_{\ddot{u}} = \frac{v_2}{v_2 - v_1} (\frac{1}{3}a_2 + l_1 + \frac{1}{3}a_1)$$

Haben die Meßquerschnitte einen gegenseitigen Abstand x , so werden alle Überholungen registriert, für die $l_{\ddot{u}} > x$ gilt. Ist der Weg auf der Überholspur kleiner als der Meßquerschnittabstand, dann wird eine Überholung nur mit der Wahrscheinlichkeit $p = l_{\ddot{u}}/x$ erfaßt, wenn man annimmt, daß sich die Überholungen gleichmäßig über eine betrachtete Strecke verteilen.

$$p(v_1, v_2) = \begin{cases} 1 & \text{für } l_{\ddot{u}} > x \\ \frac{l_{\ddot{u}}}{x} & \text{für } l_{\ddot{u}} < x \end{cases}$$

Die Anzahl der Überholungen ergibt sich bei freiem Verkehr nach LEUTZBACH und EGERT 1965 zu

$$\ddot{u} = k^2 \int_{v_1=0}^{\infty} dG_m(v_1) \int_{v_2=v_1}^{\infty} (v_2 - v_1) dG_m(v_2)$$

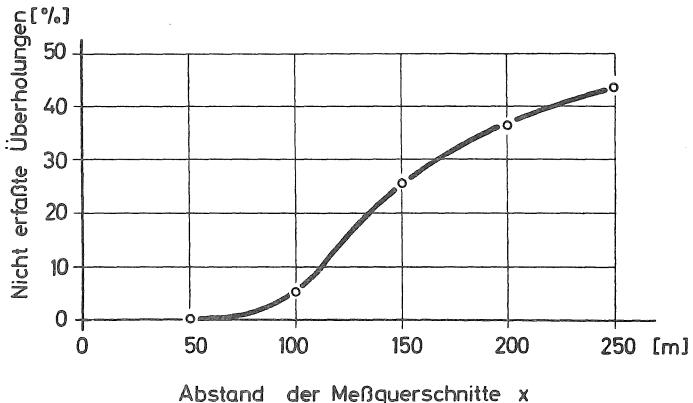
k = Verkehrsdichte (Fhz/km)

$G_m(v)$ = Verteilungsdichte der momentanen Geschwindigkeiten

Danach ist die Zahl der erfaßten Überholungen:

$$\ddot{u}_E = k^2 \int_{v_1=0}^{\infty} dG_m(v_1) \int_{v_2=v_1}^{\infty} (v_2 - v_1) * p(v_1, v_2) * dG_m(v_2)$$

Die nachstehende Abbildung zeigt die numerische Ausrechnung der nicht erfaßten Überholungen in Abhängigkeit vom Meßquerschnittabstand x .



Als Geschwindigkeitsverteilung wurde die Normalverteilung mit Mittelwert $\bar{v}_m = 80 \text{ km/h}$ und Standardabweichung $\sigma_v = 10 \text{ km/h}$ angenommen.

Für den Ausbau der Meßstrecke wurde der Abstand der Meßquerschnitte zu 100 m gewählt, so daß angenommen werden konnte, daß nicht mehr als ca. 5 % der Überholtorgänge unentdeckt bleiben würden. Die Testmessungen, bei denen die Spurwechselvorgänge von Zählpersonen manuell erfaßt und mit den Zeitschreiberaufzeichnungen verglichen wurden, haben ergeben, daß in keinem Fall ein beobachteter Spurwechsel nicht auch aus dem Zeitschreiberprotokoll hervorging. Dies liegt sicher daran, daß für die oben durchgeföhrten Berechnungen sicherheitshalber nur fahrdynamische Werte herangezogen wurden, die jeweils sehr ungünstige Fälle repräsentieren.

10. ALGOL-Programm

begin
comment Vereinbarung der Variablen

.

comment Eingabe der Steuerdaten

- LFNAM Laufname
- IZF Zufallszahl
- XA Streckenanfang
- XE Streckenende
- KMAX maximale Verkehrsdichte
- WQ mittlere Wunschgeschwindigkeit
- EPSW Variationskoeffizient von WQ
- WMIN kleinste Wunschgeschwindigkeit
- WMAX größte Wunschgeschwindigkeit
- TAMES Meßbeginn
- DTMES Meßintervall
- NQU Anzahl der Meßquerschnitte

LSIM=XE-XA

NIND=2Ø+KMAX*LSIM/1ØØØ

NDAT=NIND+1Ø NMX=NIND

begin

comment Vereinbarung der Felder

- IND Indexliste
- W,L,Z1,Z2,Z3,Z4,S, Fahrzeugkenndaten
- X,V,B,DX,DV,RV,RS,BR
- MON,MOV,MOB,MOVV momentane Meßgrößen
- LOM,LOV,LOB,LOVV,LOR lokale Meßgrößen
- RZDX,RZDT räumlich-zeitliche
- Meßgrößen
- GDX,GDTV,GDTW,GDTF,
- GDTB,GSW,GLSV,GLSW,
- globale Meßgrößen
- GLNV,GLNW
- XQU Meßquerschnitte

comment Zufallsgeneratoren

real1 procedure ZFG

begin ZFG=UNIFORM(Ø,1,IZF) end

```
real1 procedure ZFN
begin real1 Z
MRPT: Z=NORMAL(Ø.5, Ø.166, IZF)
      if Z less Ø.Ø1 then goto MRPT
      else if Z greater Ø.99 then goto MRPT
      ZFN=Z
end

comment Unterprogramm Interaktion
procedure INTAC2(I, J1, K1, J2, K2)
      value   I, J1, K1, J2, K2
      integer I, J1, K1, J2, K2
begin
      integer J, H
      real1   DXI, DVI, AX, BX, ABX, EX, SDX, SDV, SDXP,
              SDVP, DVW, DXK, CLDV, OPDV, ZF1, ZF2, ZF3,
              VT, WI, CX, BØ, DAB, ZBX
      boolean K1FREI, J1FREI, K2FREI, J2FREI, IFREI
comment Unterprogramm Nachbar
procedure NACHBAR(IV, IH, FX, FV, FREI, MVMU)
      value   IV, IH, FX, FV
      integer IV, IH           real1 FX, FV
      boolean FREI             label MVMU
begin
      real1   AX, DX, DV
      AX=L(IV)           DX=X(IV)-X(IH)           FREI=false
      if DX less BX+AX then goto MVMU
      DV=V(IH)-V(IV)
      if DV notgreater Ø then
          begin
          SDXP=AX+FX*BX
          FREI=DX greater SDXP
          goto EXNA
          end
      SDV=(DX-AX)/CX           SDV=SDV*SDV
      if DV greater SDV then goto MVMU
      SDXP=AX+FX*BX
      if DX notgreater SDXP then
          begin
          FREI=false
          goto EXNA
          end
      SDVP=FV*SDV
      FREI=DV less SDVP
      EXNA: end
```

comment Unterprogramm V o r d e r m a n n

procedure VORDERMANN

```
begin
DX(I)=DXI=X(J)-X(I)      DV(I)=DVI=VI-V(J)
BR(I)=B(J) less -Ø.5-1.5*Z3(J)
AX=L(J)
if DVI greater Ø then BX=ZBX*SQRT(V(J))
DAB=AX+BX-DX(J)
if DAB greater Ø then BX=BX+DAB
AX=AX+ZF1      ABX=AX+BX
if DXI notgreater ABX then goto MBRA
EX=2.Ø-ZF2+ZFN  SDX=AX+EX*BX
SDV=(DXI-AX)/CX  SDV=SDV*SDV
end
```

comment Unterprogramm W u n s c h

procedure WUNSCH

```
begin
real1 BI,BMAX,TOL
RV(I)=if RV(I) greater 1 then 1 else Ø
TOL=1.4-ZF2
if DVW less -TOL-Ø.4 then
begin
BMAX=(Ø.2+Ø.8*ZF3)*(7.Ø-Ø.9*SQRT(VI))
if DXI less 2*ABX and DVI greater -BMAX
then BI=DVI*(DXI-ABX)/ABX else BI=BMAX
B(I)= if BI less BØ then BØ else BI
goto EXWU
end
if DVW less -TOL then
begin
B(I)=BØ      goto EXWU
end
if DVW less TOL then
begin
B(I)=if B(I) less Ø then -BØ else BØ
goto EXWU
end
B(I)= -BØ
end
```

comment Unterprogramm F o l g e n

```
begin
RV(I)= if DX(J) less ABX and BR(J) then 3 else 2
B(I)= if B(I) greater Ø then BØ else -BØ
end
```

```
comment Unterprogramm B r e m s a x

begin
    real1 BI,BMIN,RVX
    if RV(I) less 4
    then begin
        RVX=1.Ø+Ø.25*RV(I)      RV(I)=4
        end
    else begin
        RVX=RV(I)-2            RV(I)=RV(I)+1
        end
    BMIN= -8.Ø-2*ZF3+Ø.5*SQRT(VI)
    if DXI greater AX
    then begin      B(I)=BMIN
        if DXI less L(J) then UNFALL(I,J,T)
        if VI notgreater Ø then B(I)=Ø
        goto EXBA
        end
    BI;if BR(I) then B(J) else Ø
    if DVI greater Ø
    then BI=BI+Ø.5*DVI*DVI/(AX-DXI)+2*(DXI-ABX)/BX
    BI=BI+(1.Ø-ZF2)*(1.Ø-2*ZFN)/RVX
    BØ= -BØ
    if BI greater BØ
    then B(I)=BØ
    else begin
        if BI less BMIN then BI=BMIN
        if RVX greater 1.5 or BR(I)
        then B(I)=BI else B(I)=BI*ZFN
        end
    EXBA:
end
```

```
comment Unterprogramm B r e m s b x
```

```
procedure BREMSBX
begin
    real1 BI,BMIN,RVX
    if RV(I) less 4
    then begin RVX=1+Ø.25*RV(I)      RV(I)=4      end
    else begin RVX=RV(I)-2      RV(I)=RV(I)+1      end
    if BR(I) and (BR(J) or DXI less 2*ABX)
    then DVI=DVI-B(J)
    if DVI greater Ø
    then BI=Ø.5*DVI*DVI/(ABX-DXI) else BI=Ø
    BØ= -BØ
    if BI greater BØ
    then B(I)=BØ
```

```
else begin
    BI=BI+(1-ZF2)*(1-2*ZFN)/RVX
    BMIN= -8.Ø-2*ZF3+Ø.5*SQRT(VI)
    if BI less BMIN then BI=BMIN
    if RVX greater 1.5 or BR(I)
    then B(I)=BI else B(I)=BI*ZFN
end

comment Unterprogrammrumpf Interaktion

VI=V(I)          WI=W(I)          DV=VI-WI
ZF1=Z1(I)        ZF2=Z2(I)        ZF3=Z3(I)
ZBX=2.Ø+6.Ø*ZF1           BX=ZBX*SQRT(VI)
CX=2Ø.Ø*(1.Ø+ZF1+ZF2)+Ø.5*VI
BØ=Ø.2*(Z4(I)+ZFN)
if RS(I) less RSMIN then
begin if SI equal 1
    then begin J=J1 J2FREI=true goto MVM1 end
    else begin J=J2 goto MVM2 end
end
if SI equal 2 then goto MSP2
comment Fahrzeug I fährt auf der Fahrspur
J=J1
NACHBAR(J2,I,2.Ø,Ø.5,J2FREI,MVM1)
NACHBAR(I,K2,2.Ø,Ø.5,K2FREI,MVM1)
if not J2FREI and WI greater V(J2)+2.78
then begin WI=V(J2)+2.78   DVW=VI-WI
        if DVW greater 1.4 then BØ=BØ+Ø.5+Ø.1*DVG
end
VORDERMANN
if DXI not greater SDX or DVI not less SDV
then IFREI=false
else begin
    IFREI=true  goto MWUN
end
if DVW greater -1.5 then goto MWOV
if DVW not less -4.2 then
begin
    if K2FREI then goto MVJ2 else goto MWOV
end
if K2FREI then goto MSW2
MVJ2:
if J2FREI then goto MSW2
if V(J2) greater V(J1)+4.2
then goto MSW2 else goto MWOV
MSW2:
S(I)=2    RS(I)=Ø     J=J2    goto MVM2
```

```
MSP2:
comment Fahrzeug I fährt auf der Überholspur
J=J2
NACHBAR(I,K1,1.8,Ø.5,K1FREI,MVM2)
NACHBAR(J1,I,4.Ø,Ø.5,J1FREI,MVM2)
VORDERMANN
if DXI notgreater SDX or DVI notless SDV
then IFREI=J2FREI=false
else begin
    SDVP=(Ø.8-Ø.Ø1*DVI)*SDV
    J2FREI=DVI less SDVP
    IFREI=true
end
if J1FREI
then begin
    if K1FREI
    then begin
        if J2FREI then goto MSW1
        if VI less 1Ø.Ø then goto MSW1
        goto MLHU
    end
    if J2FREI then goto MLHU else goto MWOV
end
else goto MWOV
MLHU:
DXK=X(I)-X(K2)
if DXK less ABX+1Ø and W(K2) greater WI+4.2
then goto MSW1 else goto MWOV
MSW1:
S(I)=1    RS(I)=Ø    J=J1    goto MVM1
MWOV:
if IFREI then goto MWUN else goto MVMX
MVM1:
if not J2FREI and WI greater V(J2)+2.78
then begin
    WI=V(J2)+2.78    DVW=VI-WI
    if DVW greater 1.4 then BØ=BØ+Ø.5+Ø.1*DVG
end
VORDERMANN
goto MVMX
MVM2:
VORDERMANN
MVMX:
if DXI greater SDX
then begin
    if DVI less SDV then goto MWUN else goto MBRB
end
```

```
C LDV=SDV*EX*EX
if DVI notless CLDV then goto MBRB
OPDV=C LDV*(-1.Ø-2*ZFN)
if DVI greater OPDV then goto MFOL else goto MWUN
MWUN:   WUNSCH  goto EXIT
MFOL:   FOLGEN  goto EXIT
MBRB:   BREMSBX goto EXIT
MBRA:   BREMSAX goto EXIT
EXIT:
end Unterprogramm Interaktion

comment Unterprogramm U n f a l l
procedure UNFALL(I,J,T)  integer I,J,T
begin
WRITE(..Format.., I,J,T,X(I),S(I),...)
X(I)=X(J)-L(J)-Ø.5
V(I)=V(J)  B(I)=B(J)
NUNF=NUNF+1
if NUNF greater 100 then goto EOSI
end

comment Eingabe der Meßquerschnitte,
.           Ausgabe der Steuerdaten auf Datenfile
.
.

comment Virtuelle Fahrzeuge am Streckenanfang
und am Streckenende
S( 1)=1  X( 1)=XE+1ØØ    V( 1)=Ø      W( 1)=Ø
S( 2)=2  X( 2)=XE+1ØØ    V( 2)=Ø      W( 2)=Ø
S(-1)=1  X(-1)=XA-999    V(-1)= Ø
S(-2)=2  X(-2)=XA-999    V(-2)= Ø
comment Anfangswerte
NINPT=NUNF=Ø    INXT=IANF=3    RSMIN=7
NA=1            NE=Ø          TIN=Ø
TAM=TIMES=TAMES   SIGW=EPSW*WQ   XIN=XA-1ØØ
XQU(-1)=XA-999  XQU(NQU)=XE

DECS: comment Programmteil D E C S
begin
procedure SUHI(SK)  integer SK
begin  integer IK,NK
NK=N
MHIA:  NK=NK+1
```

```
if NK greater NE
then begin IK= -SK    goto EXHI end
IK=IND(NK)
if S(IK) notequal SK then goto MHIA
EXHI:
if SK equal 1 then K1=IK else K2=IK
end procedure SUHI
J1=1    J2=2
if NA greater NE then goto EXDC
SUHI(1)  SUHI(2)
N=NA      I=IND(N)    SI=S(I)
MDCA:    INTAC2(I,J1,K1,J2,K2)
if RS(I) less 2
then J1=J2=I
else if SI equal 1 then J1=I else J2=I
if N equal NE then goto EXDC
N=N+1    I=IND(N)    SI=S(I)
SUHI(SI)  goto MDCA
EXDC:
end

INPUT: comment Programmteil I N P U T
comment Parametereingabe
if T equal TQINR
then begin
  READ(QIN,TQIN)
  TQINR=T+TQIN+TAM    TAM=Ø
  if QIN greater Ø
  then TQ=36ØØ/QIN else TQ=TQINR
  ZLMAX=15+1.5*TQ
end

MINP: comment Erzeugen
if T less TIN then goto MOVE
if NE notless NIND
then begin
  if NA less 1Ø
  then begin TIN=TIN+3Ø
        WRITE(... Staumeldung ...)
        goto MOVE
  end
  DN=NA-1
  for N=(NA,1,NE) do IND(N-DN)=IND(N)
  NA=1    NE=NE-DN
end
I=INXT
```

```
MERZ:  
INXT=INXT+1  
if INXT greater NDAT then INXT=IANF  
if S(INXT) greater Ø then goto MERZ  
NE=NE+1      IND(NE)=I      NINPT=NINPT+1  
comment Fahrzeugkenndaten  
Z1(I)=ZFN    Z2(I)=ZFN    Z3(I)=ZFN    Z4(I)=ZFN  
L(I)=5.5  
MWUN: WI=NORMAL(WQ,SIGW,IZF)  
      if WI less WMIN then goto MWUN  
      if WI greater WMAX then goto MWUN  
      W(I)=WI  
comment Spurwahl  
DT=T-TIN  
DX1=X(J1)-V(J1)*DT+Ø.5*B(J1)*DT*DT-XA  
if DX1 greater 2ØØ or WI less W(J1)  
then begin J=J1    J1=I    S(I)=1  
      DXW=DX1      goto MSPX  
end  
DX2=X(J2)-V(J2)*DT+Ø.5*B(J2)*DT*DT-XA  
if WI greater W(J2)  
then begin J=J2    J2=I    S(I)=2  
      DXW=DX2      goto MSPX  
end  
if DX1-L(J1) greater DX2-L(J2)  
then begin J=J1    J1=I    S(I)=1    DXW=DX1    end  
else begin J=J2    J2=I    S(I)=2    DXW=DX2    end  
MSPX: RS(I)=4  
comment Kinematik  
AX=L(J)+1.Ø+Z1(I)*2    VT=V(J)-B(J)*DT  
BX;if VT notgreater Ø  
      then Ø else (2.Ø+6.Ø*Z1(I))*SQRT(VT)  
ABX=AX+BX  
if DXW greater ABX  
then begin  
      CX=2Ø*(Ø.5*V(J)+1.Ø+Z1(I)+Z2(I))  
      VD=(DXW-AX)/CX    VV=V(J)+VD*VD  
      V(I)=if VV greater WI then WI else VV  
      X(I)=XA+V(I)*DT  
end  
else begin  
      V(I)= if V(J) greater WI then WI else V(J)  
      X(I)=X(J)-ABX  
end  
DV(I)=V(I)-V(J)    DX(I)=X(J)-X(I)    RV(I)=4  
B(I)=Ø.5-ZFN
```

```
comment Zwischenzeit
if X(I) less XIN then TIN=TIN+3
ZL= -TQ*LN(ZFG)
if ZL greater ZIMAX then ZL=ZIMAX+ZFG
TIN=TIN+ZL
goto MINP

MOVE: comment Programmteil M O V E
if T notequal TMES then goto MOXT
comment Momentane Messung
XMESE=XQU(NST)    N=NA
MOMA: if N greater NE then goto MOVP
I=IND(N)
if X(I) greater XMESE
then begin N=N+1 goto MOMA end
MS=NST
MOMB: if MS equal Ø then goto MOVP
XMESA=XQU(MS-1)
MOMC: if X(I) notgreater XMESA
then begin MS=MS-1 goto MOMB end
SI=S(I)    VI=V(I)
MON(SI,MS)=MON(SI,MS)+1
MOV(SI,MS)=MOV(SI,MS)+VI
MOB(SI,MS)=MOB(SI,MS)+B(I)
MOVV(SI,MS)=MOVV(SI,MS)+VI*VI
if N less NE
then begin N=N+1 I=IND(N) goto MOMC end
MOVP: comment Meßwertausgabe auf Datenfile
.           und Nullsetzen der Meßgrößen
.
.
.

TMES=TMES+DTMES

MOVS: comment Fahren
if NA greater NE then goto EXMV
N=NA-1    I=IND(NA-1)=1    XMESE=XE+999
MQ=NST+1          XMESA=XQU(NST)
MFAH:    N1=N    IN1=I    N=N+1
if N greater NE then goto OUTPUT
I=IND(N)    SI=S(I)    BI=B(I)    WI=W(I)
XT=X(I)    VT=V(I)
if BI less -VT
then begin XT1=X(I)=XT-Ø.5*VT*VT/BI  V(I)=Ø end
else begin XT1=X(I)=XT+VT+Ø.5*BI  V(I)=VT+BI end
RS(I)=RS(I)+1
```

MOVL: comment Lokale, räumlich-zeitliche und globale Messungen

```
if XT notgreater XMEA
then begin MQ=MQ-1
      XMESE=XMEA    XMEA=XQU(MQ-1)    goto MOVL
      end
if T less TAMES then goto MORD
if XT1 greater XMESE
then begin XD=XMESE-XT
      if ABS(BI) less Ø.Ø1
      then TD=XD/(XT1-XT)
      else TD=(SQRT(VT*VT+2*BI*XD)-VT)/BI
      VQU=VT+BI*TD
      LOM(SI,MQ)=LOM(SI,MQ)+1
      LOV(SI,MQ)=LOV(SI,MQ)+VQU
      LOR(SI,MQ)=LOR(SI,MQ)+1/VQU
      LOB(SI,MQ)=LOB(SI,MQ)+BI
      LOVV(SI,MQ)=LOVV(SI,MQ)+VQU*VQU
      RZDX(SI,MQ)=RZDX(SI,MQ)+XD
      RZDT(SI,MQ)=RZDT(SI,MQ)+TD
      RZDV(SI,MQ)=RZDV(SI,MQ)+BI*TD
      GDTW(SI,MQ)=GDTW(SI,MQ)+XD/WI
      MQ1=MQ+1    XD1=XT1-XMESE    TD1=1.Ø-TD
      RZDX(SI,MQ1)=RZDX(SI,MQ1)+XD1
      RZDT(SI,MQ1)=RZDT(SI,MQ1)+TD1
      RZDV(SI,MQ1)=RZDV(SI,MQ1)+BI*TD1
      GDTW(SI,MQ1)=GDTW(SI,MQ1)+XD1/WI
      if WI less V(I)+2.78
      then begin
            GDTF(SI,MQ)=GDTF(SI,MQ)+TD
            GDTF(SI,MQ1)=GDTF(SI,MQ1)+TD1
            end
      if BI less -2.5
      then begin
            GDTB(SI,MQ)=GDTB(SI,MQ)+TD
            GDTB(SI,MQ1)=GDTB(SI,MQ1)+TD1
            end
      if RS(I) equal 1 then GSW(SI,MQ)=GSW(SI,MQ)+1
      end
else begin DX=XT1-XT
      RZDX(SI,MQ)=RZDX(SI,MQ)+XD
      RZDT(SI,MQ)=RZDT(SI,MQ)+1.Ø
      RZDV(SI,MQ)=RZDV(SI,MQ)+BI
      GDTW(SI,MQ)=GDTW(SI,MQ)+XD/WI
      if WI less V(I)+2.78
      then GDTF(SI,MQ)=GDTF(SI,MQ)+1.Ø
      if BI less -2.5
      then GDTB(SI,MQ)=GDTB(SI,MQ)+1.Ø
      if RS(I) equal 1 then GSW(SI,MQ)=GSW(SI,MQ)+1
      end
```

```
MORD: comment Ordnen
if XT1 notgreater X(IN1) then goto MFAH
M=N      J=I

MUEB:
if SI equal S(IN1)
then begin UNFALL(I,IN1,T+1)  goto MFAH end
GUE(SI,MQ)=GUE(SI,MQ)+1
IND(N)=IN1    IND(N1)=I
N=N1          N1=N1-1      IN1=IND(N1)
if XT1 greater X(IN1) then goto MUEB
N=M          I=J      goto MFAH

OUTPUT: comment Programmteil O U T P U T

N=NA
MOUT: I=IND(N)
if X(I) notless XE
then begin S(I)=Ø NA=NA+1
      if N less NE
      then begin N=N+1 goto MOUT end
end

EXMW: T=T+1  goto DECS

EOSI: comment Abschluß des Datenfiles,
      .           Aufbereitung und Ausdruck der
      .           globalen Meßergebnisse
      .
end end
```

A B B I L D U N G E N

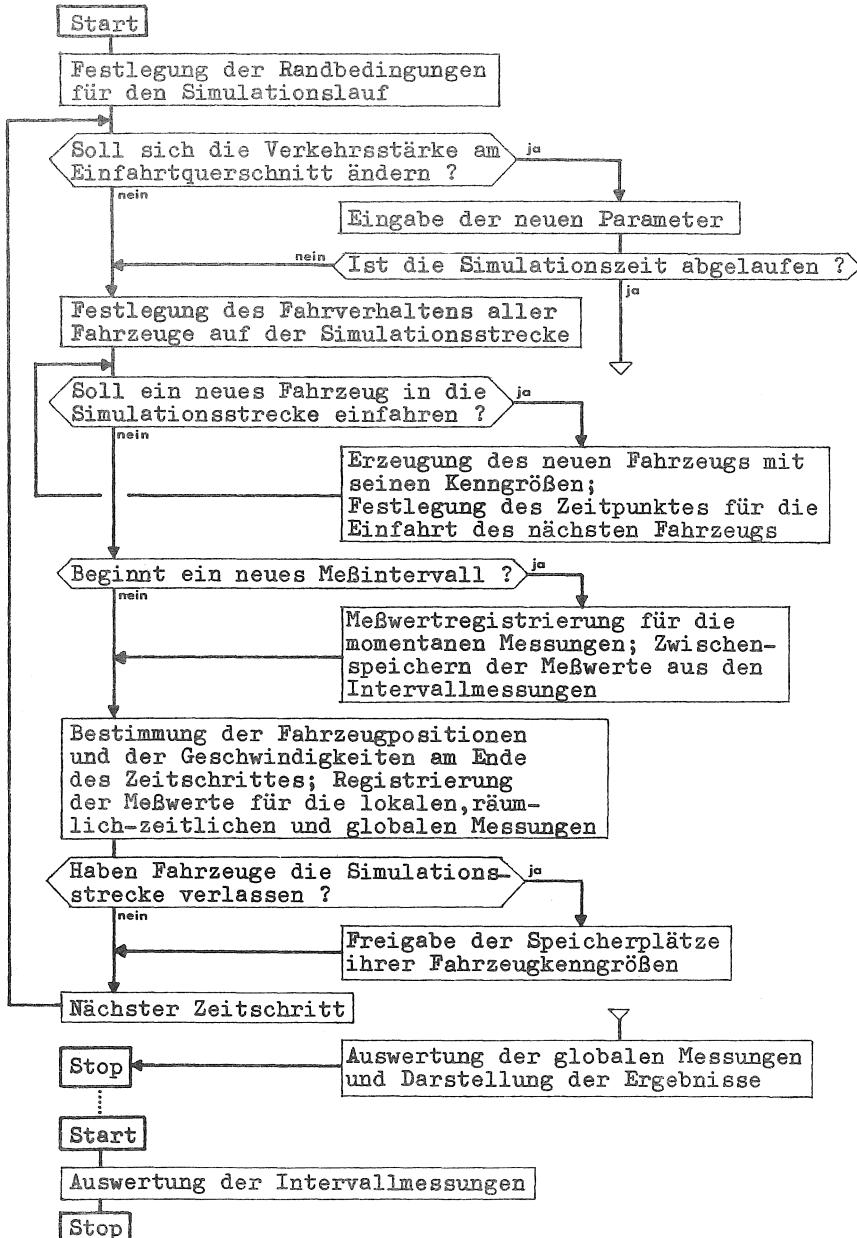


Abb. 1 : Rahmenprogramm zur Simulation des Verkehrsablaufs

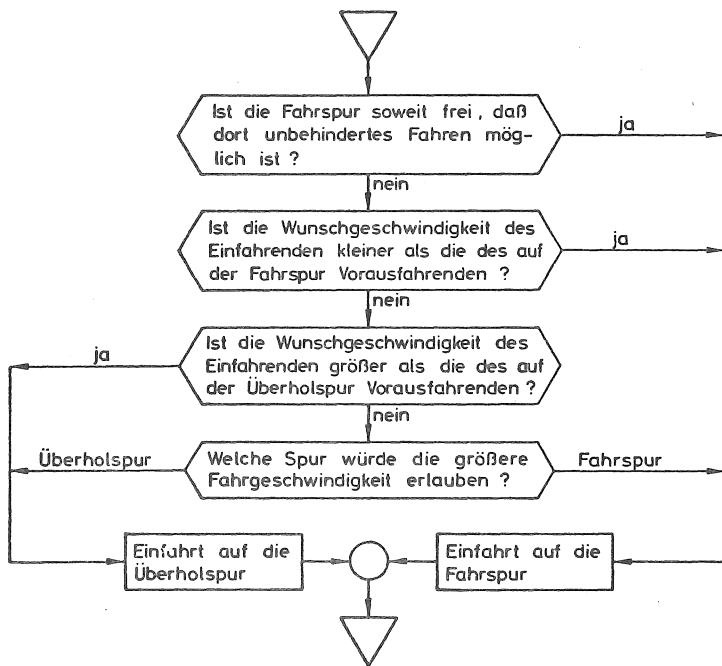


Abb. 2 : Entscheidungsprozeß zur Spurwahl bei der Einfahrt in die Simulationsstrecke

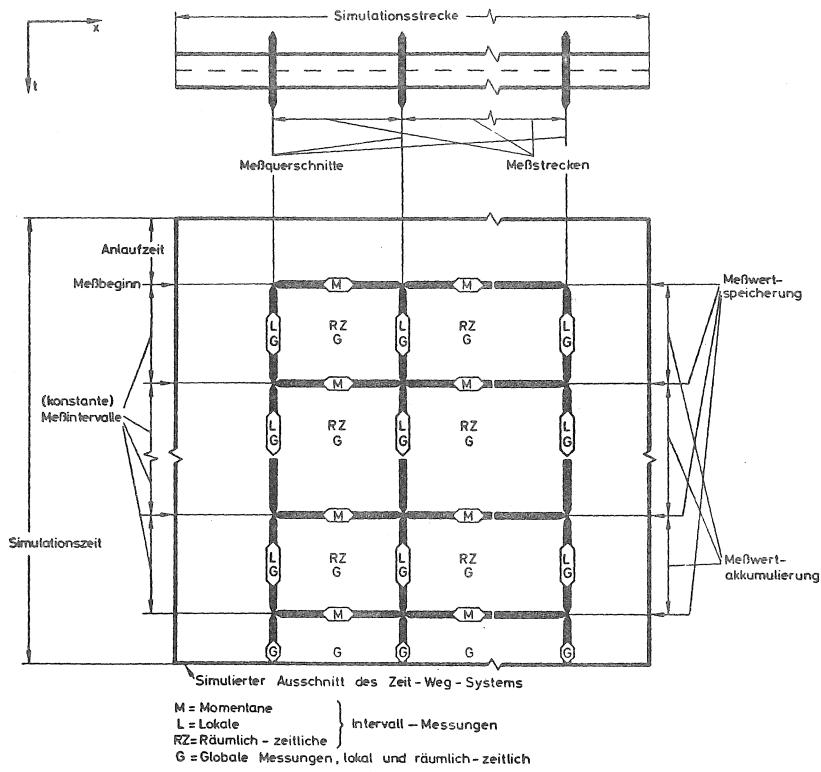


Abb. 3 : Beobachtung des Verkehrsablaufs im Simulationsmodell

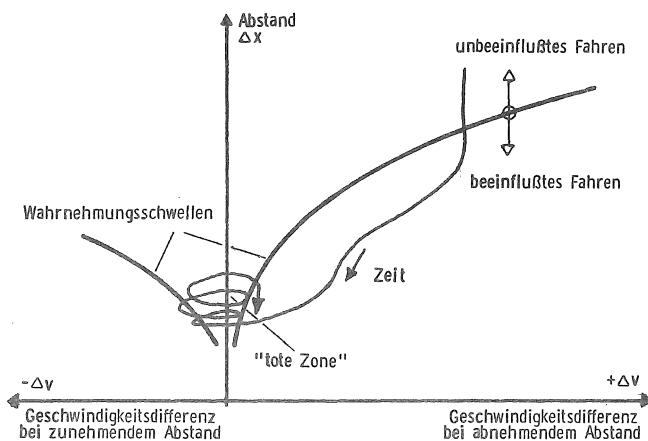


Abb. 4 a : Relativbewegung zwischen zwei Fahrzeugen auf derselben Spur (schematisch);
nach WIEDEMANN 1974

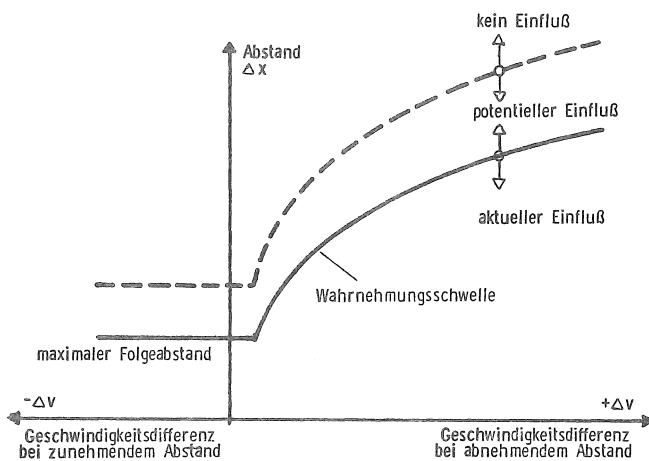
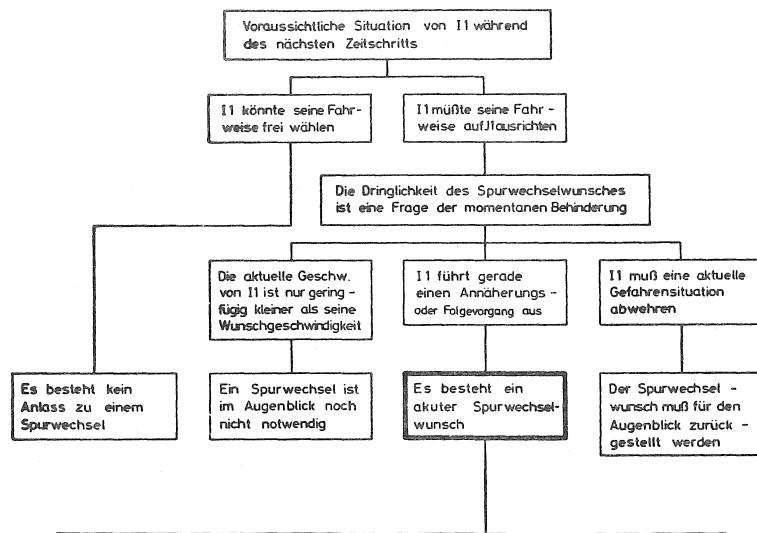


Abb. 4 b : Interaktion zwischen zwei Fahrzeugen auf benachbarten Spuren (schematisch)



Feststellung eines Spurwechselwunsches:



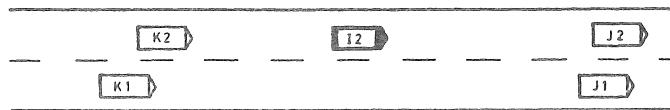
Entscheidung zum Spurwechsel:

Voraussichtl. Einfluss auf K2	Voraussichtliche Beeinflussung durch J2		
	keine Beeinflussung	potentielle Beeinflussung	aktuelle Beeinflussung oder Gefährdung
kein Einfluss	Spurwechsel in jedem Fall	Spurwechsel, wenn A oder B	kein Spurwechsel
potentieller Einfluss	Spurwechsel, wenn A	Spurwechsel, wenn A und B	kein Spurwechsel
aktueller Einfluss oder Gefährdung	kein Spurwechsel	kein Spurwechsel	kein Spurwechsel

A: Aktuelle Geschwindigkeit von I1 ist erheblich kleiner als seine Wunschgeschwindigkeit.

B: Fahrzeug J2 fährt erheblich schneller als J1.

Abb. 5 : Simulation des Spurwechselverhaltens eines Fahrers auf der Fahrspur



Feststellung eines Spurwechselwunsches:

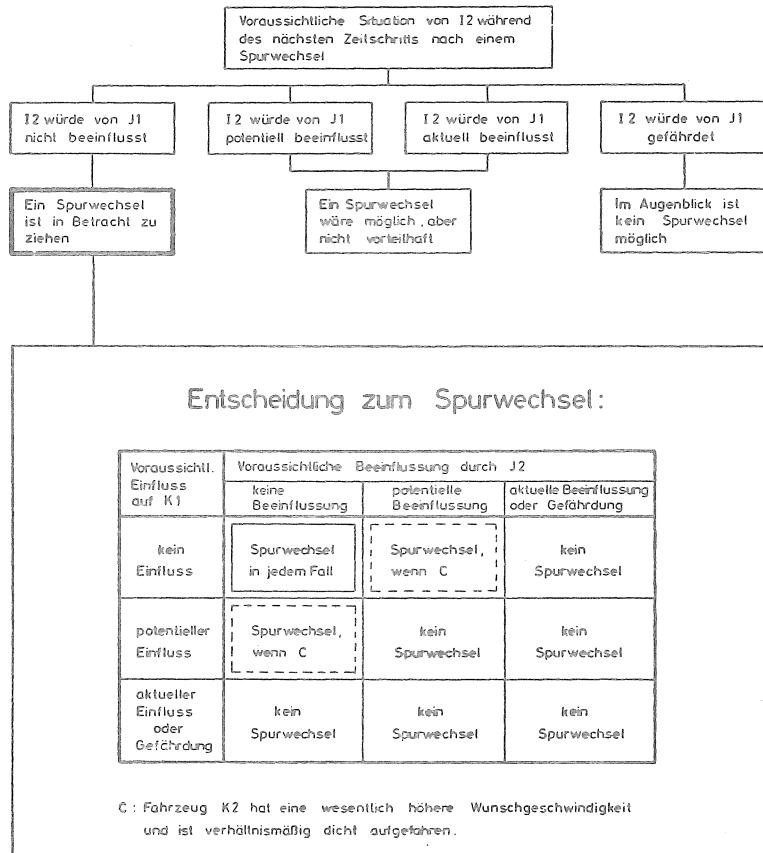
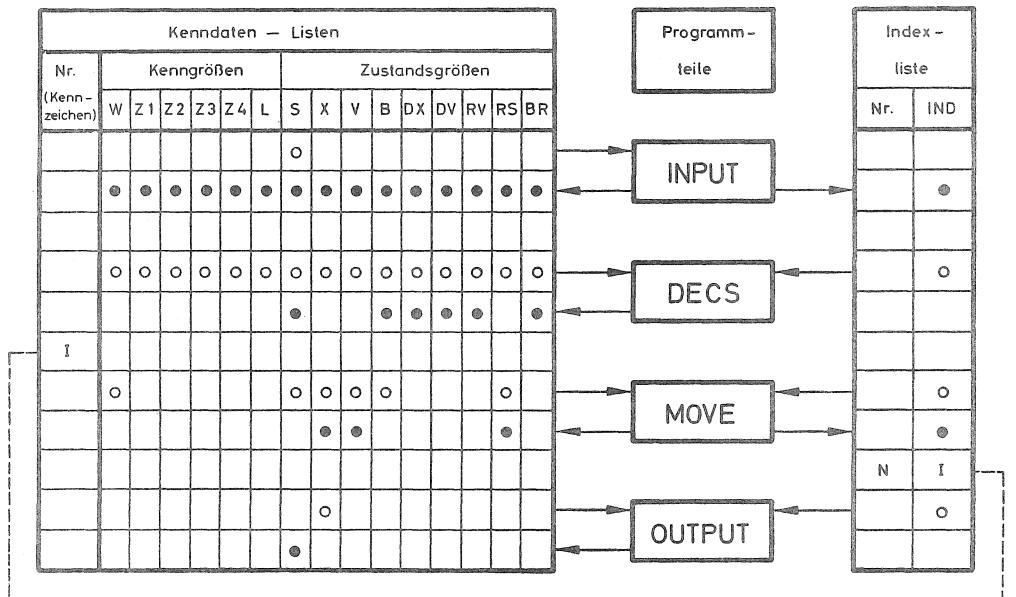


Abb. 6 : Simulation des Spurwechselverhaltens eines Fahrers auf der Überholspur



INPUT : Erzeugen von Fahrer-Fahrzeug-Elementen
DECS : Festlegung des Fahrverhaltens
MOVE : Bewegen und Beobachten der Fahrzeuge
OUTPUT : Löschen von Fahrer-Fahrzeug-Elementen

○ → Größe wird im Teilprogramm gebraucht
 ● ← Größe wird im Teilprogramm verändert

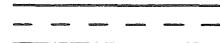
Abb. 7 : Speicherorganisation im Simulationsprogramm

Indexliste										NMX	
	NE	NA								NMX	
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND											

Vorgang

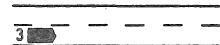
Augenblicklich befinden sich keine Fahrzeuge auf der Simulationsstrecke

Simulationsstrecke



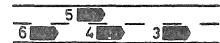
NA NE											
	NA	NE									
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND		3									

Ein Fahrzeug (Kennzeichen 3) ist in die Strecke eingefahren



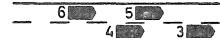
NA NE											
	NA	NE									
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND		3	4	5	6						

Weitere drei Fahrzeuge sind inzwischen erzeugt worden



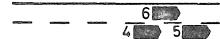
NA NE											
	NA	NE									
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND		3	5	4	6						

Fahrzeug 5 hat Fahrzeug 4 überholt



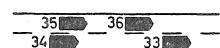
NA NE											
	NA	NE									
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND		5	6	4							

Fahrzeug 3 hat die Strecke verlassen; Fahrzeug 6 hat Fahrzeug 4 überholt



NA NE											
	NA	NE									
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND							33	36	35	34	

(Weitere) 99 Fahrzeuge sind inzwischen erzeugt worden; 95 Fahrzeuge haben die Strecke verlassen

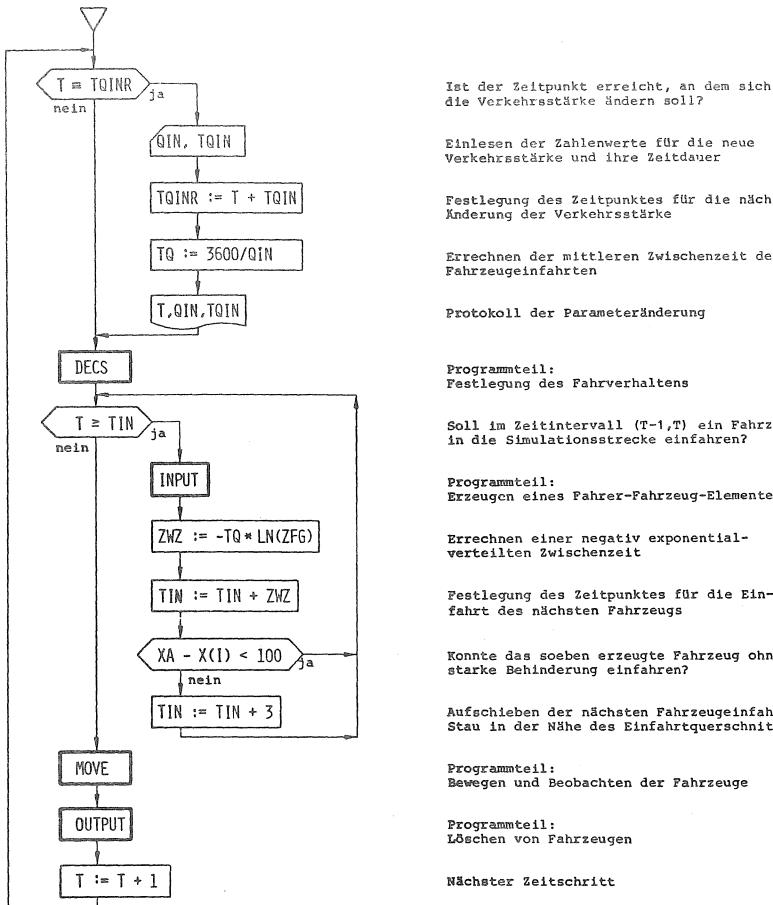


NA NE											
	NA	NE									
Nr.	0	1	2	3	4	5	95	96	97	98	99
IND		33	36	35	34	37					

Fahrzeug 37 ist in die Strecke eingefahren, die Indexliste wurde neu geordnet



Abb. 8 : Abbildung der räumlichen Verteilung der Fahrzeuge auf der Simulationsstrecke mit Hilfe der Indexliste



T	lfd. Simulationszeit	QIN	Verkehrsstärke am Einfahrtquerschnitt [Fz/h]
$TQINR$	Zeitpunkt der nächsten Änderung der Verkehrsstärke am Einfahrtquerschnitt	XA	Wegkoordinate des Einfahrtquerschnitts [m]
$TQIN$	Dauer dieser Verkehrsstärke	$INPUT$	Programmteile
TIN	Zeitpunkt der nächsten Fahrzeugeinfahrt	$DECS$	
TQ	Mittlere aktuelle Zwischenzeit	$MOVE$	
ZWZ	Nächste Zwischenzeit	$OUTPUT$	
ZFG	(0,1) - gleichverteilte Zufallszahl		Dimension aller Zeitgrößen : [sek]

Abb. 9 : Erzeugen von Fahrer-Fahrzeug-Elementen im Simulationsprogramm

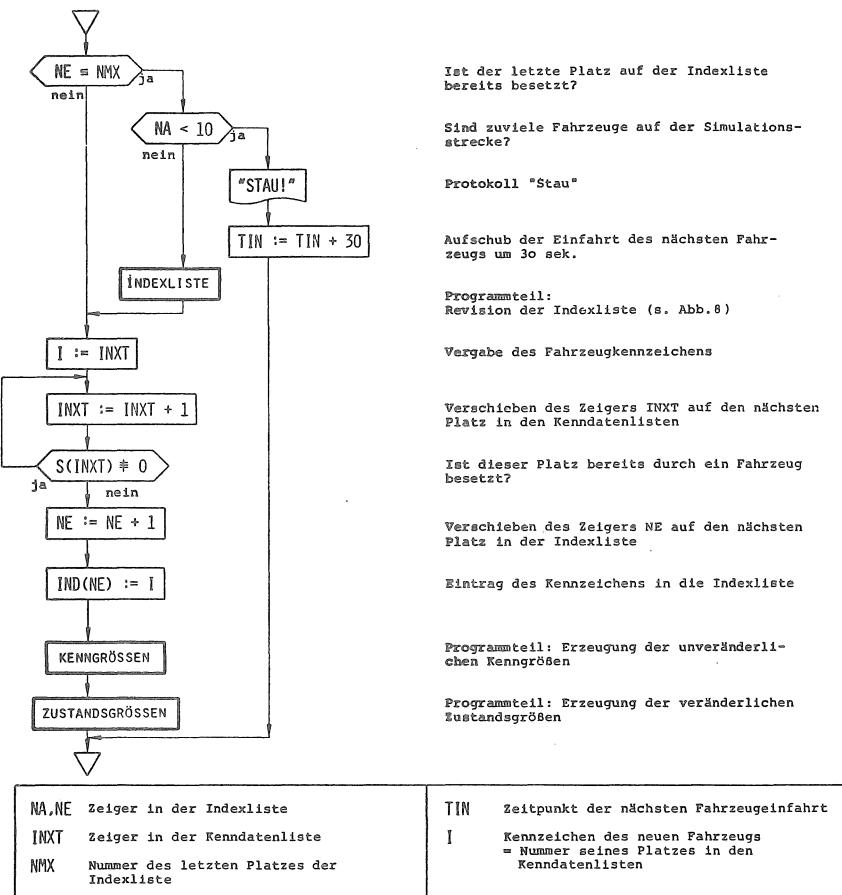
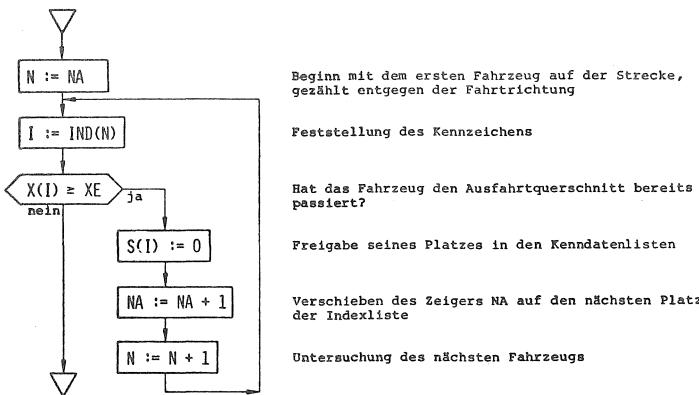
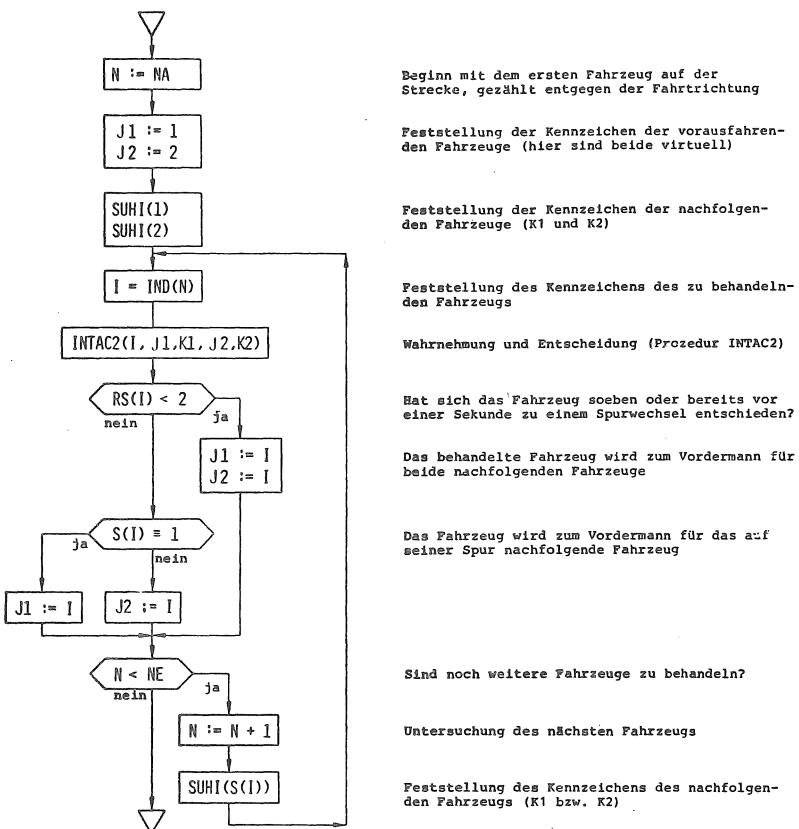


Abb. 10 : Programmteil I N P U T
Erzeugen eines Fahrer-Fahrzeug-Elementes



NA Zeiger auf der Indexliste N Nummer eines Platzes auf der Indexliste	I Fahrzeug-Kennzeichen = Nummer seines Platzes in den Kenndatenlisten XE Wegkoordinate des Ausfahrtquerschnitts
---	---

Abb. 11 : Programmteil O U T P U T
Löschen von Fahrer-Fahrzeug-Elementen



I,J1,J2,K1,K2	Fahrzeugkennzeichen
K2 K1	— I — J2 — J1 —

N Nummer eines Platzes auf der Indexliste
 NA,NE Zeiger auf der Indexliste

Abb. 12 : Programmteil D E C S
 Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozeß

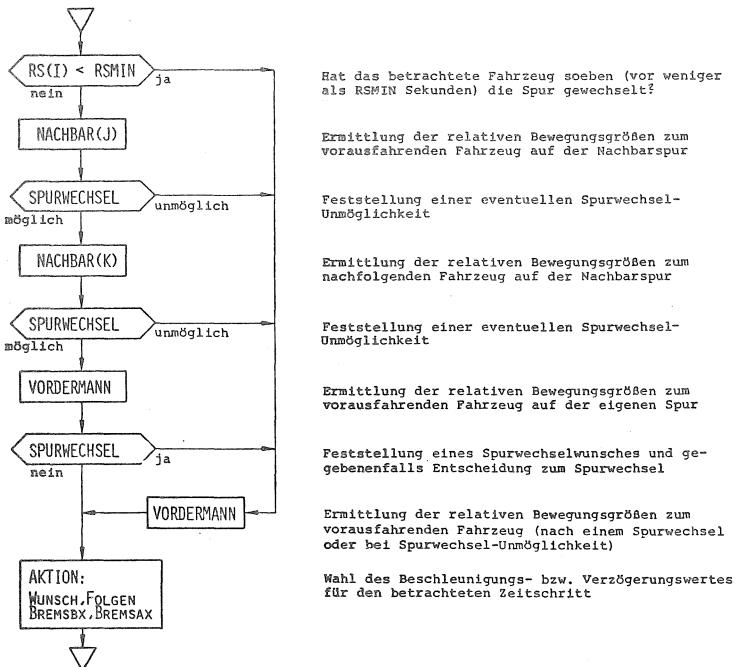


Abb. 13 : Unterprogramm INTAC2
Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug-Elementen

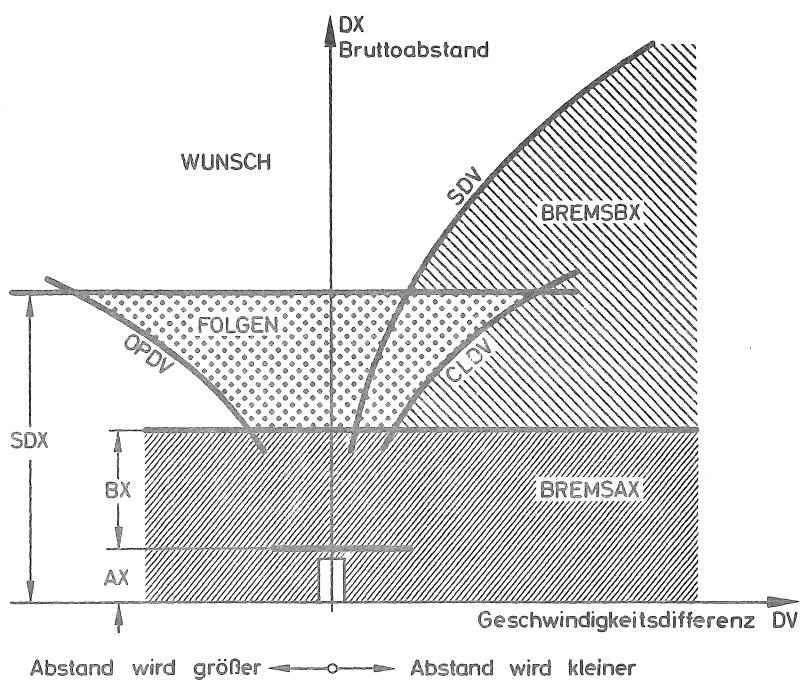


Abb. 14 : Interaktionszustände

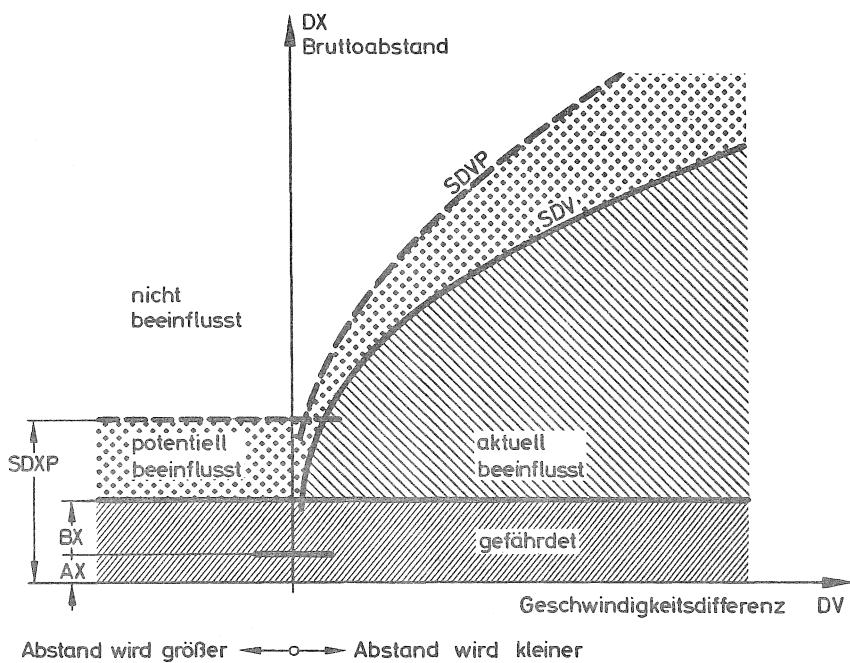
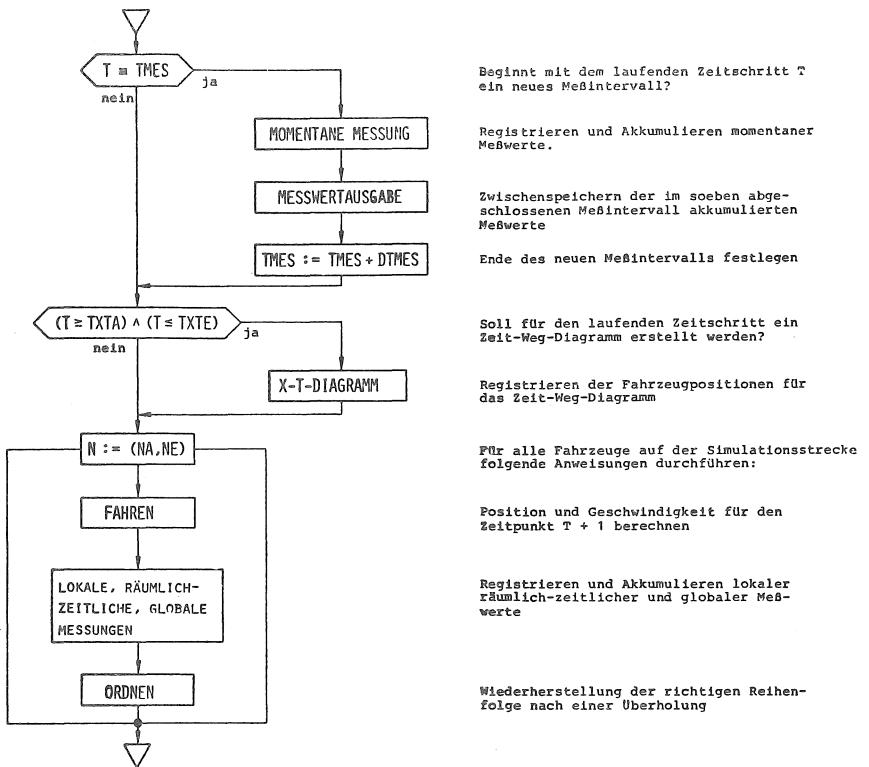
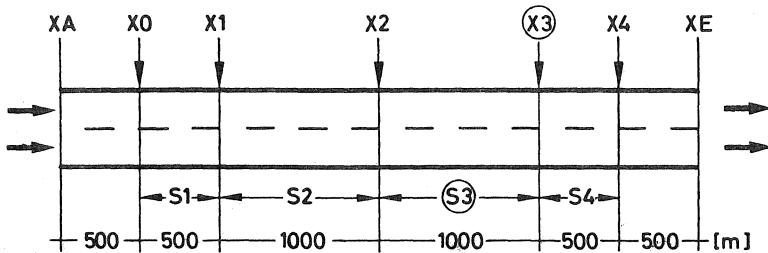


Abb. 15 : Aktuelle und potentielle Beeinflussung



T	lfd. Simulationszeit	$DTMES$	Dauer eines Meßintervalls (sek)
N	Platznummer in der Indexliste	$TMES$	Zeitpunkt, an dem ein neues Meßintervall beginnt
NA, NE	Zeiger auf der Indexliste*	$TXTA, TXTE$	Anfang und Ende des Zeitausschnitts, für den ein Zeit-Weg-Diagramm erstellt werden soll

Abb. 16 : Programmteil M O V E
Bewegen und Beobachten der Fahrer-Fahrzeug-Elemente



$X_0 - X_4$: Meßquerschnitte

$S_1 - S_4$: Meßstrecken

Abb. 17 : Geometrie der Simulationsstrecke

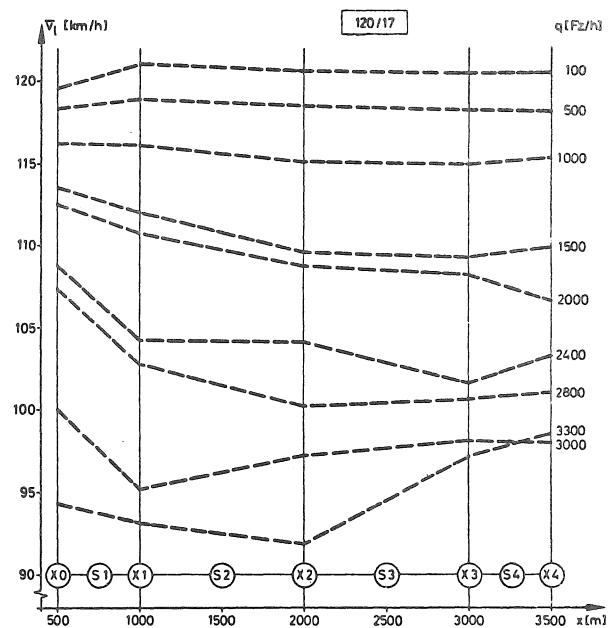
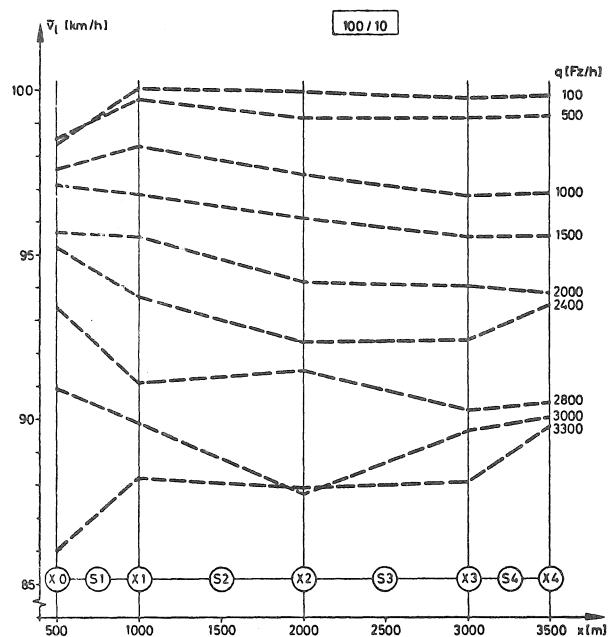


Abb. 18 : Wegabhängigkeit der mittleren (lokalen) Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Verkehrsstärken

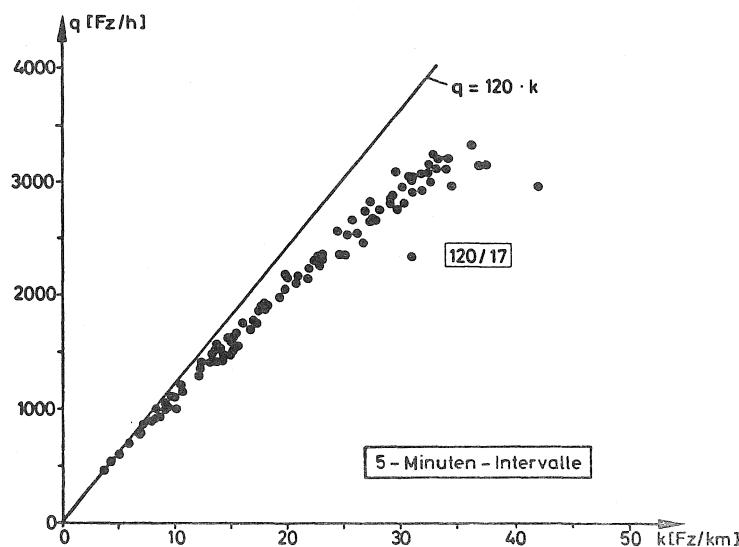
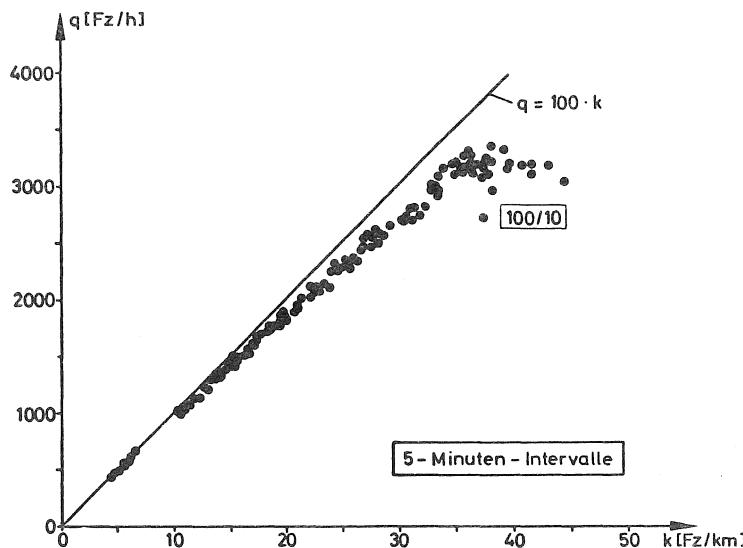


Abb. 19 : Verkehrsstärke / Verkehrsdichte;
Fundamentaldiagramm für den Gesamtquerschnitt

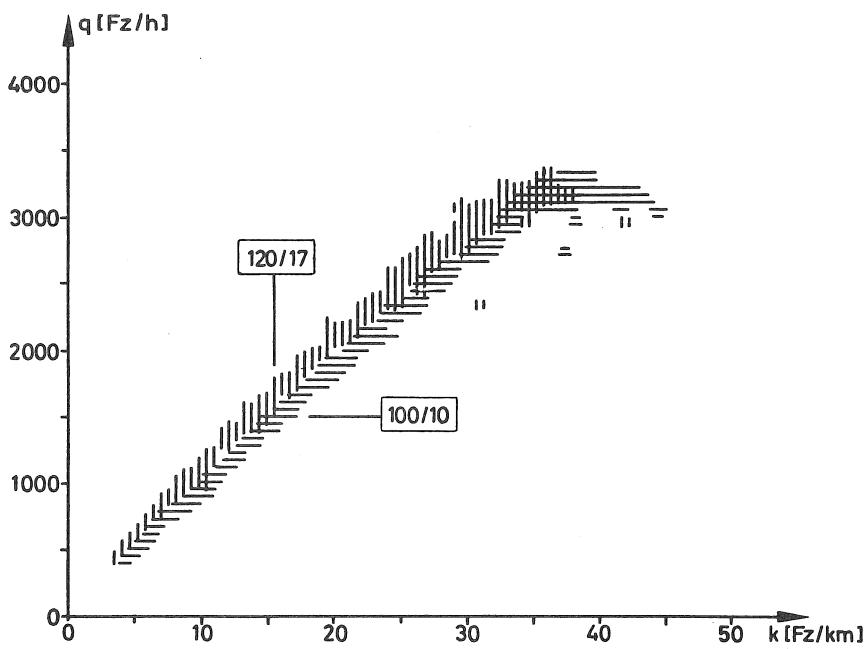


Abb. 20 : Vergleich der Fundamentaldiagramme
beider Simulationsreihen; Gesamtquerschnitt

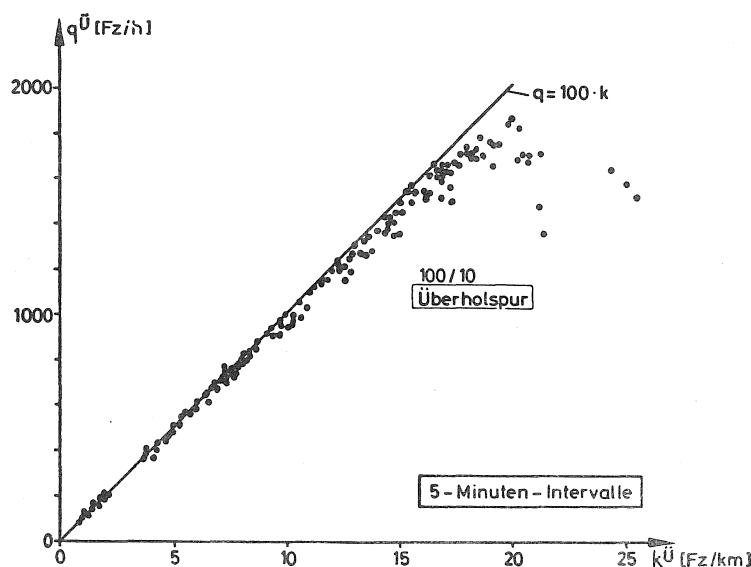
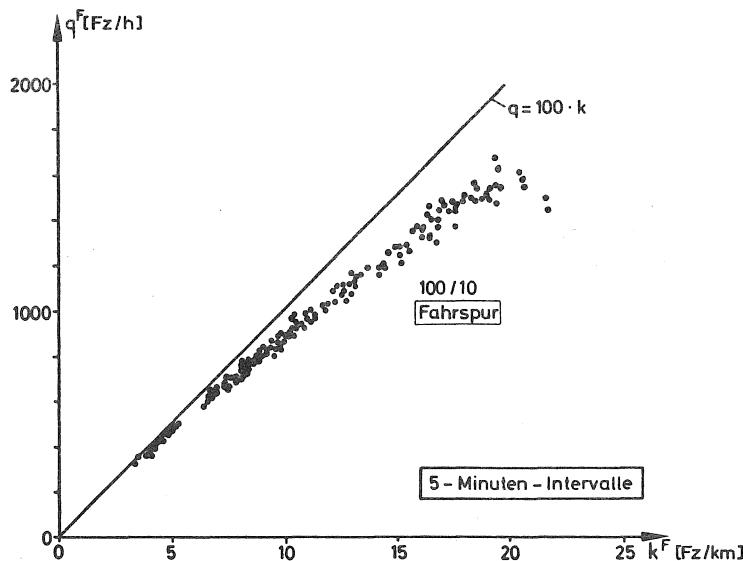


Abb. 21 : Verkehrsstärke / Verkehrsdichte;
Fundamentaldiagramme für die beiden Spuren;
Simulationsreihe 100/10

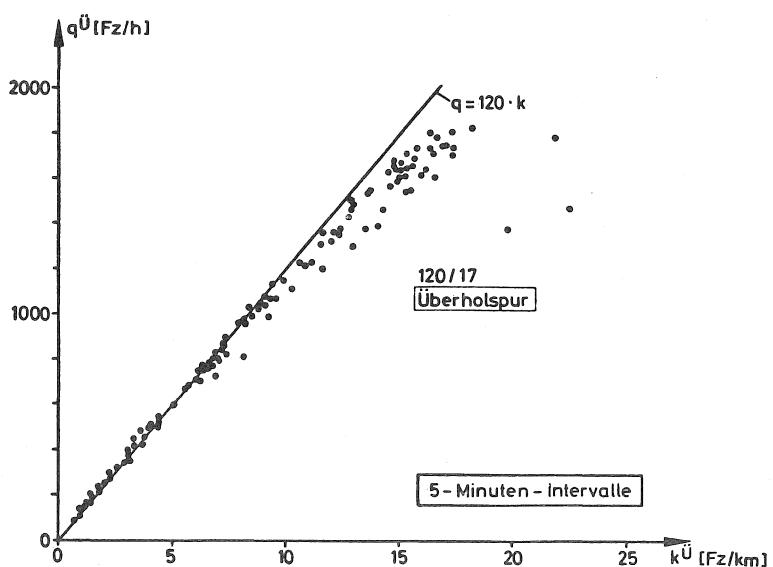
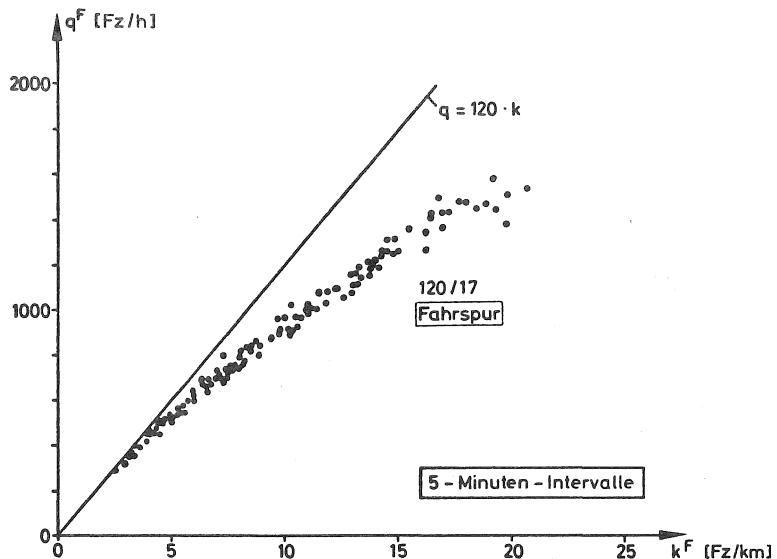


Abb. 22 : Verkehrsstärke / Verkehrsdichte;
Fundamentaldiagramme für die beiden Spuren
Simulationsreihe 120/17

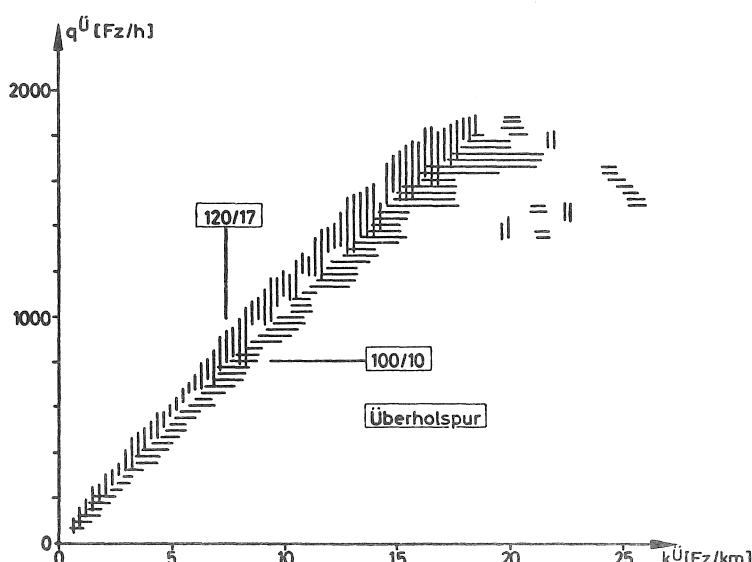
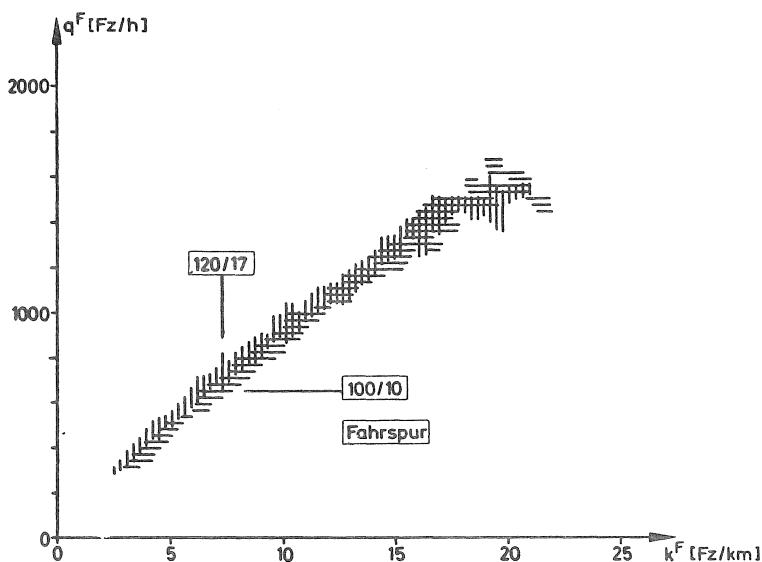


Abb. 23 : Vergleich der Fundamentaldiagramme
beider Simulationsreihen;
Fahrspur und Überholspur

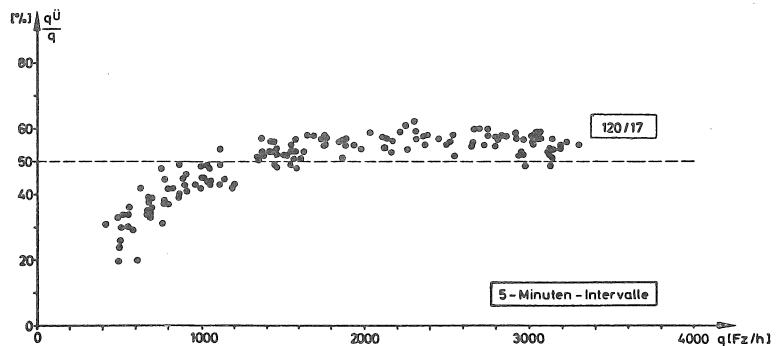
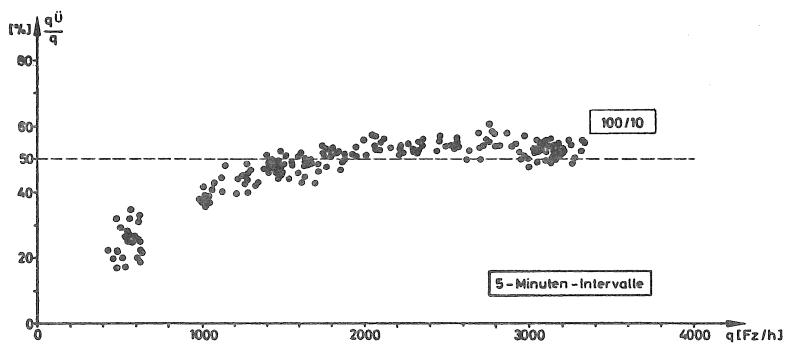


Abb. 24 : Verkehrsstärkeanteil der Überholspur

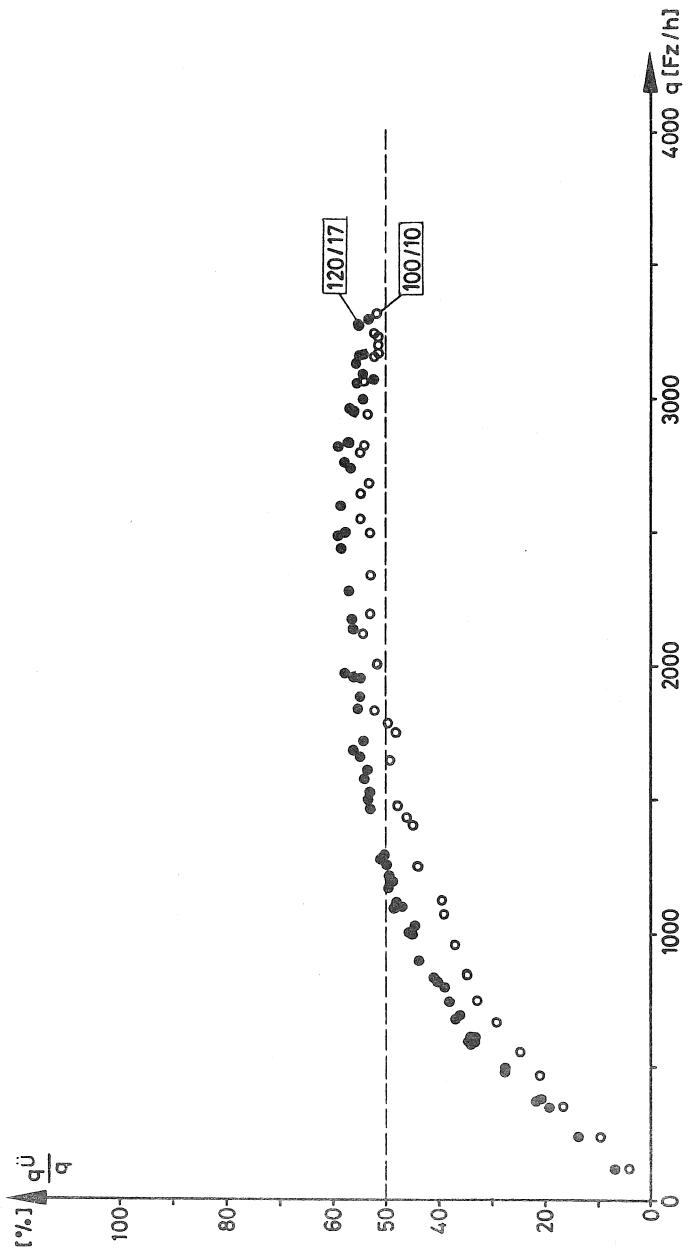


Abb. 25 : Verkehrsstärkeanteil der Überholspur;
globale Werte

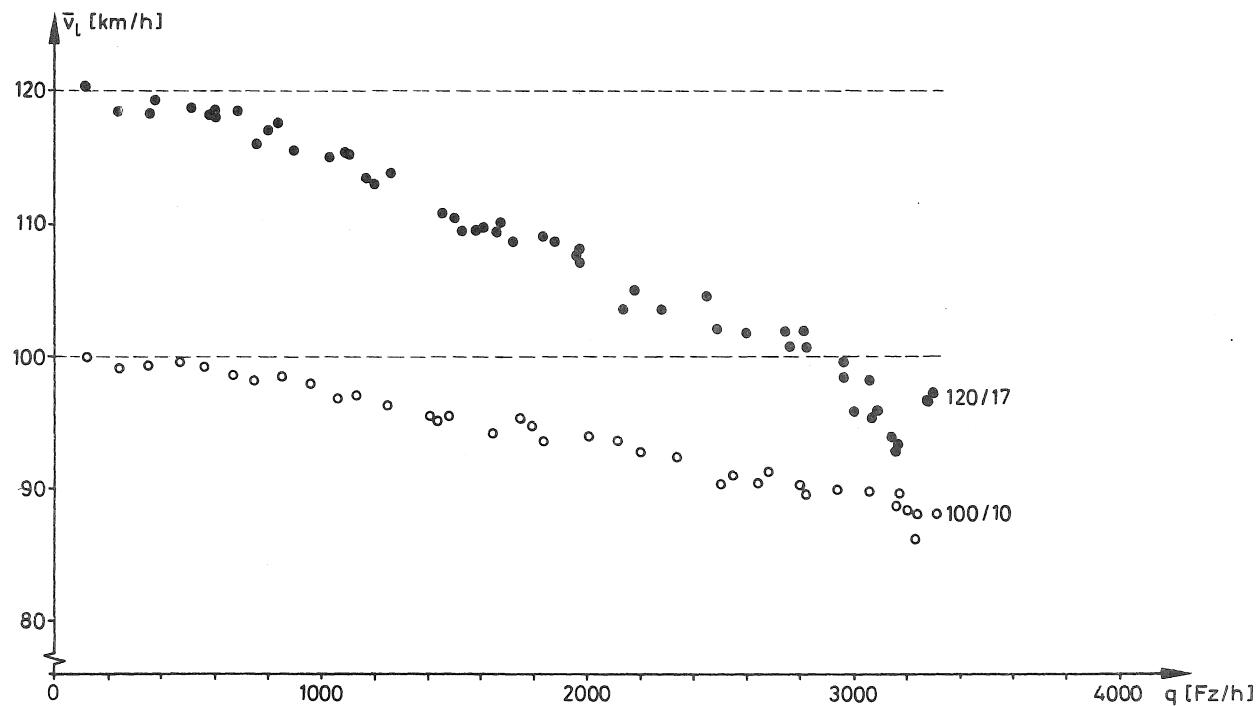


Abb. 26 : Mittlere (lokale) Geschwindigkeit / Verkehrsstärke;
Gesamtquerschnitt

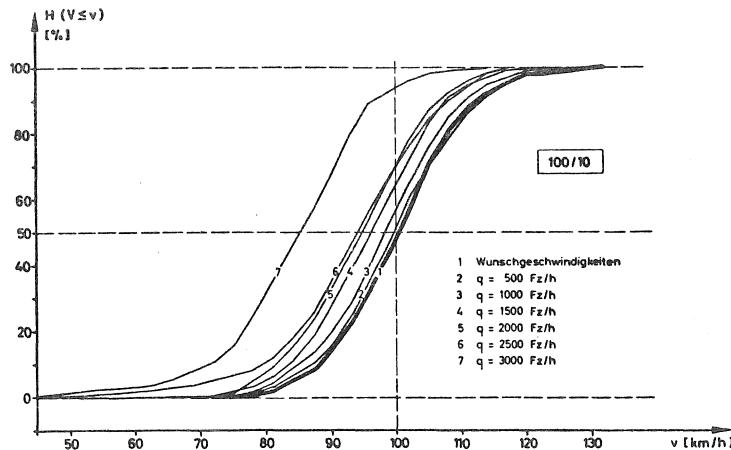


Abb. 27 : Verteilungsfunktion der (lokalen) Geschwindigkeiten;
Simulationsreihe 100/10; Gesamtquerschnitt

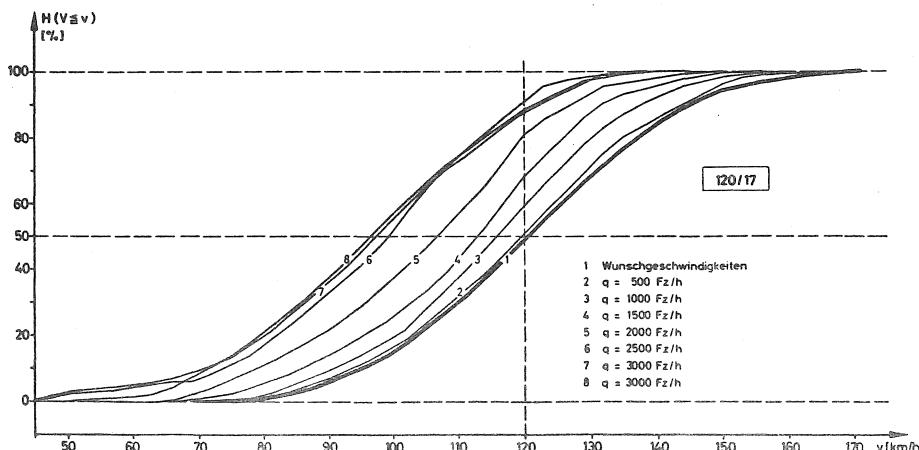


Abb. 28 : Verteilungsfunktion der (lokalen) Geschwindigkeiten;
Simulationsreihe 120/17; Gesamtquerschnitt

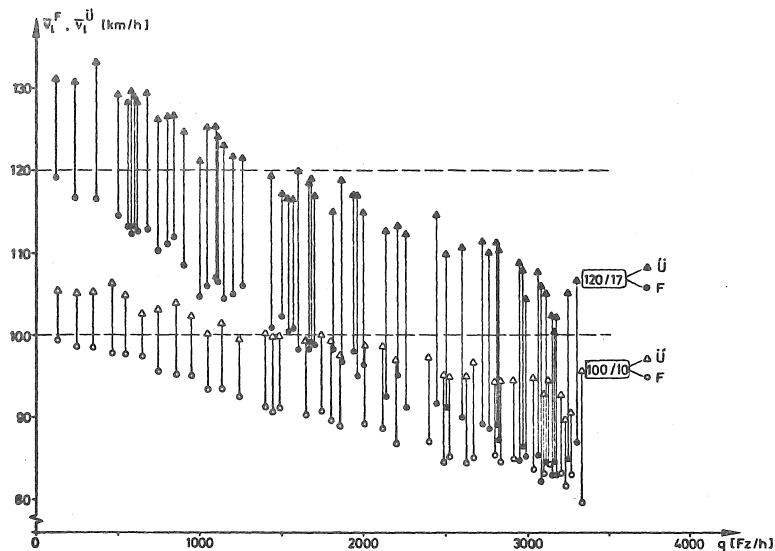


Abb. 29 : Mittlere (lokale) Geschwindigkeit / Verkehrsstärke; Fahrspur und Überholspur

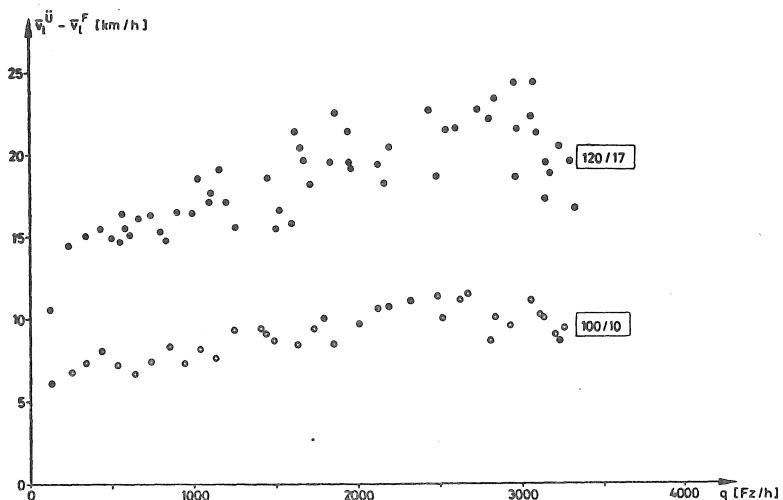


Abb. 30 : Differenz zwischen den mittleren (lokalen) Geschwindigkeiten auf beiden Spuren

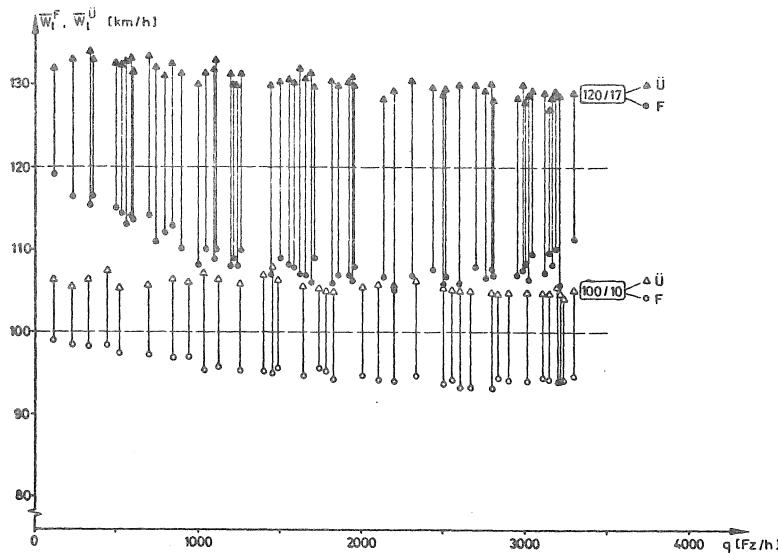


Abb. 31 : Mittlere (lokale) Wunschgeschwindigkeit / Verkehrsstärke; Fahrspur und Überholspur

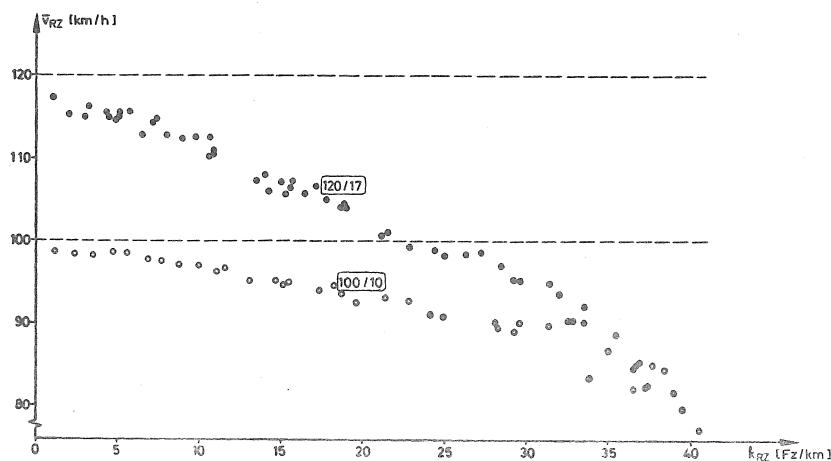


Abb. 32 : Mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit / Verkehrsdichte; Gesamtquerschnitt

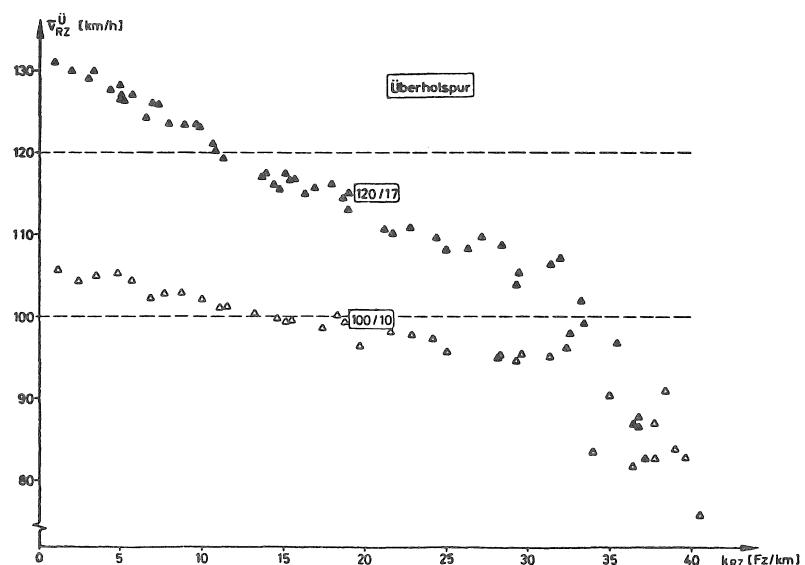
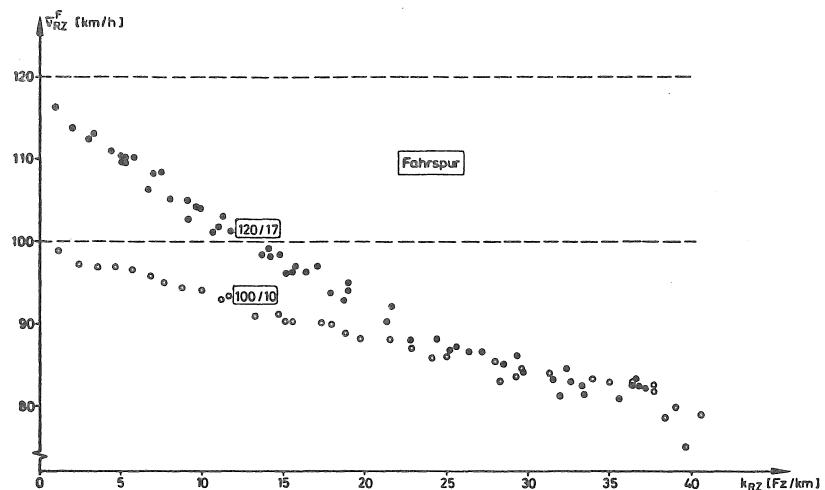


Abb. 33 : Mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit / Verkehrsdichte des Gesamtquerschnitts;
Fahrspur und Überholspur

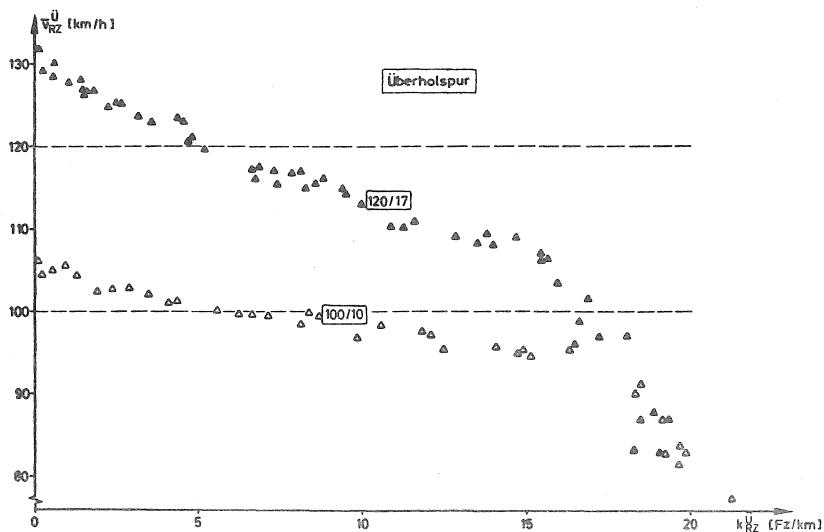
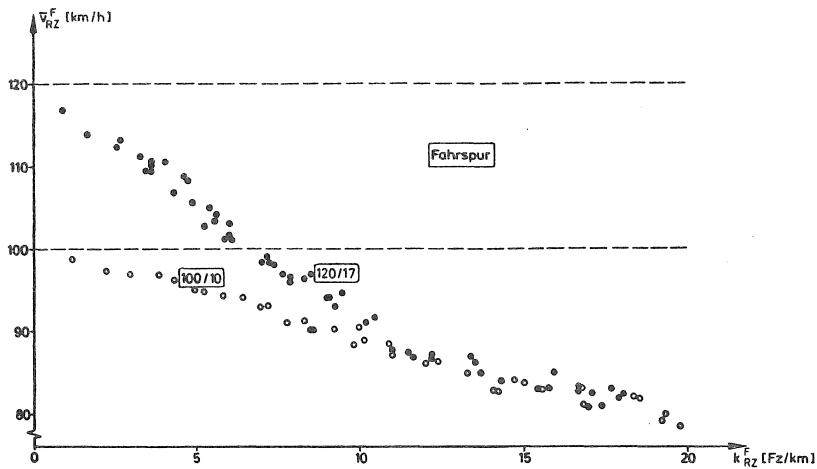


Abb. 34 : Mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit / Verkehrsdichte der einzelnen Spuren;
Fahrspur und Überholspur

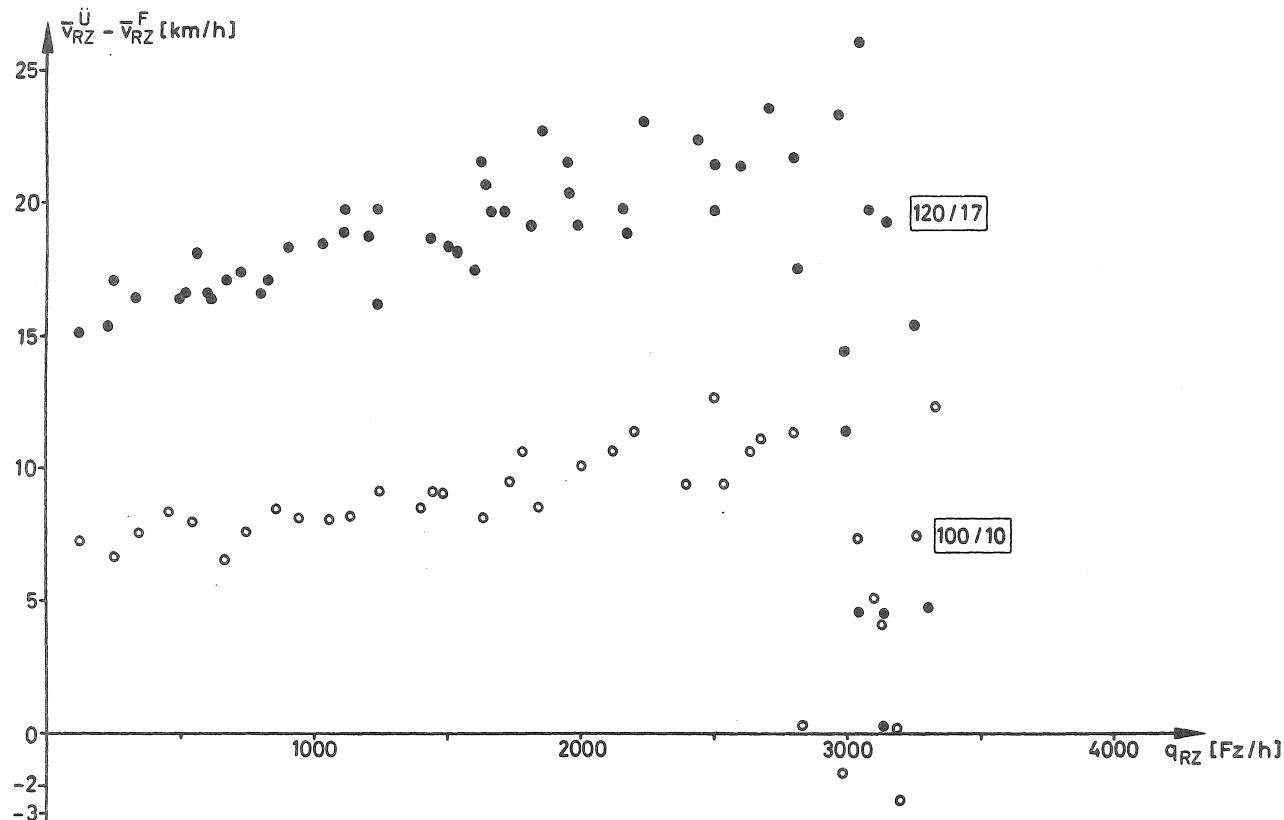


Abb. 35 : Differenz zwischen den mittleren räumlich-zeitlichen Geschwindigkeiten auf beiden Spuren

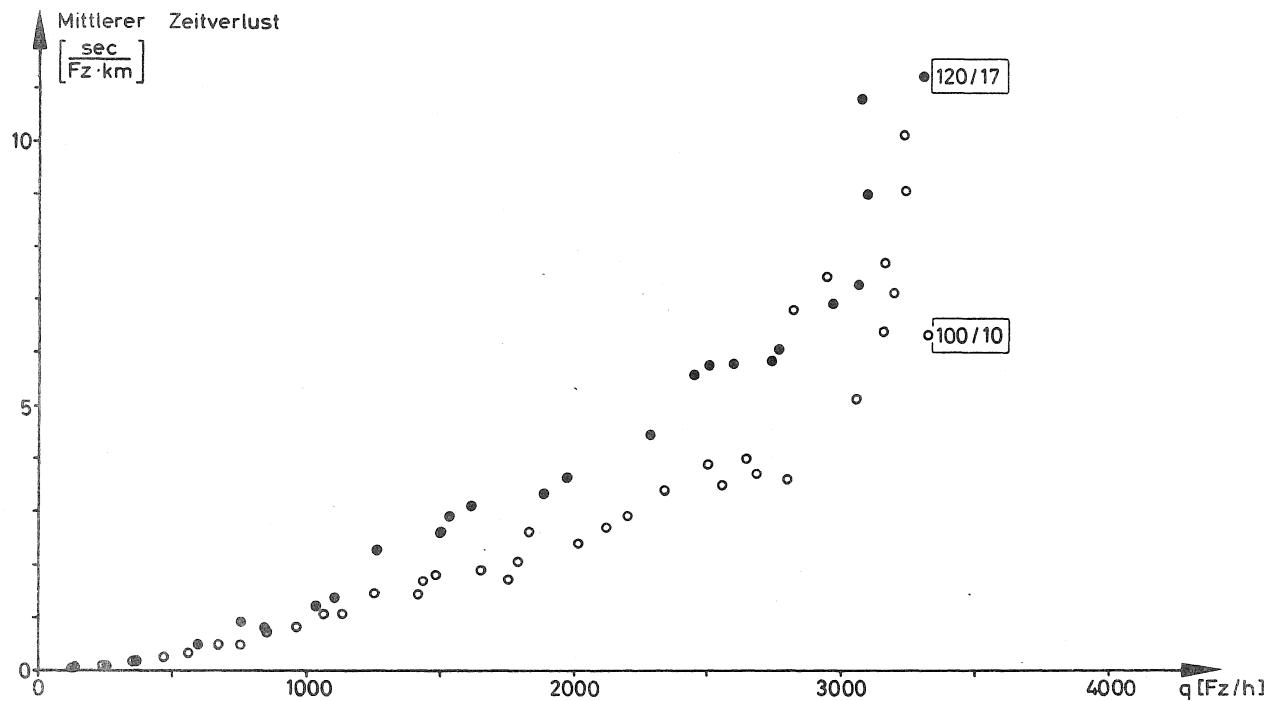


Abb. 36 : Mittlerer Zeitverlust / Verkehrsstärke;
Gesamtquerschnitt

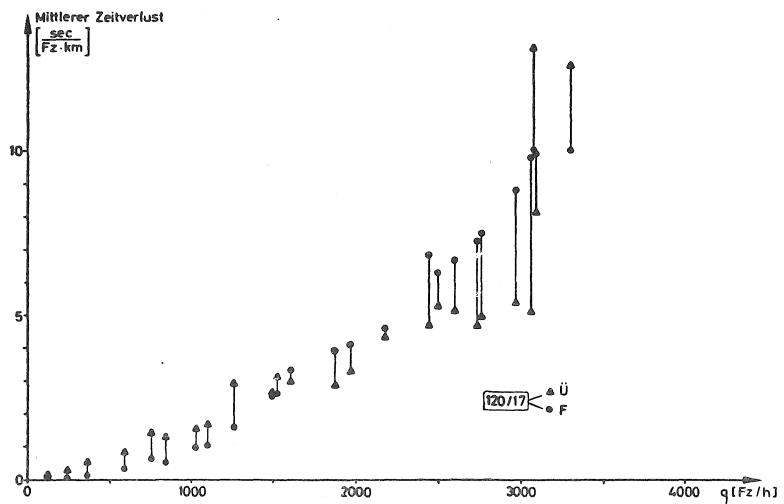
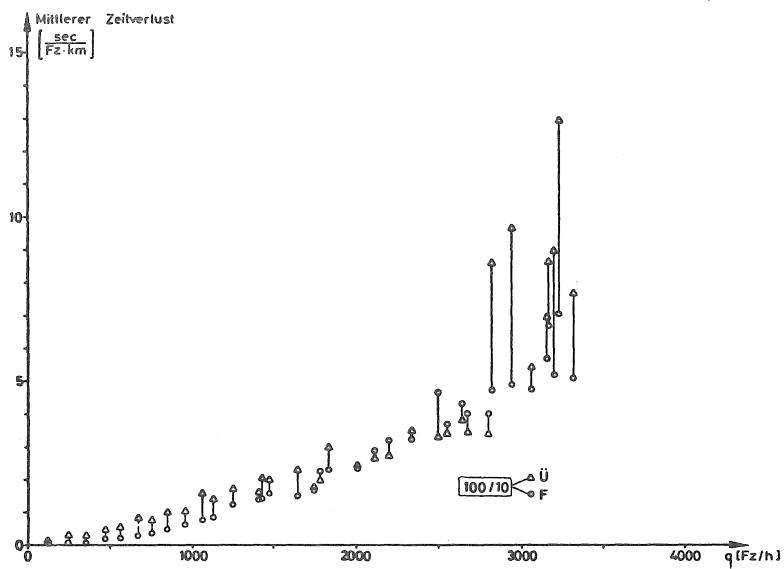


Abb. 37 : Mittlerer Zeitverlust / Verkehrsstärke;
Fahrspur und Überholspur

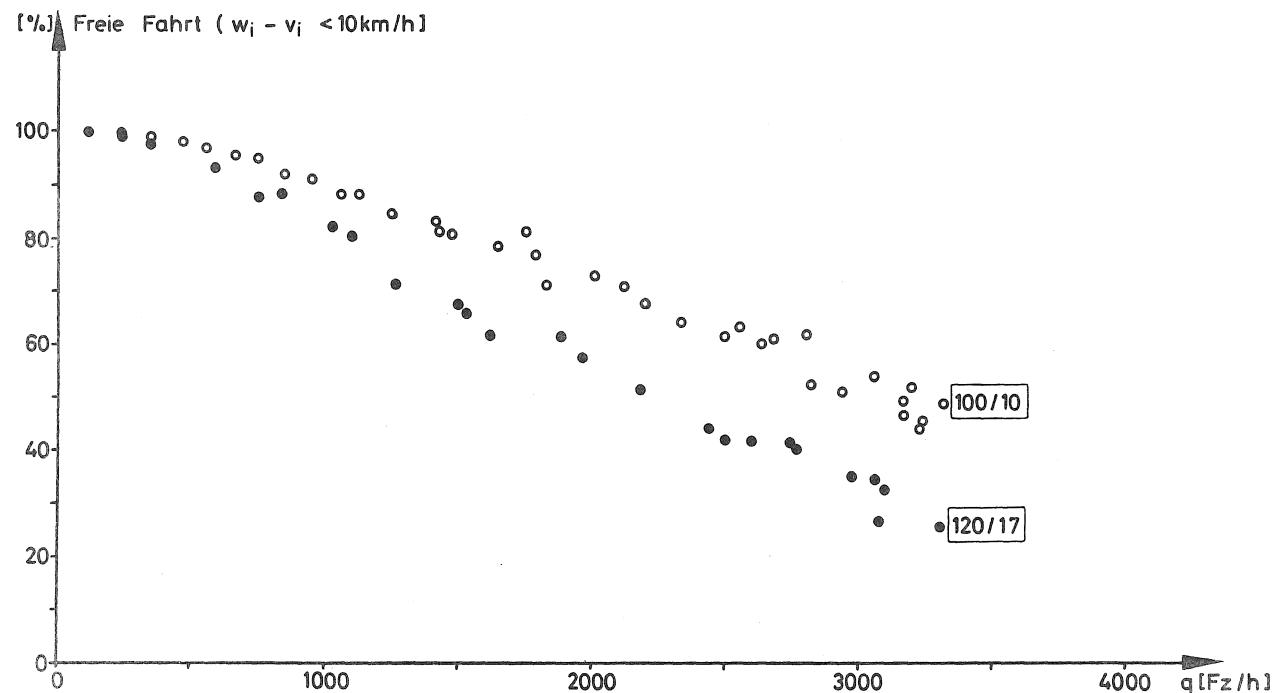


Abb. 38 : Zeitanteil freier Fahrt / Verkehrsstärke;
Gesamtquerschnitt

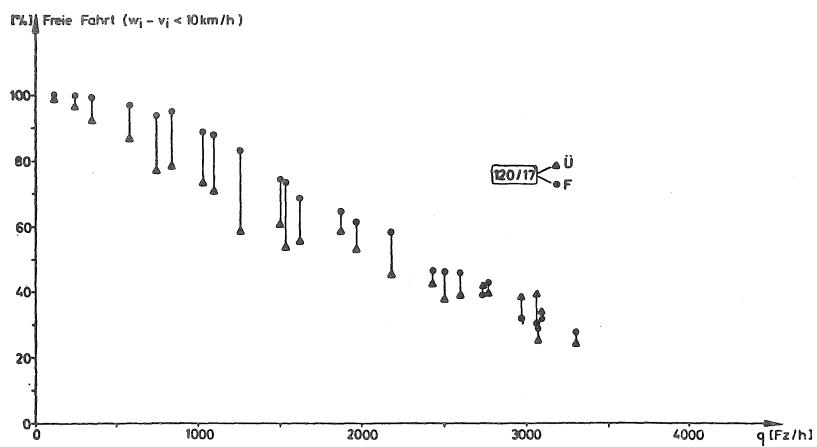
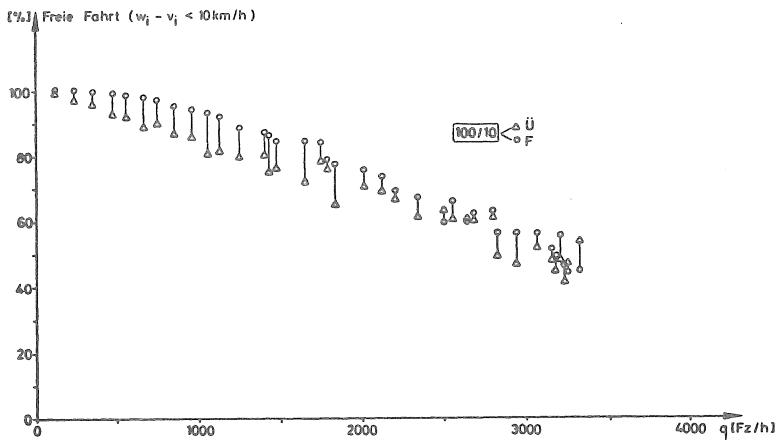


Abb. 39 : Zeitanteil freier Fahrt / Verkehrsstärke;
Fahrspur und Überholspur

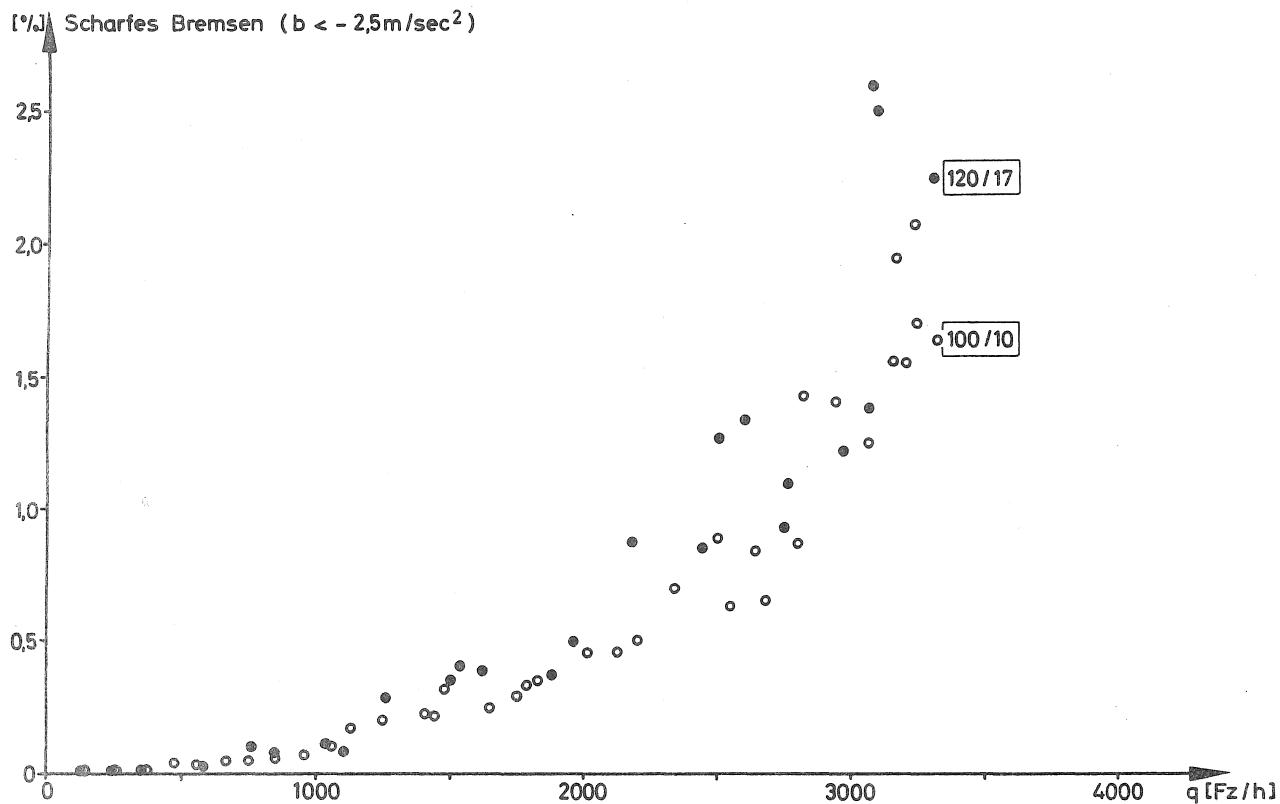


Abb. 40 : Zeitanteil heftiger Verzögerungen / Verkehrsstärke;
Gesamtquerschnitt

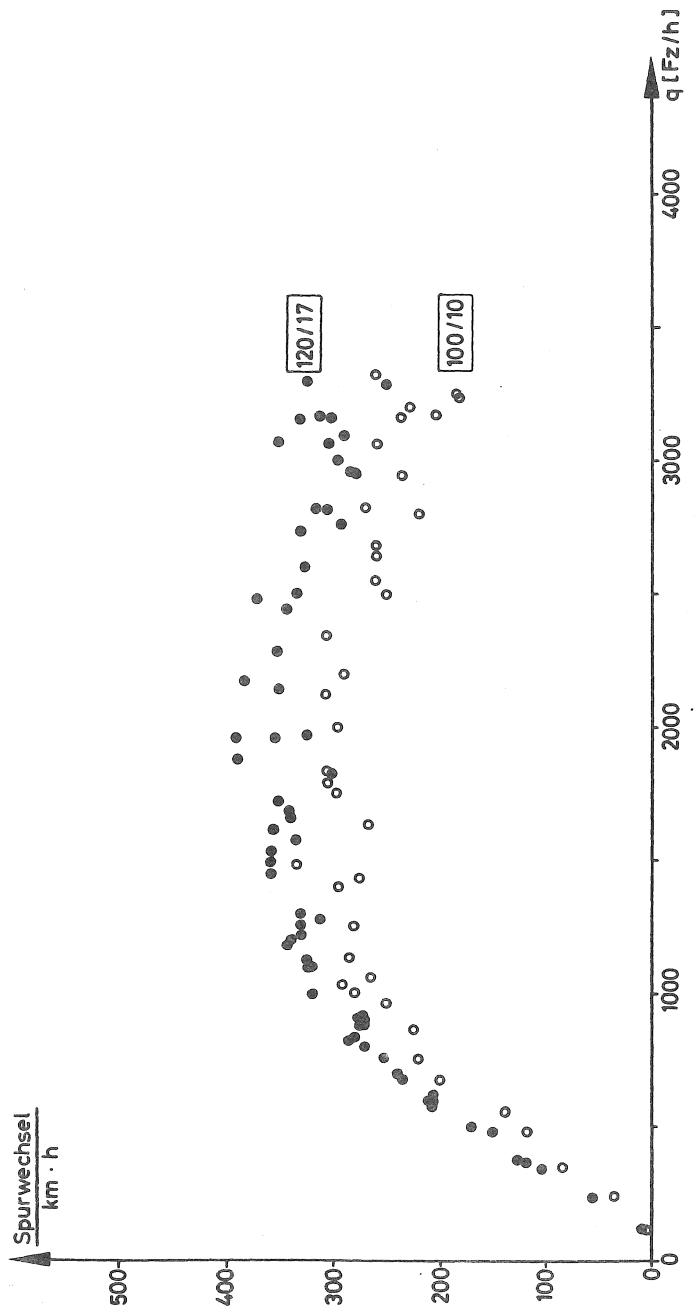


Abb. 41 : Spurwechselhäufigkeit / Verkehrsstärke

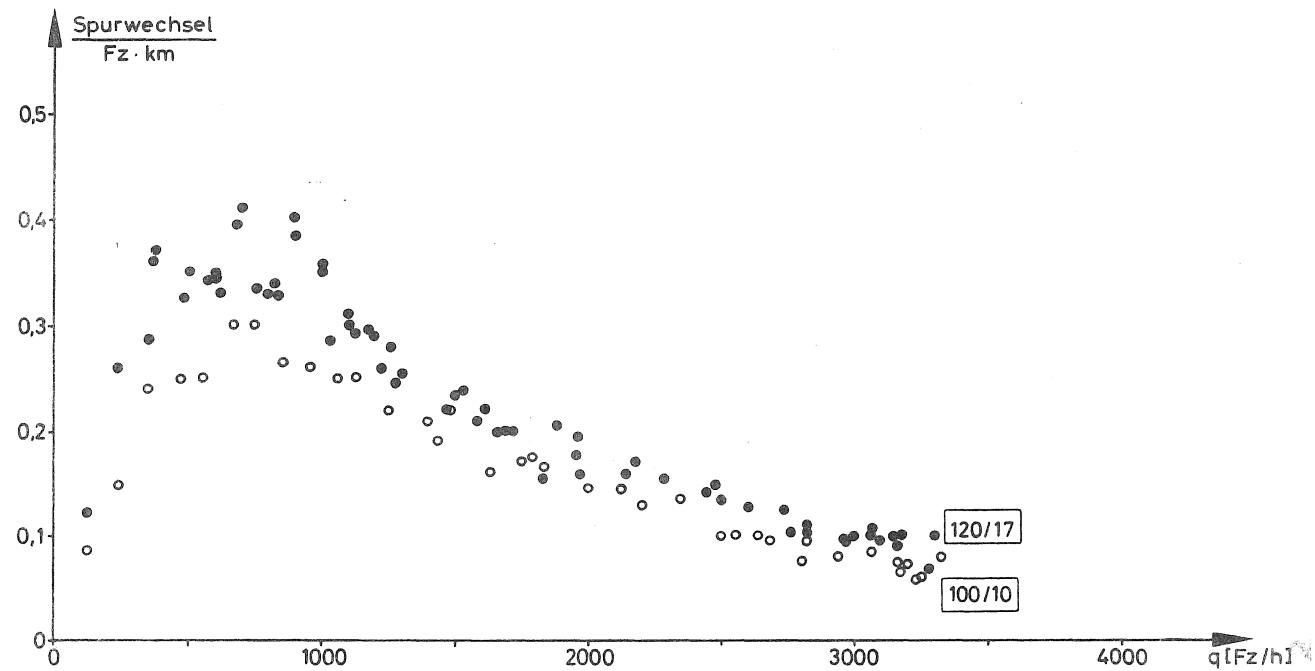


Abb. 42 : Spezifische Spurwechselhäufigkeit / Verkehrsstärke

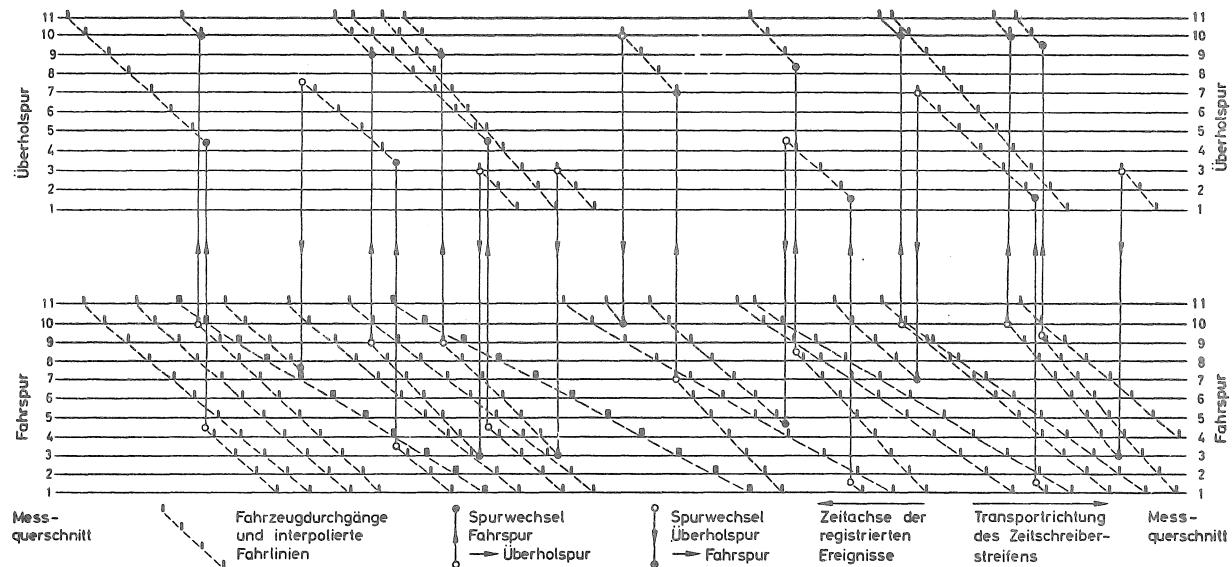


Abb. 43 : Ausschnitt aus einem Zeitschreiberprotokoll

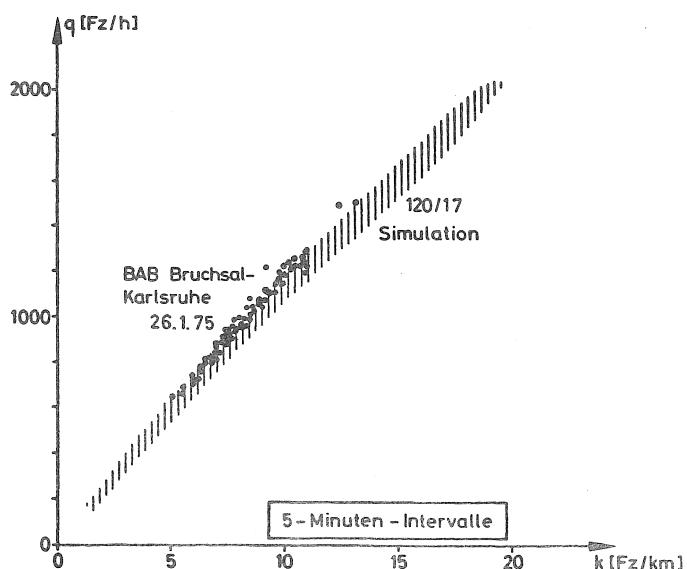
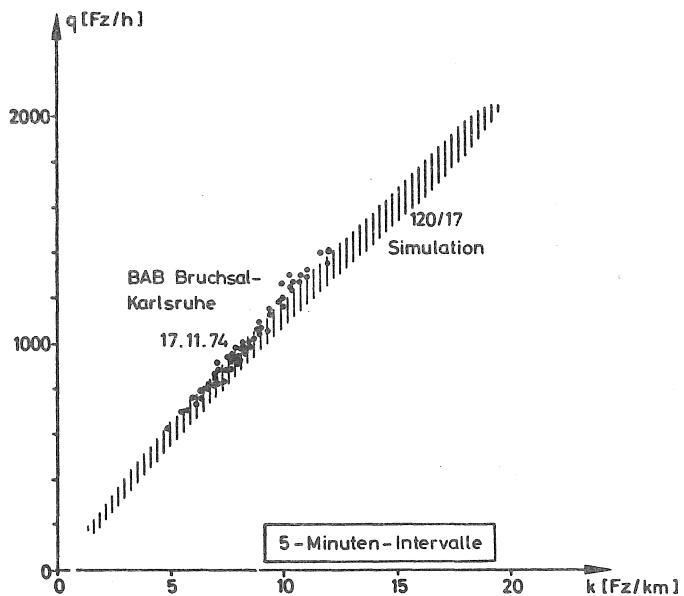


Abb. 44 : Fundamentaldiagramm des Gesamtquerschnitts im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 120/17

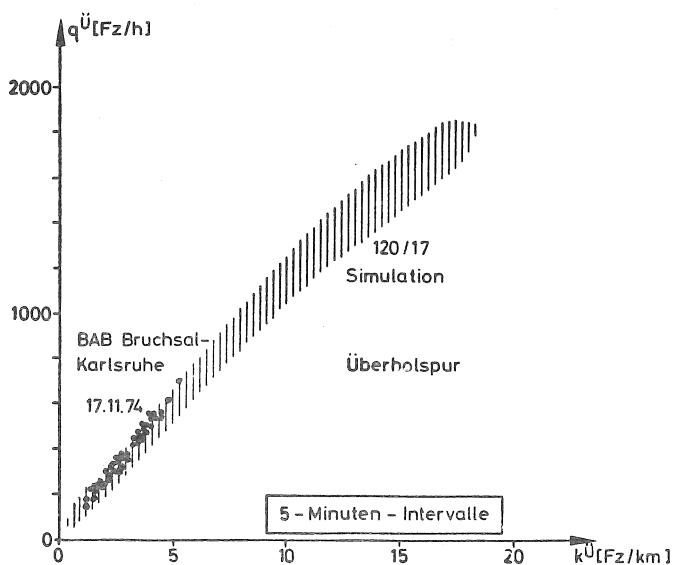
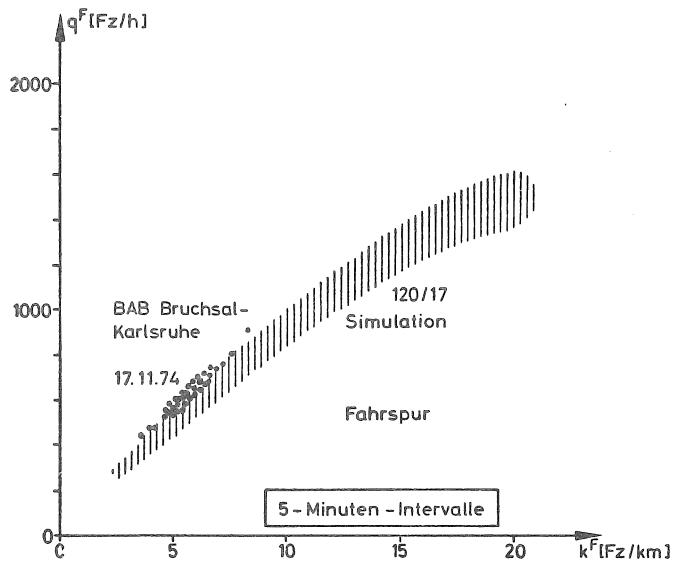


Abb. 45 : Fundamentaldiagramme der einzelnen Spuren im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 120/17

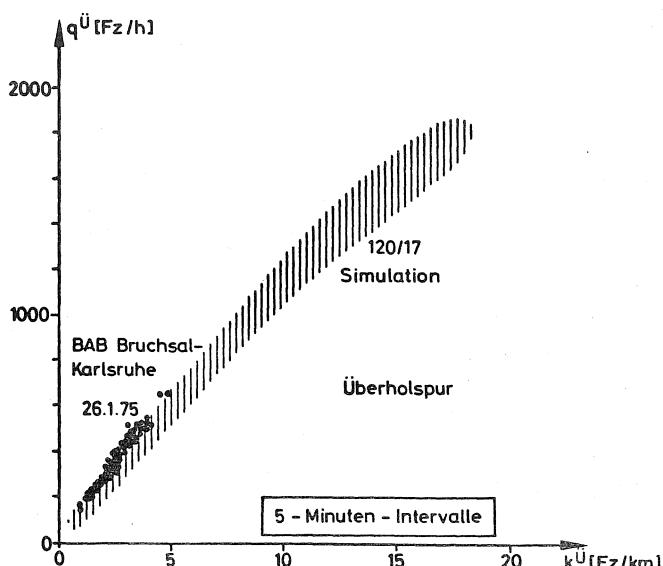
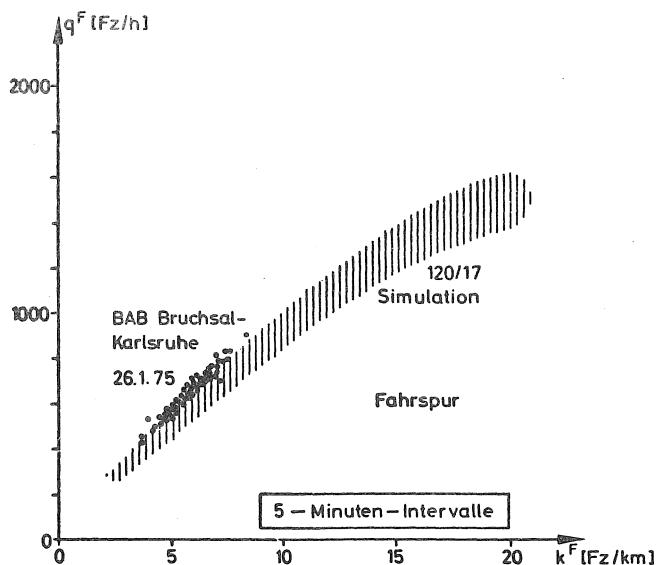


Abb. 46 : Fundamentaldiagramme der einzelnen Spuren im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 120/17

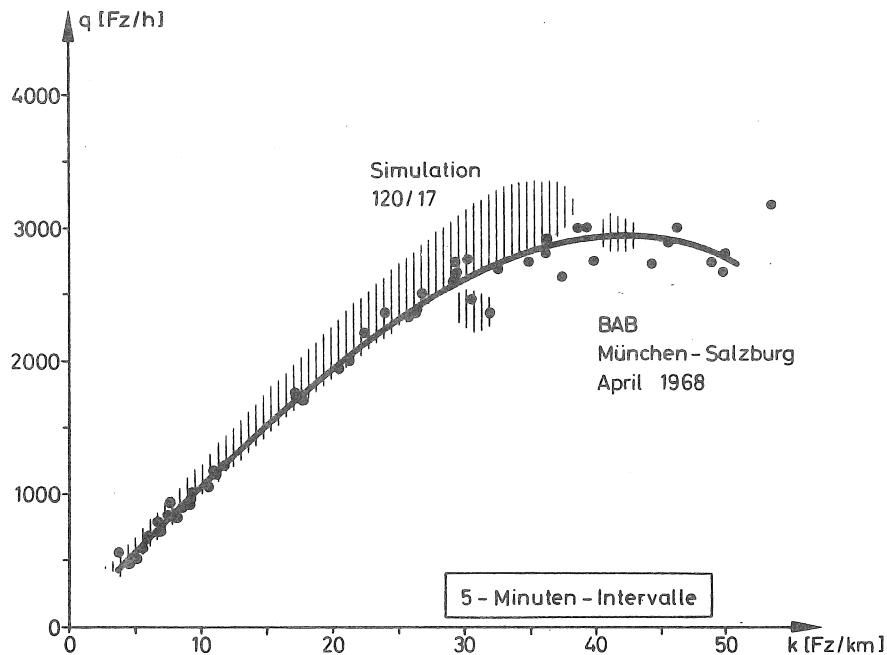


Abb. 47 : Fundamentaldiagramm des Gesamtquerschnitts
im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 120/17

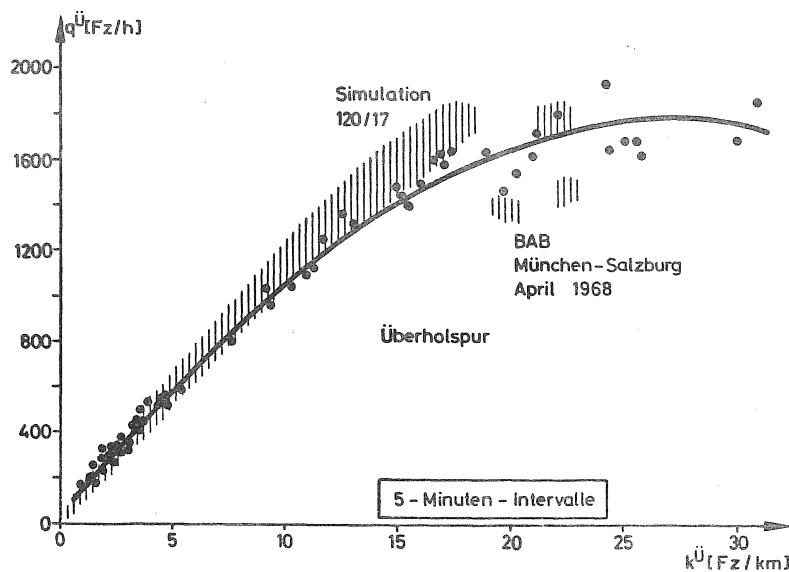
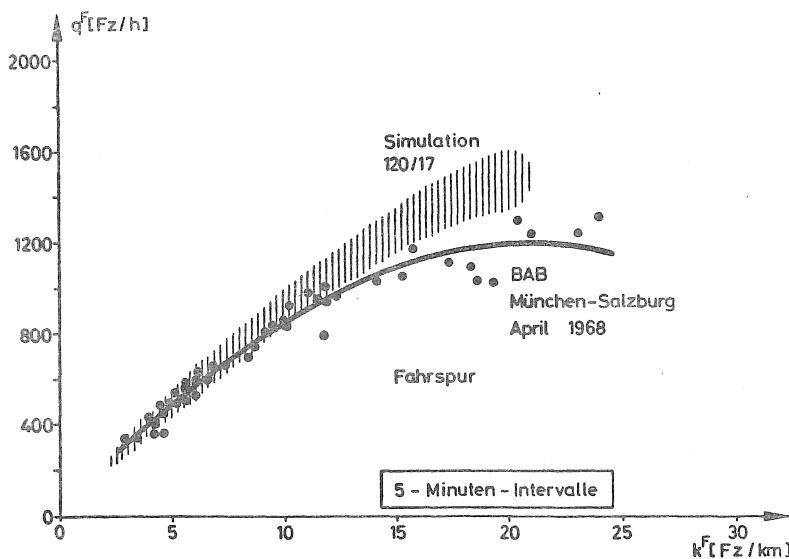


Abb. 48 : Fundamentaldiagramme der einzelnen Spuren im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 120/17

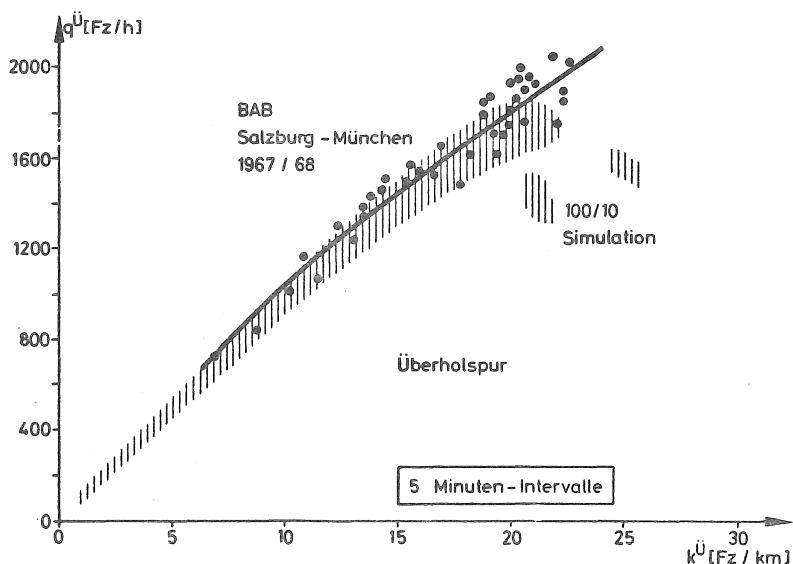
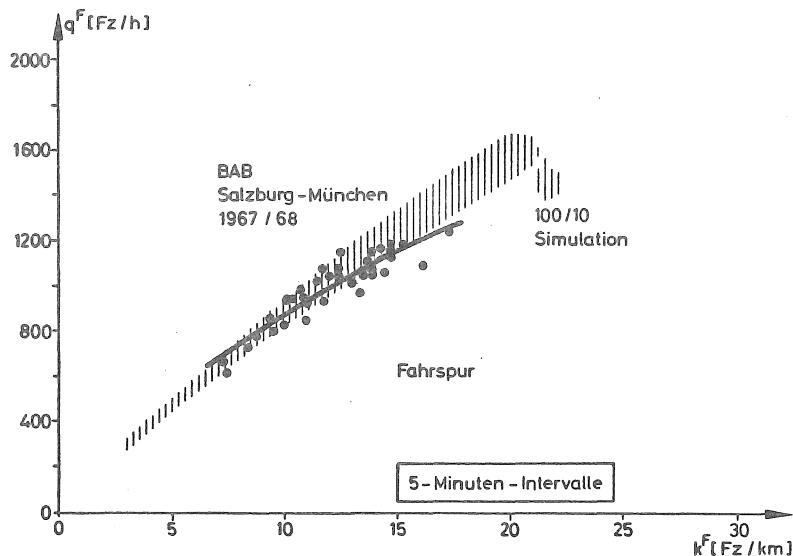


Abb. 49 : Fundamentaldiagramme der einzelnen Spuren im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 100/10

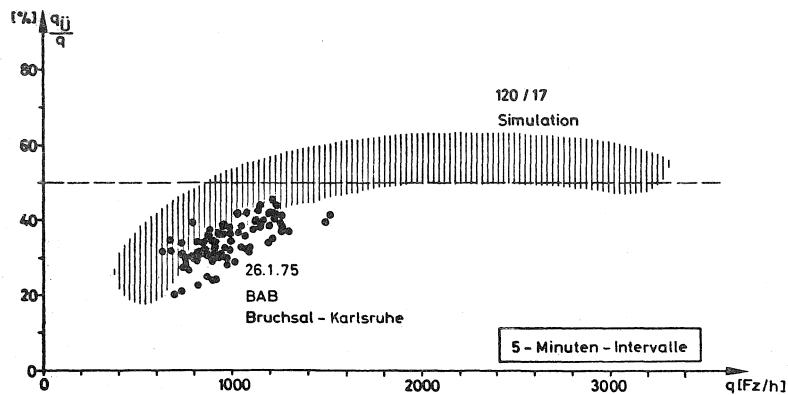
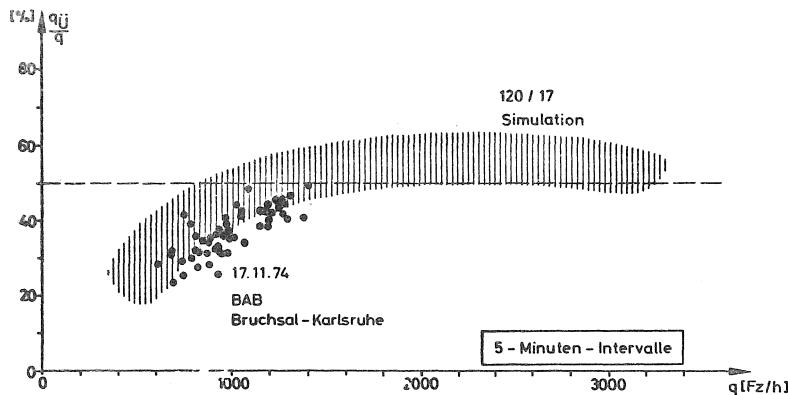


Abb. 50 : Verkehrsstärkeanteil der Überholspur
im Vergleich mit Meßergebnissen;
Simulationsreihe 120/17

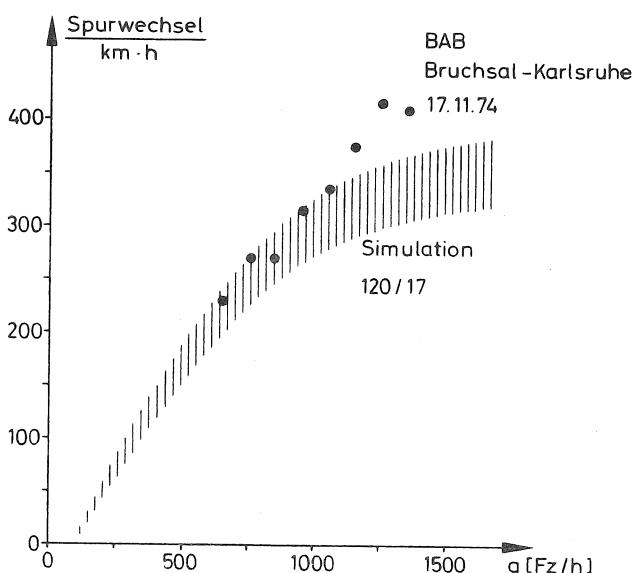
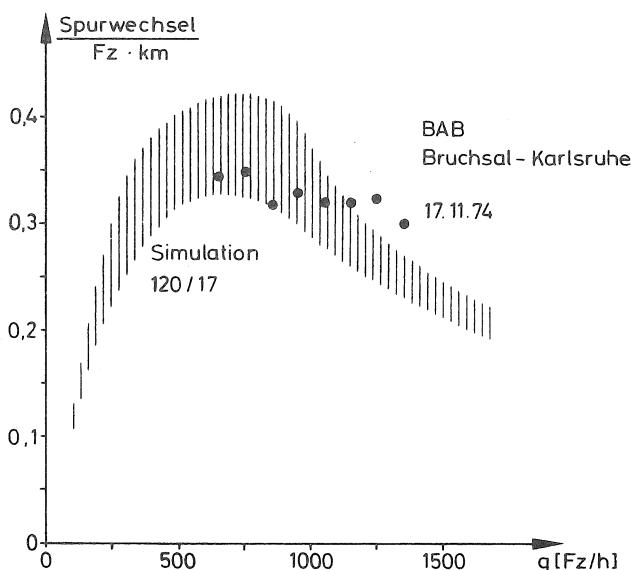


Abb. 51 : Spurwechselhäufigkeit / Verkehrsstärke im Vergleich mit Meßergebnissen;
 Simulationsreihe 120/17

Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

Schriftenreihe des Instituts

- Heft 1: Baron, P.S.: Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen; 1967. +)
- Heft 2: Stoffers, K.E.: Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen; 1968. +)
- Heft 3: Koehler, R.: Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung; 1968. +)
- Heft 4: Böttger, R.: Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Straßenkreuzungen; 1970. +)
- Heft 5: Drost, M.: Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs; 1971. +)
- Heft 6: 10 Jahre Institut für Verkehrswesen; 1973. +)
- Heft 7: Bey, I.: Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung; 1972. +)
- Heft 8: Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses; 1974. +)
- Heft 9: Köhler, U.: Stabilität von Fahrzeugkolonnen; 1974. +)
- Heft 10: Thomas, W.: Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungs-Modells; 1974. +)
- Heft 11: Pape, P.: Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung; 1976. +)
- Heft 12: Koffler, Th.: Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg; 1977. +)
- Heft 13: Haenicke, W.: Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsoorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit; 1977. +)
- Heft 14: Bahm, G.: Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme; 1977. +)

- Heft 15: Laubert, Wolf.: Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen; 1977.
- Heft 16: Sahling, B.-M.: Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren -; 1977.
- Heft 17: Zahn, E.M.: Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze; 1978.
- Heft 18: Handschmann, W.: Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers; 1978.
- Heft 19: Willmann, G.: Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen; 1978.

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

Leutzbach, W., Bexelius, S.: Probleme der Kolonnenfahrt; Heft 44 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1966.

Lenz, K.-H.: Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie der Warteschlangen; Heft 66 der Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Kirschbaum Verlag, Bad Godesberg, 1966.

Ernst, R.: Verkehrsablauf an Straßenknoten; Heft 60 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1967.

Wiedemann, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen - Untersuchungen über die Ausbreitung von Fahrzeugpulks; Heft 74 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1968.

Ziegler, M.: Wegewahl als Regelkreis - Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wegewahl, Reisezeiten und Verkehrsmengen; Heft 99 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1970.

Hoefs, D. H.: Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen; Heft 140 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1972.

Dilling, J.: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken; Heft 151 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1973.

Leutzbach, W., Wetterling, K.: Kurzfassungen ausgewählter Arbeiten aus der Bundesrepublik Deutschland, Techn. Untersuchungen; Heft 3 der Schriftenreihe "Forschung Stadtverkehr - Sonderreihe", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1974.

Findeisen, H.-G.: Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen; Heft 178 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1975.

Brilon, W.: a) Unfallgeschehen und Verkehrsablauf.
b) Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; Heft 201 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1976.

Brilon, W., Brannolte, U.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Straßen mit Gegenverkehr; Heft 239 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1977.

Handschmann, W., Voss, M.: Der Mensch als Fahrzeugführer; Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Menschen; Heft 8 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1978.

Leutzbach, W. et al.: Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell; Heft 9 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1978.

Vorläufige Berichte des Instituts

- Nr. 1: Leutzbach, W., Koehler, R.: Binnenwasserstrassenverkehr als Zufallsverteilung; 1964.
- Nr. 2: Eick, P.: Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALD; 1964
- Nr. 3: Bexelius, S.: Größen der Verkehrstheorie - ihre Definition und Anwendung; 1965.
- Nr. 4: Leutzbach, W., Ernst, R.: Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierung auf das Verhalten der Fahrzeuglenker; 1965.
- Nr. 5: Gullón Löw, M.: Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes; 1965. +)
- Nr. 6: Bexelius, S.: An extended Model for Car Following; 1965.
- Nr. 7: Bexelius, S.: Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschiedene Arten von Engpässen; 1965. +)
- Nr. 8: Leutzbach, W., Lenz, K.-H.: Wartezeitverluste an Schleusen; 1966.
- Nr. 9: Martin, W.: Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stuttgart; 1967. +)
- Nr. 10: Droste, M.: Parkraumerhebungen in Intervallen; 1968.
- Nr. 11: Leutzbach, W.: Bewegung als Funktion von Zeit und Weg; 1968 (reprinted in Transportation Research, Vol 3 (1969) 421-428).
- Nr. 12: Droste, M.: Die Berechnung optimaler Signalzeitenpläne als Problem der ganzzahligen linearen Programmierung; 1969.
- Nr. 13: Ludes, K., Siegeler, W.: Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten; 1969.
- Nr. 14: Haigth, F.A.: Problems in Transport Safety; 1970.
- Nr. 15: Dilling, J.: Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik; 1970. +)

- Nr. 16: Coblenz, H.S.: Transportation Planning and Social Issues: Function and Dysfunction; 1971. +)
- Nr. 17: Köhler, U.: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsganglinie bzw. Geschwindigkeitsprofil und Häufigkeitsdichte der Geschwindigkeiten; 1971. +)
- Nr. 18: Brilon, W.: Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern; 1973. +)
- Nr. 19: Vásárhelyi, B.: Stochastische Simulation an Straßenkreuzungen nach dem "rechts-vor-links-Prinzip"; 1974.
- Nr. 20: Bahm, G., Laubert, W.: Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personennahverkehrssystemen; 1975.
- Nr. 21: Wiedemann, R., Brilon, W., Brannolte, U.: Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; 1977.
- Nr. 22: Brannolte, U., Vásárhelyi, B.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf kurvigen Landstraßen; 1977. +)

Institutsnotizen

- Nr. 1: Bisbee, E.F.: Beispiele zur Transportanalyse; 1967 (übersetzt von W. Siegener). +)
- Nr. 2: Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- und Verteilungsmodelle; Seminarbericht SS 1968. +)
- Nr. 3: Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpassen; Seminarbericht WS 1968/69.
- Nr. 4: Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und der Kapazität des Parkraums; Seminarbericht SS 1969. +)
- Nr. 5: Brilon, W.: Erzeugung von Zufallszahlen; 1970.
- Nr. 6: Dilling, J.: Charakteristik des Verkehrsablaufs auf einem Autobahnabschnitt; 1970.
- Nr. 7: Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Ausbauvarianten einer Straßenkreuzung; Seminarbericht WS 1969/70
- Nr. 8: Untersuchungen der Verkehrssicherheit einer Straßenkreuzung; Seminarbericht SS 1970.
- Nr. 9: Möglichkeiten des Einsatzes eines Kabinen-Taxi-Systems (CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe; Seminarbericht SS 1971.
- Nr. 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau - ein Optimierungsbeispiel; Seminarbericht WS 1971/72.
- Nr. 11: Möglichkeiten der Steuerung von Lichtsignalanlagen in städtischen Netzen; Seminarbericht SS 1972.
- Nr. 12: Exkursionsbericht SS 1973
- Nr. 13: Unfalluntersuchung und Stauberechnung auf einem Abschnitt der Bundesautobahn; Seminarbericht SS 1973. +)
- Nr. 14: Wochenendverkehr im nördlichen Schwarzwald; Seminarbericht WS 1973/74. +)
- Nr. 15: Geschwindigkeitsbeschränkungen, Seminarbericht SS 1974.
- Nr. 16: Autohöfe - ihre Bedeutung für den Güterverkehr; Seminarbericht WS 74/75.

- Nr. 17: Die Karlsruher Häfen; Seminarbericht SS 1975.
- Nr. 18: Lärmschutz an Straßen; Seminarbericht WS 75/76. +)
- Nr. 19: Einfluß des Fluglärmes auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen; Seminarbericht SS 1976.
- Nr. 20: Kombinierter Verkehr; Seminarbericht WS 1976/77
- Nr. 21: Koordinierung der Lichtsignalanlagen eines Straßenzuges unter Berücksichtigung des öffentlichen Personennahverkehrs; Seminarbericht SS 1977.