

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

Dr.-Ing. Wolfgang Handschmann

**Sicherheit und Leistungsfähigkeit
städtischer Straßenkreuzungen
unter dem Aspekt der
Informationsverarbeitung
des Kraftfahrzeugführers**

Heft 18



1978

V o r w o r t

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe. Sie wurde durch Bereitstellung von Forschungsmitteln der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik) und der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) ermöglicht.

Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Wiedemann danke ich für die Unterstützung und Förderung der Arbeit sowie für die Übernahme des Referats. Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Georg Retzko danke ich für seine Anregungen und die Übernahme des Korreferats. Außerdem danke ich allen, die in irgendeiner Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Die Rechenarbeiten und Simulationsläufe wurden auf der UNIVAC 1108/1106 des Rechenzentrums der Universität (TH) Karlsruhe durchgeführt.

Wolfgang Handschmann

Karlsruhe im Sommersemester 1978

K u r z f a s s u n g

Handschmann, W.

Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers.

125 Seiten; 37 Abbildungen; Anhang

Ziel der Untersuchungen ist es, qualitative und quantitative Zusammenhänge zwischen der Informationsverarbeitung des Fahrers und verkehrstechnischen Kenngrößen aufzuzeigen. Es wird ein Simulationsmodell erstellt, das auf Kreuzungen mit unterschiedlichen Verkehrsbelastungen und verschiedenen Sichtverhältnissen angewandt werden kann.

Zur Eichung des Simulationsmodells und zur Herleitung quantitativer Zusammenhänge wird ein Meßverfahren vorgestellt, das eine objektive Aufzeichnung des realen Verkehrsgeschehens erlaubt, aufgrund dessen der Nichtbevorrechtigte die Entscheidung für das momentane Fahrverhalten bis zum eigentlichen Kreuzungsvorgang fällt. Die Ergebnisse zeigen, daß das Beobachtungsverhalten des nicht bevorrechtigten Fahrers in charakteristischer Weise von den Sichtverhältnissen und von den Verkehrsverhältnissen im Hauptstrom abhängt und entscheidend die Leistungsfähigkeit einer Kreuzung beeinflussen kann.

S u m m a r y

Handschmann, W.

Information Processing of Drivers Regarding Safety
and Efficiency of Urban Street Crossings.

125 Pages, 37 Illustrations, Appendix

Qualitative and quantitative relations between information processing of the driver and some traffic parameters are to be shown. A simulation model is set up which can be applied for crossings at any traffic volume and differing visibility.

A measuring procedure to calibrate the simulation model and to show quantitative relations between observation behaviour (e.g. head movements) and traffic parameters is demonstrated. The results show that observation behaviour of the driver on the secondary street depends on the visibility and the traffic conditions in the main street influencing the capacity of the crossings in a characteristic manner.

R é s u m é

Handschmann, W.

La réalisation des informations présentées aux conducteurs au point de vue de la sécurité et la capacité des intersections de routes urbaines.

125 pages, 37 illustrations, annexe

Dans l'étude il s'agit de montrer la relation qualitative et quantitative entre la réalisation des informations présentées au conducteur et les données du trafic.

On a établi un modèle de simulation permettant l'application aux intersection à différents volumes du trafic et diverses conditions de visibilité.

On a présenté une méthode de mesure pour calibrer ce modèle et démontrer les relations quantitatives entre la manière d'observation (par exemple: mouvement de la tête) et les paramètres du trafic.

Les résultats montrent que la manière d'observation d'un conducteur se trouvant sur la route secondaire dépend, d'une manière caractéristique, des conditions de visibilité et du trafic sur la route à priorité et ainsi pouvant essentiellement influencer la capacité d'une intersection.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. Einleitung	1
1. Problemstellung	3
2. Informationsverarbeitungsprozess im Straßenverkehr	5
2.1 Informationsangebot	6
2.2 Informationsaufnahme	9
2.3 Informationsverarbeitung	13
2.4 Informationsweiterleitung	15
3. Analyse des Informationsverarbeitungs- prozesses an Straßenkreuzungen in Abhängig- keit von verkehrstechnischen Kenngrößen	17
3.1 Kreuzungsvorgang	17
3.2 Verkehrstechnische Kenngrößen	19
3.3 Modell der potentiellen Zeiten	24
3.4 Blickwinkelgeschwindigkeiten bei der Wahrnehmung von Bewegungen der Fahrzeuge im Kreuzungsbereich	28
3.5 Empirische Untersuchungen an vorfahrtge- regelten innerstädtischen Straßenkreuzungen	36
3.5.1 Auswahl der Kreuzungen	36
3.5.2 Meßanordnung - Meßdurchführung	38
3.5.3 Aufbereitung und Auswertung der Meßdaten - Ergebnisse	42
3.5.3.1 Analyse der Tätigkeiten	42

	Seite
3.5.3.2 Beobachtungsverhalten des Nichtbevorrechtigten in Abhängigkeit von weg- und zeitbezogenen Kenngrößen des Straßenverkehrsablaufs	47
3.5.3.3 Verzögerungsverhalten des Nichtbevorrechtigten an der Kreuzung	74
3.5.4 Zusammenfassende Bemerkungen zu den empirischen Untersuchungen	76
3.6 Konsequenzen für die Praxis	79
4. Modell zur Simulation des Verkehrsablaufs an vorfahrtgeregelten innerstädtischen Straßenkreuzungen	81
4.1 Bisherige Arbeiten	82
4.2 Ablaufdiagramm des Simulationsmodells "KREUZEN"	84
4.3 Bausteine des Simulationsmodells "KREUZEN"	87
4.3.1 Aufbau der fahrer- und fahrzeugspezifischen Elemente	87
4.3.2 Zufallsgeneratoren - Reaktions- und Entscheidungsmechanismen	88
4.4 Konzeption der Auswerteprogramme	95
4.5 Simulationstechnische Untersuchungen	96
4.5.1 Einfluß der Sichtverhältnisse an der Kreuzung auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße	97
4.5.2 Einfluß der Belastung des bevorrechtigten Fahrzeugstroms auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße	99

	Seite
4.5.3 Einfluß der Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugstroms auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße	103
4.6 Zusammenfassende Bemerkungen zu den simulationstechnischen Untersuchungen	105
5. Vergleichende Bewertung Empirie - Simulation	107
6. Zusammenfassung	111
7. Literaturverzeichnis	113
8. Anhang	118

O. Einleitung

Die von der Luftfahrtforschung begonnenen Bemühungen, Untersuchungen durchzuführen, die sich mit der Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Mensch-Maschine-Systemen und Mensch-Maschine-Umwelt-Systemen beschäftigen (BAKER, CHAPANIS), werden in immer stärkerem Maße von anderen Arbeitsbereichen übernommen.

Aufbauend auf den von der Luftfahrtforschung vorgestellten Modellbegriffen hat man in den Forschungsbereichen der Fertigungsindustrie Modelle des Verhaltens des Menschen bei Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungstätigkeiten entwickelt. Neben der Sicherheit und Leistungsfähigkeit ist dabei die Wirtschaftlichkeit ein weiterer Faktor, den es zu verbessern gilt.

In entsprechenden Forschungsvorhaben zur Analyse des Informationsaufnahme- und Informationsverarbeitungsprozesses des Menschen im Straßenverkehr, wurden Teile der in der Luftfahrtforschung entwickelten Modellvorstellungen erst relativ spät übernommen. Eine der Hauptursachen dafür ist sicher die durch die Problemstellung bedingte notwendige Untersuchung des Verhaltens des einzelnen Fahrers in definierbaren Verkehrssituationen. Durch die Kompliziertheit und Komplexität des realen Verkehrsgeschehens ist aber eine genaue Definition der momentan vom Fahrer zu bewältigenden Verkehrssituation nur sehr selten möglich, so daß viele Untersuchungen schon von vornherein an der Möglichkeit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse scheitern.

Neben der exakten Definition der Verkehrssituation bereitet auch die Festlegung der für den Fahrer relevanten Informationen aus dem Fahrzeug oder aus der Umwelt (Belastung des Fahrers) Schwierigkeiten, da die Relevanz von

Informationen für den Fahrer weitgehend von Faktoren bestimmt wird, die nicht direkt quantifizierbar sind (z.B. Motivation, Aufmerksamkeit, Stress u.v.m.).

Die Nachbildung bestimmter Verkehrssituationen mit Fahrzeugsimulatoren und mathematischen Simulationsmodellen als Ergänzung zu einer Vielfalt von Laborexperimenten und Versuchsfahrten im realen Verkehrsgeschehen sind mögliche Ansätze zur Lösung der gestellten Aufgaben.

Ein Hauptziel all dieser Bestrebungen der Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Systems ist die Steigerung der Verkehrssicherheit bei gleichzeitiger Verbesserung der Leistungsfähigkeit des einzelnen Fahrers und des Gesamtsystems.

1. Problemstellung

Der Bewegungsablauf eines Kraftfahrzeugs setzt sich zusammen aus den Komponenten Fahrer, Fahrzeug und Umwelt. Die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern wird durch die Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) reglementiert.

Alleinfahrende Fahrer sowie Fahrer, die sich in einem Verkehrsstrom bewegen, einen Verkehrsstrom kreuzen oder anderen, entgegenkommenden Fahrzeugen begegnen, sind bei der Führung ihres Fahrzeugs auf Informationen angewiesen.

Informationen erhält der Fahrer sowohl direkt während des Bewegungsvorgangs als auch durch bewußtes oder unbewußtes Abrufen früher im Gedächtnis abgespeicherter Informationen. Direkte Informationen sind z.B. Trassierungselemente einer momentan befahrenen Straße, Reaktion des Fahrzeugs auf eine Maßnahme des Fahrers und insbesondere sichtbare absolute und relative Bewegungsgrößen anderer in einer Verkehrssituation relevanter Fahrzeuge.

Unter den im Gedächtnis gespeicherten Informationen sollen hier im wesentlichen solche Informationen verstanden werden, die dem Fahrer die richtige Benutzung des Systems "Straße" vorschreiben. Dieser Hinweis zielt vor allem auf die Reglementierung des Verhaltens gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern und auf die Deutung momentan relevanter Verkehrszeichen bezüglich ihres vorschreibenden oder empfehlenden Charakters.

Feststellbares Fehlverhalten eines Fahrers in einer bestimmten Verkehrssituation kann zum einen auf mangelnde Information des Fahrers in der jeweiligen Verkehrssitu-

tion zurückgeführt werden, zum anderen kann auch eine zu große Informationsdichte Ursache eines zu einem Unfall führenden Fehlverhaltens sein. Dem betrachteten Fahrer und anderen Verkehrsteilnehmern kommt demnach die Aufgabe zu, das aus dem Über- oder Unterangebot von Informationen resultierende Fehlverhalten so zu kompensieren, daß ein potentieller Unfall vermieden wird.

Lassen es die augenblickliche Verkehrslage oder sonstige äußere Bedingungen nicht zu, ein solches Fehlverhalten zu kompensieren, so resultiert daraus ein Unfall.

Es ist daher erforderlich, das Informationsproblem beim Führen eines Fahrzeugs unter den Gesichtspunkten des Informationsangebots und den möglichen Grenzen der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung zu analysieren.

Abgrenzung der Aufgabe - Zielsetzung

Die Komplexität des angesprochenen Problems erfordert eine enge Begrenzung der Aufgabe. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei den empirischen und modellmäßigen Untersuchungen den Gesichtspunkten der Verkehrssicherheit und der Leistungsfähigkeit der Vorrang gegeben. Insbesondere wird die Verkehrssituation "Kreuzen einer bevorrechtigten städtischen Straße" untersucht.

Schwerpunkt dieser Untersuchungen ist die qualitative und quantitative Analyse der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung des Nichtbevorrechtigten an einer vorfahrtgeregelten innerstädtischen Kreuzung in Abhängigkeit von den verkehrstechnischen Kenngrößen des Hauptstroms. Aufbauend auf den empirischen Untersuchungen sollen Eichfunktionen ermittelt werden, die eine Kalibrierung eines mathematischen Simulationsmodells "KREUZEN" zulassen.

2. Informationsverarbeitungsprozess im Straßenverkehr

Die Analyse des Informationsverarbeitungsprozesses stellt ein zentrales und umfangreiches Problem im Straßenverkehr dar.

Will man, ausgehend von einem bestehenden und aufgrund der Dynamik des Verkehrsflusses sich dauernd ändernden Angebots von Informationen, den Informationsverarbeitungsprozess analysieren, so kann dies anhand des in Abb. 2-1 dargestellten Schemas erfolgen.

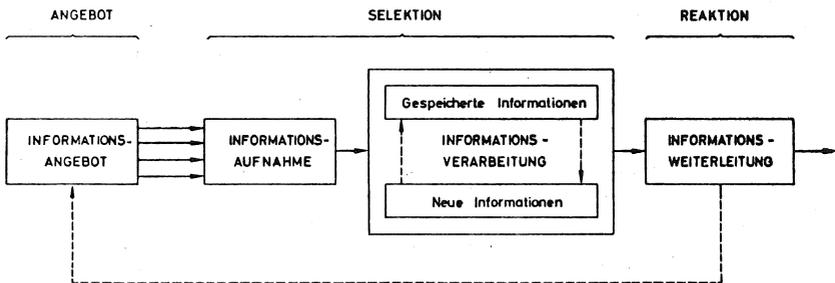


Abb. 2-1: Informationsverarbeitungsprozess im Straßenverkehr (in Anlehnung an HANDSCHMANN, VOSS)

Man geht davon aus, daß sich der Fahrer einem Überangebot vielschichtiger Informationen gegenüber sieht. Durch die Fähigkeit, zu adaptieren und zu selektieren, reduziert er bei der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung bewußt und/oder unbewußt die angebotenen Informationen auf dasjenige Maß, das er benötigt, um i.a. sicher und der Situation angepaßt reagieren zu können (KORNHUBER).

Die situativen Bedingungen also wirken sich über die Filter der subjektiven Einschätzung dieser Bedingungen auf die Aktionen und Reaktionen des Fahrers aus. Unerfahrene Fahrer sind deshalb u.a. aus Gründen der Unsicherheit bestrebt, möglichst viel Information aufzunehmen, um so dem subjektiven Gefühl eines Informationsmangels entgegenzuwirken. Erfahrene Fahrer dagegen adaptieren schneller und reduzieren das Informationsangebot effektiver als unerfahrene Fahrer. Sie zeichnen sich außerdem durch ein höheres Maß an Reaktionssicherheit aus (DILLING).

2.1 Informationsangebot

Der Wunsch nach einer Quantifizierung des Informationsangebots im Straßenverkehr führt zwangsläufig zu der von SHANNON eingeführten Maßzahl für eine Informationseinheit. Man benötigt dazu einen vollständigen und abgeschlossenen Ereignisraum und erhält über die relativen Häufigkeiten $h(z_i)$ für das Auftreten eines Ereignisses die objektive Auftrittswahrscheinlichkeit $p(z_i)$. Der Informationsgehalt eines Ereignisses z_i mit der Auftrittswahrscheinlichkeit $p(z_i)$ ist definiert zu

$$I(z_i) = \text{ld} \frac{1}{p(z_i)} \cdot$$

Definitionsgemäß gilt mit $p(z_i) = 0,5$

$$I(z_i) = \text{ld} 2 = 1 \text{ bit}$$

Die Größe $\text{ld} 2$ wird ein bit genannt und bildet die Grundeinheit einer Informationsmenge.

Die Voraussetzungen, die es erlauben, von einem Informationsfluß in Form von bit/s zu reden, sind in technischen Systemen, bei denen die maximale Anzahl möglicher Ereignisse oder die maximal mögliche Anzahl von Zeichen oder Zeichenkombinationen bestimmbar ist, erfüllt. Sie sind auch unter bestimmten Randbedingungen in einfachen Laborexperimenten mit Versuchspersonen realisierbar. Sie sind jedoch nicht in dieser Form übertragbar auf das System FAHRER-FAHRZEUG-UMWELT im realen Verkehrsgeschehen. Dafür gibt es vielerlei Gründe, von denen einige im folgenden aufgeführt sind:

- Es ist nicht möglich, die Gesamtheit aller Ereignisse zu bestimmen, die den Fahrer zu der momentanen Reaktion veranlassen.
- Die Bandbreite der dargebotenen Informationsarten (verbal, nonverbal, kodiert, unkodiert, subjektiv, objektiv u.v.m.) reicht zu weit, um eine einheitliche Normierung vornehmen zu können.
- Es ist nicht möglich, objektive Auftretenswahrscheinlichkeiten der Ereignisse zu bestimmen, da u.a. die Eigen- dynamik von Verkehrssituationen i.a. zu groß ist.

Die Vielfalt der Informationen und das Splitten der Aufnahme dieser Informationen auf die verschiedenen Wahrnehmungskanäle des Menschen bedingt deshalb bei der Analyse des Informationsverarbeitungsprozesses eine weitgehend gegenstandsbezogene Definition des Begriffes "Information". Dem Informationsgehalt $I(z_i)$ eines Ereignisses z_i entspricht dann ein resultierender Begriff als Kombination aus dem Namen N des Ereignisses z_i und der Relevanz R_i dieses Ereignisses für die einzelnen Fahrer:

$$I(z_i) = f(N(z_i), R_i)$$

Als Beispiel möge man sich vor Augen halten, daß ein Halteverbotsschild als Informationsgegenstand für einen Fahrer, der in einer Stadt einen Parkplatz sucht, eine andere Relevanz besitzt als für einen Fahrer, der diese Stadt nur durchfährt und hinsichtlich der Informationsaufnahme mehr auf Hinweisschilder fixiert ist.

Der so definierte Informationsgehalt ist in dieser Form nicht direkt quantifizierbar. Man versucht deshalb in Feld- und Laborexperimenten über Beanspruchungsmessungen physiologischer Indikatoren (z.B. Bestimmung von Hautwiderstand, Herzschlagfrequenz) Rückschlüsse auf die Belastung (Informationsangebot) zu ziehen, um so wenigstens ein indirektes Maß für die vom Fahrer zu bewältigende Informationsmenge zu erhalten (RADL). Ebenso existieren Untersuchungen über Zeitbedarfwerte für Aktionen, um aus der Dauer der Tätigkeit Rückschlüsse zu ziehen auf die Komplexität und Kompliziertheit des zu bewältigenden Problems (JONSSON, KLIX). Untersuchungen dieser Art haben i.a. den Mangel, daß dabei der Mensch als "black box" verstanden wird.

Aufgrund der zugrundeliegenden Modellvorstellung stellt sich bei den physiologischen Indikatoren ganz vordergründig das Problem der Reproduzierbarkeit und Allgemeingültigkeit der Ereignisse, da dem Zustand eines Menschen in jedem Augenblick seines Lebens ein bestimmter Aktivierungsgrad zugeordnet werden kann, der vom tiefen Schlaf bis zur höchsten Angespanntheit reicht. Somit kann selbst bei Konstanzhaltung der Randbedingungen und bei gleichem Informationsangebot der Fahrer unterschiedlich beansprucht sein. Es kann also nicht von einer linearen Beziehung zwischen Indikator und psychischer Leistungsfähigkeit des Menschen ausgegangen werden.

Ergebnisse aus Beanspruchungsmessungen durch physiologische Indikatoren unter dem Blickwinkel des Informationsverarbeitungsprozesses des Fahrers im Straßenverkehr sind deshalb mit aller gebotenen Vorsicht zu interpretieren (HELANDER).

2.2 Informationsaufnahme

Die Aufnahme von Informationen erfolgt je nach Art der Informationen über die drei Wahrnehmungskanäle

- visueller Kanal,
- auditiver Kanal,
- haptischer Kanal,

auf die im folgenden kurz eingegangen werden soll.

2.2.1 Visuelle Wahrnehmung

Der Hauptanteil der Informationsaufnahme wird durch den visuellen Kanal abgedeckt. Aufnehmendes Organ ist das menschliche Auge, bei dem die Fähigkeiten zu akkomodieren und zu adaptieren von grundlegender Bedeutung sind. Weitere elementare Begriffe bei der visuellen Wahrnehmung sind im folgenden aufgeführt und kurz erläutert.

Gesichtsfeld

Das Gesichtsfeld wird als derjenige Raum definiert, der bei ruhendem Auge vom Menschen wahrgenommen wird. Abb. 2-2 veranschaulicht Ausdehnung und Form des Gesichtsfeldes. Man erkennt deutlich die Asymmetrien in der vertikalen und horizontalen Sehachse. Eine Analyse und weitergehende Differenzierung des Gesichtsfeldes führt zu zwei weiteren Begriffen, die das Gesichtsfeld entscheidend bestimmen, nämlich das foveale und periphere Sehen.

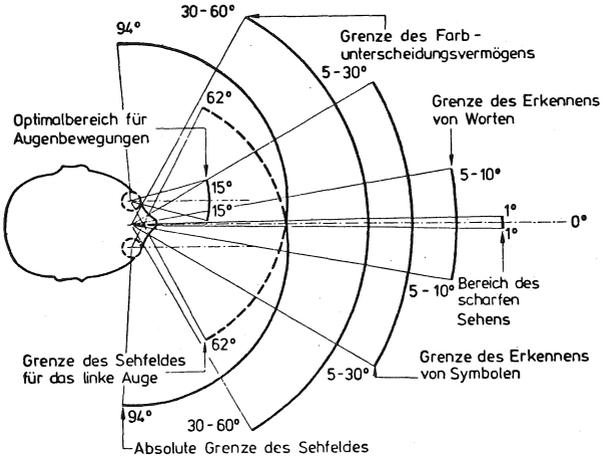
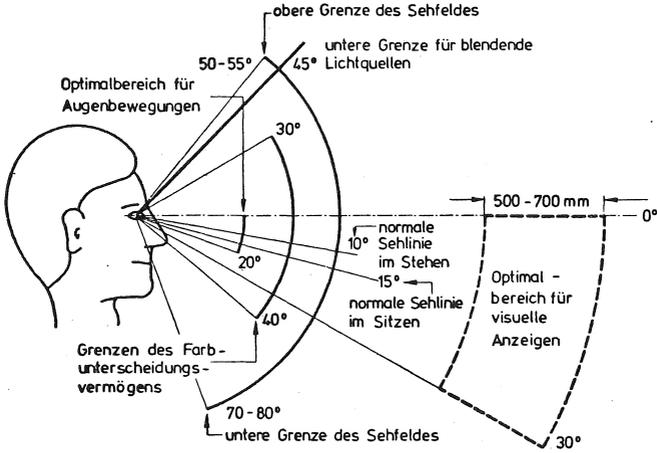


Abb. 2-2: Ausdehnung des Gesichts- und Blickfeldes (vertikal und horizontal) nach KRAISS

- Foveales Sehen

Der Bereich des fovealen Sehens oder scharfen Sehens liegt unmittelbar in der Umgebung der zentralen Sehachse und beschreibt einen Kreis um diese von 1° bis 2° im Durchmesser (HÖFNER u.a.).

- Peripheres Sehen:

Unter dem peripheren Sehen versteht man i.a. den Bereich des Sehens, der über das foveale Sehen hinausgeht. Der periphere Sehbereich hat im Straßenverkehr eine hervorragende Bedeutung zum einen bei der Information über die Eigengeschwindigkeit des Fahrers (SALVATORE) zum anderen zeichnet sich die Netzhautperipherie durch eine hohe Bewegungssehstärke aus (KNITTEL). Daher kann diesem Bereich des Gesichtsfeldes eine sehr starke Warnfunktion zugeordnet werden (HABERICH).

Blickfeld und Umblickfeld

Im allgemeinen wird das Blickfeld als derjenige Raum definiert, der bei ruhendem Kopf allein durch Augenbewegung erfaßt wird (KRAISS). Bei GRAMBERG-DANIELSEN findet sich noch über das Blickfeld hinausgehend die Bezeichnung eines Umblickfeldes, das als derjenige Raum definiert ist, der unter "Ausnutzung aller Bewegungsmöglichkeiten bei fixierten Füßen oder im Sitzen" wahrgenommen werden kann.

Neben den bisher erwähnten Begriffen für eine erste Analyse des Wahrnehmungsapparats seien im folgenden noch solche erwähnt, die eine tiefergehende Differenzierung zulassen.

Allgemein ist bekannt, daß das menschliche Auge zur Betrachtung eines Gegenstandes diesen i.a. nicht mit einem langen Blick fixiert, sondern durch kurze Fixation abtastet.

Neben verschiedenen Mikrobewegungen des Auges ist die häufigste Augenbewegung die Sakkade (ROBINSON 1964). Darunter versteht man einen Sprung des Auges von einem Fixationspunkt zu einem anderen. Die Dauer eines solchen Sprungs liegt im ms-Bereich und geht maximal bis zu 15° Abweichung von der vorausgegangenen Fixation. Von der gesamten Sehzeit werden 95 % durch Fixation in Anspruch genommen, während die restlichen 5 % durch Sakkaden abgedeckt werden (ROCKWELL).

2.2.2 Akustische Wahrnehmung

Gegenüber dem visuellen wird dem akustischen Wahrnehmungskanal im realen Verkehrsgeschehen eine mehr oder weniger untergeordnete Rolle zugewiesen. Er hat im wesentlichen die Funktion, die visuell aufgenommenen Informationen zu ergänzen. Seine Bedeutung bei der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung darf jedoch nicht unterschätzt werden, da zwischen den Wahrnehmungskanälen Blockierungs- und Interferenzeffekte auftreten können. So hat beispielsweise CONRAD den Effekt von starken auditiven Reizen auf das periphere Sehvermögen untersucht und dabei festgestellt, daß die Sehleistung durch laute Geräusche beeinträchtigt werden kann.

2.2.3 Haptische Wahrnehmung

Dem haptischen (taktilen) Wahrnehmungssystem wird im Straßenverkehr eine sehr zentrale Bedeutung beigemessen (TIESLER). Es besteht aus einer Vielzahl von körperinternen Sensoren und Sensorsystemen und hilft dem Menschen, sowohl die Stellung seiner Gliedmaßen zu koordinieren als auch die Lage und z.T. auch den kinematischen Zustand des gesamten menschlichen Körpers im Raum festzustellen. Neben dem in der Haut und in den Gelenkkapseln verteilten Sensoren spielt der Vestibulärapparat, der sich im inneren Ohr befindet und ein Sensorsystem für Beschleunigungen und Lageänderungen darstellt, eine wichtige Rolle. Auf eine detaillierte Beschreibung des Vestibulärapparates wird an dieser Stelle verzichtet.

Zwischen den Reizen auf das gesamte haptische Wahrnehmungssystem und den visuellen Reizen besteht eine enge Wechselbeziehung (TIESLER, KRAISS 1970), ohne die eine sichere Fahrzeugführung undenkbar wäre. Dies ist vor allem zu sehen im Hinblick auf die Motorik und die Sensumotorik, die bei der Lenkung von Kraftfahrzeugen eine ganz entscheidende Rolle spielen.

2.3 Informationsverarbeitung

Verantwortlich für die reibungslose Abarbeitung der aufgenommenen Informationen im Menschen ist die sogenannte "formatio reticularis". Es handelt sich dabei um ein Nervenzellennetzwerk, das sich zwischen dem Zwischenhirn und den verlängerten Strängen des Rückenmarks erstreckt (Abb. 2-3). Von ihm aus geht ein diffuses Projektionssystem zu den rezeptiven Gebieten der Großhirnrinde. Außerdem gehen von der formatio reticularis über absteigende, fördernde und hemmende Bahnen Einflüsse auf diejenigen Schaltkreise im Rückenmark, die das Muskelspiel und die Feinmotorik (Lidschlag, Atmung) beeinflussen.

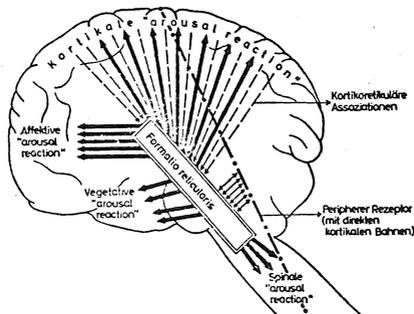


Abb. 2-3: Schematische Darstellung der Kopplung der formatio reticularis an die verschiedenen Wahrnehmungs- und Reaktionssysteme (nach LEUTNER)

Beim Führen eines Fahrzeugs z.B. hat die Reticularformatio die Aufgabe der Übernahme erlernter Bewegungsabläufe als automatische Bewegungsmuster, z.B. Lenken, Kuppeln, Schalten, Bremsen, Blinken u.v.m.. Obwohl ein Fahrer in jeder Verkehrssituation i.a. automatisch alle notwendigen Handlungen ausführt, handelt es sich keineswegs um Reflexautomatismen, die jeweils über das Rückenmark gesteuert werden (z.B. im Sport), sondern um Bewegungsautomatismen, die eingerichtet sind, um die Großhirnrinde zu entlasten. Zur Veranschaulichung dessen sei erwähnt, daß der Fahrer bei all den o.g. Tätigkeiten "nebenher" eigene Gedanken fassen oder auch ein Gespräch führen kann, was im einzelnen von der Großhirnrinde aus gesteuert wird. Höchste Aktivierung, d.h. Vordringen des Reizes zur Großhirnrinde, kann aber z.B. auch notwendig werden beim plötzlichen Eintreten einer anderen Verkehrssituation. Von da an werden die Aktionen und Reaktionen des Fahrers ausschließlich von der Großhirnrinde gesteuert, was sich z.B. durch das Abbrechen des Gesprächs mit dem Partner bemerkbar machen kann. Vereinfacht läßt sich der Vorgang der Informationsverarbeitung etwa folgendermaßen zusammenfassen:

1. Bewußte, von der Großhirnrinde gesteuerte Verarbeitung von Informationen, die durch die Bestimmung von Aktionspotentialen an der Kopfhaut meßbar ist.
2. Unbewußte, von der Reticularformatio gesteuerte Verarbeitung von Informationen, die zum großen Teil der Entlastung der Großhirnrinde dient; sie ist nicht durch Aktionspotentiale meßbar.
3. Unbewußte und reflexartige, durch die Reflexzyklen des Rückenmarks gesteuerte Verarbeitung von Informationen.

Durch diese hierarchische Anordnung ist es dem Menschen möglich, gleichzeitig ankommende Informationen quasiparallel abzuarbeiten, was im Straßenverkehr von elementarer Bedeutung ist (MÜLLER-LIMMROTH, KORNHUBER).

2.4 Informationsweiterleitung

Die Weiterleitung der Informationen durch den Fahrer als Folge der Informationsverarbeitung geschieht im System FAHRER-FAHRZEUG-UMWELT in Wechselbeziehung zwischen den Komponenten

FAHRER - FAHRZEUG

und

FAHRER - UMWELT

Dabei äußert sich die Weiterleitung der Informationen in der Beziehung FAHRER-FAHRZEUG i.a. durch Handlungen des Fahrers (z.B. Bremsen, Gasgeben, Kuppeln), auf die das Fahrzeug reagiert. Dieser Sachverhalt ist im Detail recht gut durch Regelkreismodelle beschrieben (NIEMANN, CHENCHANNA, JOHANNSEN).

In der Wechselbeziehung FAHRER-UMWELT besteht zwar auch die Möglichkeit, in Regelkreismodelle die Weiterleitung von Informationen mit einzubringen, doch gestaltet sich hier die Beschreibung und Quantifizierung der Weiterleitung als sehr schwierig. Hauptgrund dafür ist, daß die Formen und Arten der vom Fahrer an die Umwelt abgegebenen Informationen sehr vielfältiger Natur sein können. Regelkreismodelle zu diesem Bereich sind über den qualitativ beschriebenen Status noch nicht hinausgekommen.

Zusammenfassend läßt sich zum Problem der Verarbeitung von Informationen durch den Menschen im Straßenverkehr folgendes sagen:

- Modellmäßige und empirische Untersuchungen zu diesem Problemkreis sind notwendig u.a. zur Steigerung der Verkehrssicherheit und zur Bestimmung der Kenngrößen, die die Leistungsfähigkeit des Straßenverkehrs beeinflussen.
- Eine Quantifizierung der durch den Straßenverkehr angebotenen Informationen ist nach dem klassischen Maß von SHANNON nicht möglich.
- Beanspruchungsmessungen zur indirekten Bestimmung der Belastung (Δ zu verarbeitende Information) des Fahrers sind ein möglicher Ansatz.

3. Analyse des Informationsverarbeitungsprozesses an Straßenkreuzungen in Abhängigkeit von verkehrstech- nischen Kenngrößen

3.1 Kreuzungsvorgang

Der Mangel an einer anwendungsgerechten Theorie zur quantitativen Beschreibung der Belastung des Kraftfahrers durch das Informationsangebot bedingt zunächst eine Analyse der Aktionen des Fahrers in der zu untersuchenden Verkehrssituation: "Kreuzen einer bevorrechtigten Straße". Die Vorüberlegungen zum Problem des Kreuzens einer bevorrechtigten Straße führen zu einer Untergliederung des Kreuzens in voneinander abgrenzbare Subfunktionen, die - parallel oder nacheinander ablaufend - die Verkehrssituation "KREUZEN" ergeben (Abb. 3-1). Diese Subfunktionen sind zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Bereichen I und II zuzuordnen. Der erste Bereich beinhaltet sämtliche Subfunktionen, die sich auf den Bereich vor der Kreuzung beziehen, wie z.B.:

- Annäherung an die Kreuzung ohne vorausfahrendes Fahrzeug;
- Beachten vorausfahrender Fahrzeuge
- Verzögerungsverhalten bzgl. des Kollisionsbereiches der Kreuzung.

Der zweite Bereich vereint sämtliche Subfunktionen, die in zeitlicher und örtlicher Hinsicht den unmittelbaren Kreuzungsbereich betreffen, z.B.:

- Beobachten des bevorrechtigten Verkehrsstroms nach links und nach rechts;
- Kreuzen (Beschleunigen über den Kollisionsbereich hinaus).

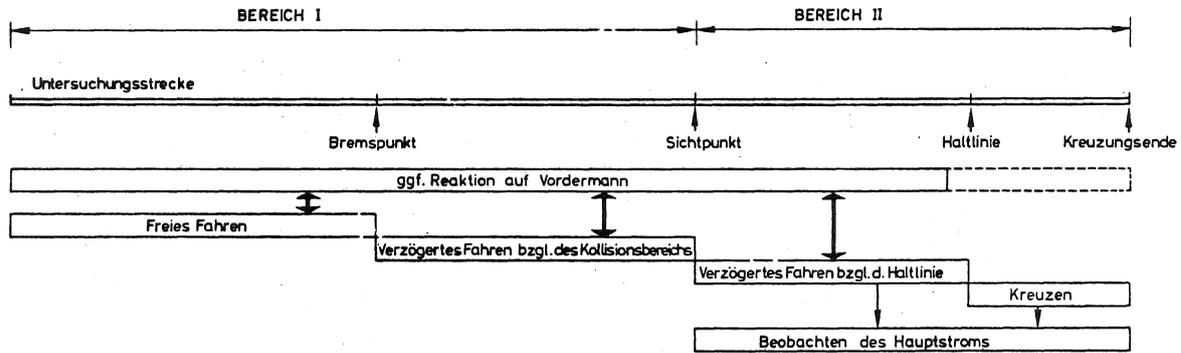


Abb. 3-1: Verzahnung der Subfunktionen in den Bereichen I und II für den Nichtbevorrechtigten in der Verkehrssituation "KREUZEN"

Diese Analyse soll richtungsweisend sein für die empirischen und modellmäßigen Untersuchungen dieser Verkehrssituation.

3.2 Verkehrstechnische Kenngrößen

Die Beschreibung von Zuständen des Verkehrsablaufs kann sowohl auf einer mikroskopischen als auch auf einer makroskopischen Betrachtungsweise basieren. Betrachtet man den Verkehrsablauf mikroskopisch, so sind die räumlichen und zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugen und deren lokal oder momentan ermittelten Geschwindigkeiten von Bedeutung. Betrachtet man ihn makroskopisch, so sind es vor allem die Größen Verkehrsdichte (k), Verkehrsstärke (q) und mittlere Geschwindigkeit eines Fahrzeugkollektivs (\bar{v}_1, \bar{v}_m). Um diese mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen zu ermitteln, bedient man sich lokaler und momentaner Erfassungsmethoden (LEUTZBACH, EDIE, COERS, MARTIN).

Bei einer lokalen Beobachtung wird das Verkehrsgeschehen an einem Streckenquerschnitt (Messquerschnitt x) während eines Zeitintervalls Δt erfaßt. Diese Erfassungsmethode liefert primär die Überfahrzeitpunkte der einzelnen Fahrzeuge am Meßquerschnitt x . Daraus kann bei n beobachteten Fahrzeugen die Verkehrsstärke q abgeschätzt werden:

$$q \text{ (lokal)} = \frac{n}{\Delta t} \cdot$$

Bei einer momentanen Beobachtung wird der Verkehr zu einem Zeitpunkt t auf einem Wegintervall Δx beobachtet, und man erhält die Weposition der Fahrzeuge auf dem Wegintervall Δx . Daraus kann bei m beobachteten Fahrzeugen die Verkehrsdichte k abgeschätzt werden:

$$k \text{ (momentan)} = \frac{m}{\Delta x} \cdot$$

Eine Kombination aus lokaler und momentaner Erfassungsmethode, die sogenannte räumlich-zeitliche Erfassungsmethode, ist dann angezeigt, wenn bestimmte Verkehrsmerkmale sowohl über einem Wegintervall Δx als auch über einem Zeitintervall Δt erfaßt werden müssen. Die verkehrstechnischen Kenngrößen, die diese Erfassungsmethode liefert, sind z. B.:

$$\begin{array}{l} \text{räumlich-zeitliche} \\ \text{Verkehrsstärke} \end{array} \quad Q = \frac{\sum \Delta x_i}{\Delta x \cdot \Delta t} \quad (3.1)$$

$$\begin{array}{l} \text{räumlich-zeitliche} \\ \text{Verkehrsdichte} \end{array} \quad K = \frac{\sum \Delta t_i}{\Delta x \cdot \Delta t} \quad (3.2)$$

wobei $\sum \Delta x_i$ die Summe der von allen Fahrzeugen in der Fläche $\Delta x \cdot \Delta t$ zurückgelegten Wegstrecken ist und $\sum \Delta t_i$ die Summe der von allen Fahrzeugen zum Durchfahren der Fläche $\Delta x \cdot \Delta t$ benötigten Zeiten darstellt (Abb. 3-2).

Beim Grenzübergang $\Delta x \rightarrow 0$ ergibt sich für den Zähler in Gleichung 3.1 die Relation

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum \Delta x_i = n \cdot \Delta x.$$

Daraus folgt für die Größe Q

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} Q = \frac{n \cdot \Delta x}{\Delta x \cdot \Delta t} = \frac{n}{\Delta t} = q \text{ (lokal)}$$

Analog ergibt sich für K beim Grenzübergang $\Delta t \rightarrow 0$ die Beziehung

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum \Delta t_i = m \cdot \Delta t.$$

Daraus folgt

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} K = \frac{m \cdot \Delta t}{\Delta x \cdot \Delta t} = \frac{m}{\Delta x} = k \text{ (momentan).}$$

Beim Übergang $\Delta x \rightarrow 0$ bzw. $\Delta t \rightarrow 0$ in Gleichung 3.1 bzw. 3.2 gehen also die räumlich-zeitliche Verkehrsstärke Q und die räumlich-zeitliche Verkehrsdichte K in die Verkehrsstärke q (lokal) und die Verkehrsdichte k (momentan) über.

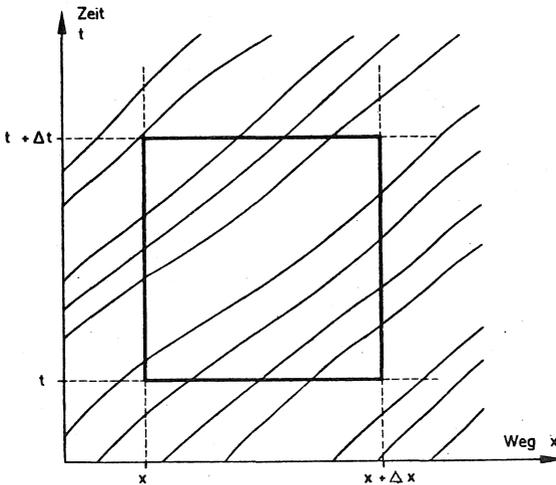


Abb. 3-2: Zeit-Weg-Darstellung der Bewegungslinien von Fahrzeugen

Abb. 3-3 zeigt zusammenfassend die Zusammenhänge zwischen makroskopischen und mikroskopischen Kenngrößen des Verkehrsgeschehens.

Nachstehend sind noch einige Kenngrößen und deren Abkürzungen erläutert, die im Rahmen dieser Arbeit vor allem im Zusammenhang mit der Beschreibung des Verkehrsablaufs an vorfahrtgeregelten Kreuzungen benutzt werden:

t_p = potentielle Zeit; diejenige Zeit, die ein betrachtetes Fahrzeug unter Beibehaltung des momentanen kinematischen Zustandes benötigt, um von einem Ort A zum Kollisionsbereich KB zu gelangen.

t_H = Zeitlücke im Hauptstrom.

t_N = Zeitlücke im Nebenstrom.

XUS = Sichtpunkt; Standort des Nichtbevorrechtigten, von dem aus er mindestens soviel Sicht in den Hauptstrom hat, daß er sich bezüglich eines bevorrechtigten Fahrzeugs das erste Mal zum Kreuzen entscheiden kann.

XUB = Bremspunkt; Position der Fahrzeuge auf der nicht bevorrechtigten Straße, von dem ab verzögert wird.

AFHZ = Anzahl der Fahrzeuge, die im Sichtbereich (100 bis 150 m) auf der bevorrechtigten Straße fahren.

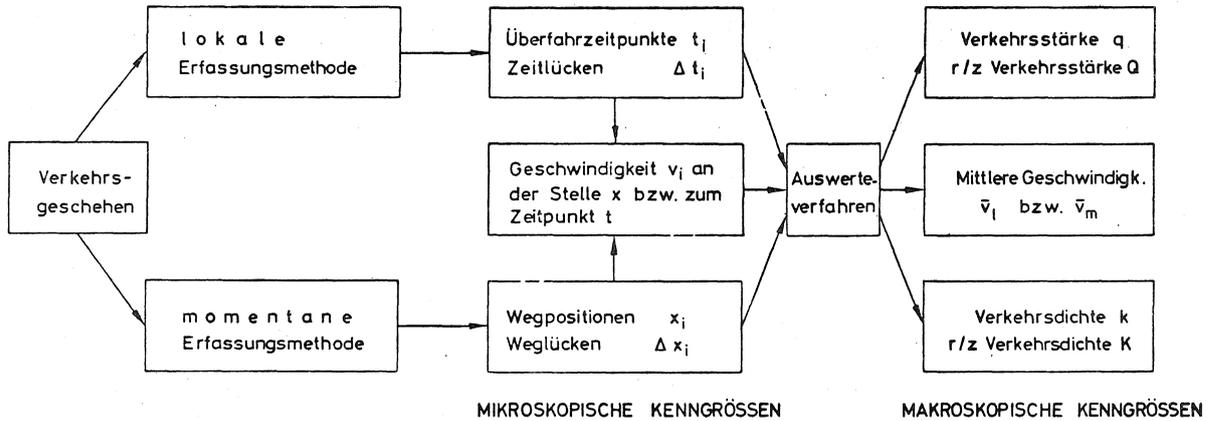


Abb. 3-3: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsablaufs

3.3 Modell der potentiellen Zeiten

Zum ersten Mal haben GREENSHIELDS, SCHAPIRO und ERICKSEN im Zusammenhang mit dem Verkehrsablauf an Straßenverkehrsknoten den Begriff der "potentiellen Zeit" geprägt. Er war definiert als der Quotient aus der momentanen Geschwindigkeit v und der momentanen Entfernung x eines Fahrzeugs vom Kollisionsbereich KB:

$$t_p = \frac{x}{v} .$$

t_p ist demnach die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um mit konstanter Geschwindigkeit v die Strecke x bis zum Kollisionsbereich zurückzulegen. RETZKO hat den oben definierten Begriff der potentiellen Zeit erweitert, und zwar speziell für den Nichtbevorrechtigten mit der Annahme, daß dieser beschleunigen kann. Ebenso hat RETZKO die Länge und Breite des Kollisionsbereichs bei der Berechnung der potentiellen Zeit mit berücksichtigt. Eine weitere Verfeinerung des Modells der potentiellen Zeiten erfolgte durch ERNST.

Potentielle Zeit des Bevorrechtigten an einer Kreuzung

Die potentielle Zeit des Bevorrechtigten t_{pB} an einer Kreuzung wird in dieser Arbeit entsprechend der Definition von RETZKO aufgefaßt als der Zeitbedarf des Bevorrechtigten, den er benötigt, um bei konstanter Geschwindigkeit v_B vom Kollisionsbereich diesen mit der Vorderkante seines Fahrzeugs zu überfahren:

$$t_{pB} = \frac{x_B(t)}{v_B} .$$

Potentielle Zeit des Nichtbevorrechtigten an einer Kreuzung

Bei der Berechnung der potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten unter Berücksichtigung von Übertragungszeiten von Informationen im Menschen und Reaktionszeiten des Menschen auf Informationen ist bei der Analyse des Kreuzungsvorgangs eine weitere Verfeinerung des Modells notwendig. Man gelangt dabei zur Definition zweier potentieller Zeiten:

- objektive potentielle Zeit t_{pNo}
- subjektive potentielle Zeit t_{pNs}

Dabei wird die objektive potentielle Zeit t_{pNo} entsprechend der Definition von RETZKO als der Zeitbedarf des Nichtbevorrechtigten aufgefaßt, den er aufgrund der kinematischen und geometrischen Gegebenheiten des Fahrzeugs vom Zeitpunkt der Entscheidung (Entscheidungspunkt) gegenüber dem bevorrechtigten Fahrzeug benötigt, um mit der Hinterkante seines Fahrzeugs die jenseitige Begrenzung des Kollisionsbereichs zu überfahren:

$$t_{pNo} = \frac{x_N(b, t)}{v_N(b, t)}$$

Die subjektive potentielle Zeit t_{pNs} beinhaltet gegenüber t_{pNo} zusätzlich den Zeitverlust, der einerseits durch die Totzeit τ_t (0,1 ÷ 0,35 s), verursacht durch die Ansprechzeit des entsprechenden Sinnesorgans, durch Signalleitung und Informationsverarbeitung, und andererseits durch die neuromuskuläre Verzögerung τ_N (0,1 ÷ 0,75 s), bedingt durch die Laufzeit in motorischen Nerven- und Muskelaktivierungen, verursacht wird (KELLEY):

$$t_{pNs} \approx t_{pNo} + (0,2 \div 1,1 \text{ s})$$

Der Vergleich der subjektiven potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten mit der potentiellen Zeit des Bevorrechtigten oder einer Zeitlücke im Hauptstrom kann als Entscheidungskriterium zum Kreuzen herangezogen werden.

Die aus dem Vergleich der potentiellen Zeiten resultierende Größe ist nach RETZKO die potentielle Zeitdifferenz Δt_p :

$$\Delta t_p = t_{pB} - t_{pNs}$$

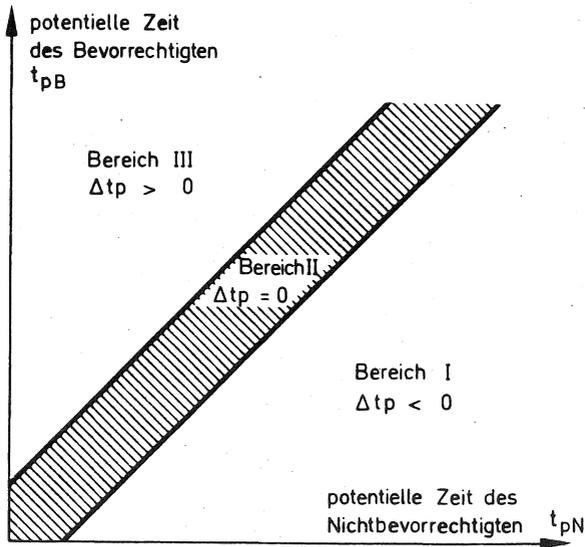


Abb. 3-4: Mögliche Konstellationen potentieller Zeiten in der Verkehrssituation "KREUZEN"

Dabei können die Δt_p - Werte drei Bereichen zugeordnet werden (Abb. 3-4):

Bereich I: $\Delta t_p < 0$ (negative potentielle Zeitdifferenz) entspricht einem potentiellen Zeitnachteil des nicht bevorrechtigten Fahrzeugs von der Art, daß die potentielle Zeit des Bevorrechtigten zu kurz ist, um für die Entscheidung des Nichtbevorrechtigten relevant zu sein.

Bereich II: $\Delta t_p = 0$ (keine potentielle Zeitdifferenz) entspricht der Situation, daß Nichtbevorrechtigter und Bevorrechtigter auf Kollisionskurs fahren.

Bereich III: $\Delta t_p > 0$ (positive potentielle Zeitdifferenz) entspricht einem potentiellen Zeitvorteil des nichtbevorrechtigten Fahrzeugs von der Art, daß die potentielle Zeit des Bevorrechtigten so groß ist, daß der Nichtbevorrechtigte ohne Schwierigkeiten Kreuzen kann.

Auf der Basis dieser Betrachtungsweise wird im Simulationsmodell "KREUZEN" (Kap. 4) die Entscheidung zum Kreuzen der bevorrechtigten Straße getroffen.

Die angebotenen Zeitlücken im bevorrechtigten Fahrzeugstrom und die potentiellen Zeiten bevorrechtigter Fahrer sind zwei unterschiedlich definierte Größen. Sie werden in dieser Arbeit jedoch bei der Diskussion und Darstellung der Ergebnisse im Hinblick auf die Korrelation der Beobachtungszeit mit zeitbezogenen Kenngrößen des Verkehrsablaufs zusammengefaßt, da im Grenzfall angebotene Zeitlücken im Hauptstrom potentiellen Zeit-Charakter haben können.

3.4 Blickwinkelgeschwindigkeiten bei der Wahrnehmung von Bewegungen der Fahrzeuge im Kreuzungsbereich

Die Wahrnehmung der Bewegungen von Fahrzeugen erfolgt im wesentlichen nach zwei Mechanismen:

Der eine Mechanismus beruht auf der Wahrnehmung der Bewegung aufgrund des Eindrucks von der Größenänderung des betrachteten Fahrzeugs, während der andere Mechanismus auf die Wahrnehmung der Bewegung aufgrund des Eindrucks von der Standortänderung des betrachteten Fahrzeugs zurückzuführen ist.

Im ersten Fall ist eine mögliche Maßzahl für die Wahrnehmung der Bewegung die Geschwindigkeit mit der sich der Winkel ändert, unter dem der Beobachter die Außenkanten des sich bewegenden Objekts sieht. Vereinfachend gilt für die horizontale Komponente der Objektfläche für die o.g. Winkelgeschwindigkeit des Winkels α (Abb. 3-5a):

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{c \cdot \Delta v}{\Delta x^2}$$

mit

- c = Breite des betrachteten Objekts,
- Δv = Relativgeschwindigkeit zwischen Betrachter und Objekt,
- Δx = Abstand des Auges vom betrachteten Objekt.

Nach MICHAELS liegen die Schwellenwerte für diesen Wahrnehmungsmechanismus bei $(3 \div 10) \cdot 10^{-4}$ rad/s.

Im zweiten Fall der Wahrnehmung der Bewegung aufgrund der Standortänderung des betrachteten Objekts ist eine mögliche Maßzahl die Winkelgeschwindigkeit des Winkels, unter dem in Abweichung von der zentralen Sehrichtung nach vorn der Beobachter das sich bewegende Objekt sieht.

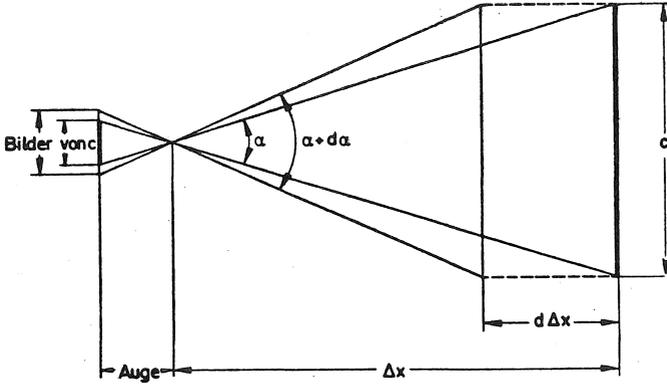


Abb. 3-5a: Wahrnehmung der Bewegung aufgrund der Größenänderung des betrachteten Objekts

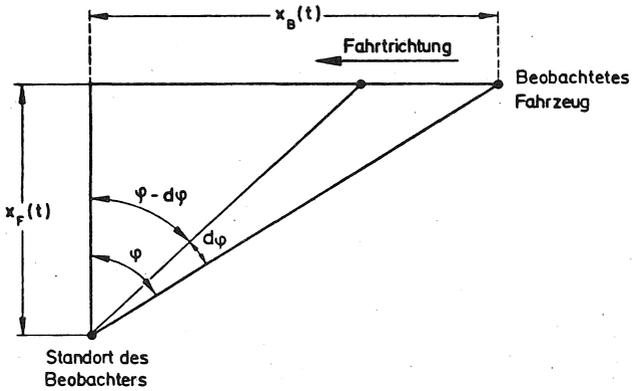


Abb. 3-5b: Wahrnehmung der Bewegung aufgrund der Standortänderung des betrachteten Objekts

Wählt man z.B. an einem vorfahrtgeregelten Straßenverkehrsknoten den Kollisionsbereich als gemeinsamen Bezugspunkt (Koordinatenursprung) für die Bewegungslinien der nicht bevorrechtigten und bevorrechtigten Fahrzeuge und bezeichnet man mit $x_B = x_B(t)$ den momentanen Abstand des Bevorrechtigten und mit $x_F = x_F(t)$ den momentanen Abstand des Nichtbevorrechtigten vom Kollisionsbereich, so gilt für den Winkel, unter dem der Nichtbevorrechtigte den Bevorrechtigten sieht (Abb. 3-5):

$$\operatorname{tg} \varphi(t) = \frac{x_B(t)}{x_F(t)} \quad (3.3)$$

Nach Differenzieren von Gleichung 3.3 erhält man für die erste und zweite Ableitung die folgenden Beziehungen für die Blickwinkelgeschwindigkeit (Gleichung 3.4) und die Blickwinkelgeschwindigkeitsänderung (Gleichung 3.5):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_B x_F - v_F x_B}{x_F^2 + x_B^2} \quad (3.4)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{x_F^2(b_B x_F - b_F x_B - 2v_F v_B) + x_B^2(b_B x_F - b_F x_B + 2v_F v_B) - 2x_F x_B (v_B^2 - v_F^2)}{(x_F^2 + x_B^2)^2} \quad (3.5)$$

mit

$x_B = x_B(t)$ = momentaner Abstand des Bevorrechtigten vom Kollisionsbereich,

$x_F = x_F(t)$ = momentaner Abstand des Nichtbevorrechtigten vom Kollisionsbereich,

$v_B = v_B(t)$ = momentane Geschwindigkeit des Bevorrechtigten,

$v_F = v_F(t)$ = momentane Geschwindigkeit des
Nichtbevorrechtigten,

$b_B = b_B(t)$ = momentane Beschleunigung des Be-
vorrechtigten

$b_F = b_F(t)$ = momentane Beschleunigung des
Nichtbevorrechtigten.

In Abb. 3-6 ist der Verlauf von $\frac{d\alpha}{dt}$ und von $\frac{d\varphi}{dt}$ nach beiden
Wahrnehmungsmechanismus bei Stillstand des Nichtbevorrecht-
tigten aufgetragen. Ein Vergleich der Kurven zeigt, daß
bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit im Hauptstrom von

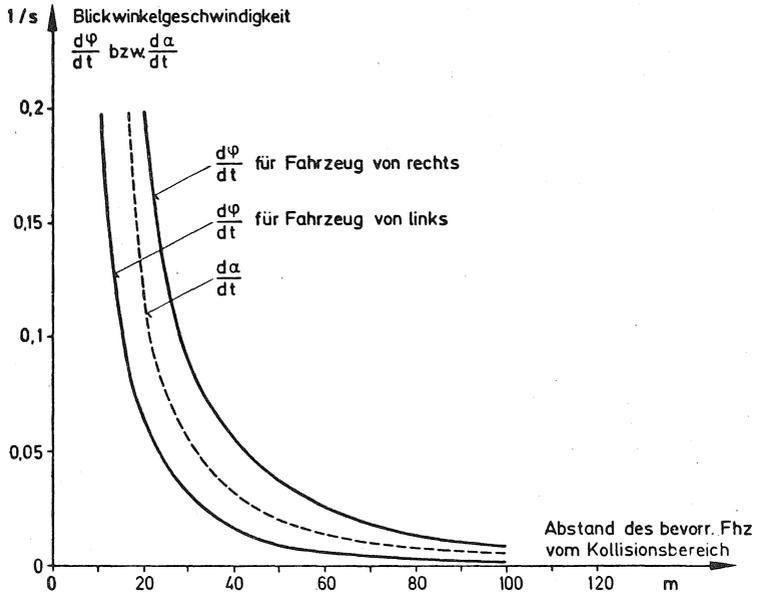


Abb. 3-6: Blickwinkelgeschwindigkeiten $\frac{d\varphi}{dt}$ und $\frac{d\alpha}{dt}$ in Abhängigkeit vom Abstand des
bevorrechtigten Fhz mit der Geschwin-
digkeit von 13 m/s.

$v_B = 13 \text{ m/s}$ für ein im unmittelbaren Kreuzungsbereich stehendes nicht bevorrechtigtes Fahrzeug die Winkelgeschwindigkeit aufgrund der Standortänderung der Fahrzeuge von rechts annähernd doppelt so groß ist wie die Winkelgeschwindigkeit aufgrund des Eindrucks von der Größenänderung des betrachteten Fahrzeugs im Hauptstrom von links.

Bei der Wahrnehmung der Bewegung der Fahrzeuge vom linken Fahrstrom nach dem Wahrnehmungsmechanismus "Standortänderung" liegen die $\frac{d\varphi}{dt}$ - Werte unterhalb der $\frac{d\alpha}{dt}$ - Werte, so daß hier sicher bei der Abschätzung der Bewegung eines bevorrechtigten Fahrzeugs im wesentlichen der Wahrnehmungsmechanismus "Größenänderung" zum Tragen kommt.

Die dargestellten Überlegungen zeigen, daß an Kreuzungen die Wahrnehmung der Bewegung der Fahrzeuge von rechts früher "überschwellig" wird als die Wahrnehmung der Bewegung der Fahrzeuge von links.

Kritische Blickwinkelgeschwindigkeitswerte

Für den Menschen ergeben sich besonders dann Probleme bei der Wahrnehmung der Bewegung aufgrund der Standortänderung des betrachteten Objekts, wenn die Blickwinkelgeschwindigkeit $\frac{d\varphi}{dt}$ identisch null oder konstant ist.

Mathematisch formuliert heißt das:

$$\frac{d\varphi}{dt} \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.7)$$

Soll Gleichung 3.4 die Bedingung $\frac{d\psi}{dt} \stackrel{!}{=} 0$ erfüllen, folgt:

$$v_B x_F - v_F x_B = 0 \quad \text{oder}$$

$$\frac{x_F}{x_B} = \frac{v_F}{v_B} . \quad (3.8)$$

Die Blickwinkelgeschwindigkeit ist also dann null, wenn das Verhältnis der momentanen Abstände gleich dem Verhältnis der momentanen Geschwindigkeit ist.

Um die Bedingung $\frac{d^2\psi}{dt^2} \stackrel{!}{=} 0$ zu erfüllen, muß bei Gleichung 3.5 der Zähler den Wert null haben, ohne daß zugleich der Nenner null wird. Dies kann nur dann sinnvoll erfüllt sein, wenn jeweils der zweite multiplikative Faktor jedes Summanden im Zähler des Bruches null wird. Für $x_B \neq 0$ und $x_F \neq 0$ gilt dann:

$$b_B x_F - b_F x_B - 2v_F v_B = 0 , \quad (3.9)$$

$$b_B x_F - b_F x_B + 2v_F v_B = 0 , \quad (3.10)$$

$$v_B^2 - v_F^2 = 0 . \quad (3.11)$$

Daraus folgt nach Addition von 3.9 und 3.10:

$$\frac{x_F}{x_B} = \frac{b_F}{b_B} , \quad (3.12)$$

$$v_B = v_F .$$

Demnach ist die Blickwinkelgeschwindigkeit dann konstant, wenn bei gleicher Geschwindigkeit der Fahrzeuge das Verhältnis der momentanen Abstände bei verzögerter Annäherung des Bevorrechtigten (z.B. Rechtsabbieger) und des Nichtbevorrechtigten an der Kreuzung gleich dem Verhältnis der momentanen Verzögerungswerte ist.

Eine Kombination aus der Gleichung 3.8 und 3.12 liefern die Beziehungen:

$$v_F = \frac{x_F}{x_B} \cdot v_B \quad \text{mit} \quad \frac{d\varphi}{dt} = 0, \quad (3.13)$$

$$v_F = \frac{b_F}{b_B} \cdot v_B \quad \text{mit} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0. \quad (3.14)$$

Mit der Annahme, daß beispielsweise x_F die Koordinate des Sichtpunktes (10 bis 20 m vor Beginn des Kollisionsbereichs) und x_B die Sichtweite des nicht bevorrechtigten Fahrers in der bevorrechtigten Straße (≤ 150 m) repräsentieren, kann für Gleichung 3.13 ein Bereich angegeben werden, in dem die entsprechenden Verhältnisse der Wegstrecken auf der nicht bevorrechtigten und bevorrechtigten Straße Blickwinkelgeschwindigkeitswerte liefern, die gleich null sind (Abb. 3-7). Mit der weiteren zusätzlichen Annahme, daß die b_B -Werte zwischen 0,5 und 5,0 m/s^2 und die b_F -Werte zwischen 0,5 und 3,0 m/s^2 variieren, kann für Gleichung 3.14 ebenfalls ein Bereich angegeben werden, in dem die Blickwinkelgeschwindigkeit konstant ist (Abb. 3-7).

Eine Kombination dieser zwei Bereiche gibt an, für welche Geschwindigkeitskonstellationen auf der Haupt- und Nebenrichtung bei den gegebenen geometrischen und kinematischen Verhältnissen am Verkehrsknoten die für die Feststellung der Bewegung kritischen Blickwinkelgeschwindigkeitswerte $\frac{d\varphi}{dt} = 0$ und $\frac{d\varphi}{dt} = \text{const.}$ auftreten.

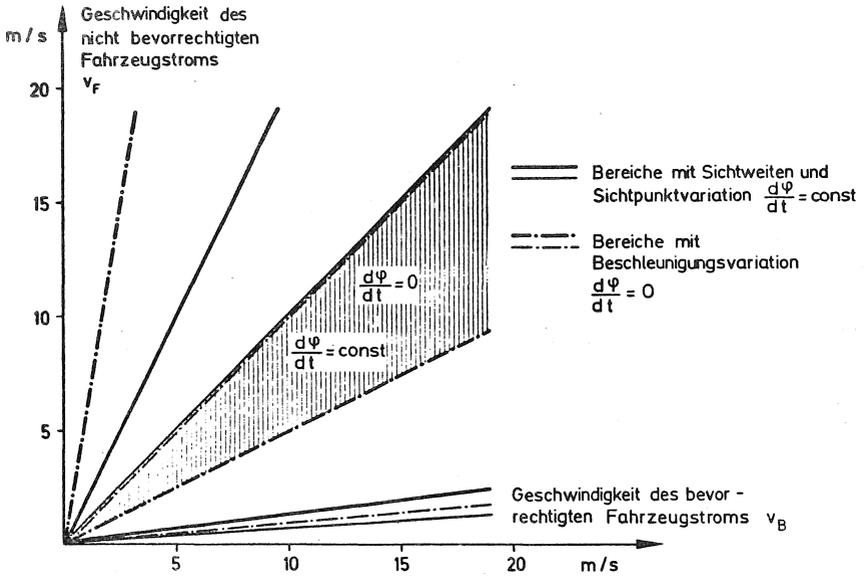


Abb. 3-7: Kritische Blickwinkelgeschwindigkeitswerte an Kreuzungen

Beispielsweise liefert eine Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugstroms von 15 m/s kritische Blickwinkelgeschwindigkeitswerte besonders bei Geschwindigkeiten des nicht bevorrechtigten Fahrzeugstroms zwischen 7,5 m/s und 15 m/s.

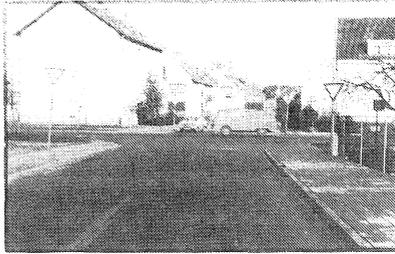
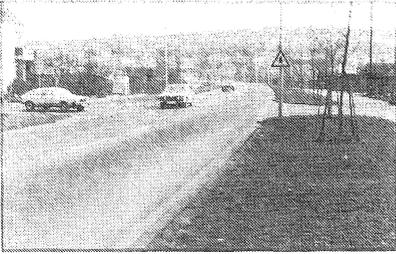
3.5 Empirische Untersuchungen an vorfahrtgeregelten innerstädtischen Straßenkreuzungen

3.5.1 Auswahl der Kreuzungen

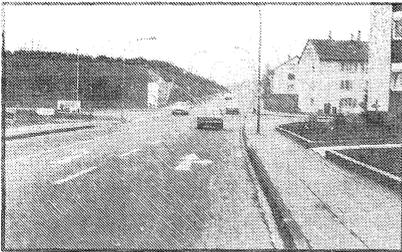
Für die Durchführung empirischer Untersuchungen ist es in Hinblick auf die Themenstellung notwendig, vorfahrtgeregelte Kreuzungen unterschiedlicher Sichtqualität und Befahrbarkeit auszuwählen. Im wesentlichen wird zwischen zwei Arten von Kreuzungen unterschieden. Bei der einen soll die Sicht in die bevorrechtigte Straße soweit hineinreichen, daß im allgemeinen, sofern es die Verkehrslage zuläßt, ein Kreuzen ohne vorheriges Halten möglich ist. Im zweiten Fall soll die Sichtweite so gering sein, daß der nicht bevorrechtigte Fahrer im allgemeinen vor dem Kollisionsbereich aufgrund der baulichen Gegebenheiten zum Halten gezwungen wird.

Für die empirischen Untersuchungen wurden vier Kreuzungen ausgewählt (Abb. 3-8). Die Klassifizierung bezüglich der Sichtverhältnisse und der Befahrbarkeit dieser Straßenverkehrsknoten kann wie folgt vorgenommen werden:

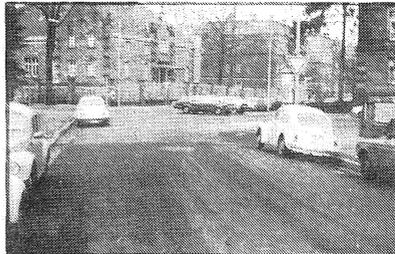
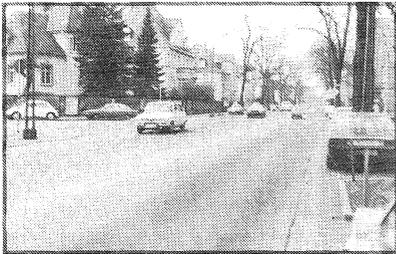
Kreuzungsbezeichnung	Sichtweite bei ca. 5 m Abstand vom Kollisionsbereich	Befahrbarkeit
KR1	ca. 200 m	sicheres Kreuzen in der Regel ohne Halten möglich
KR2	ca. 100-150 m	
KR3	ca. 80 m	sicheres Kreuzen nur mit Halten möglich
KR4	ca. 50 m	



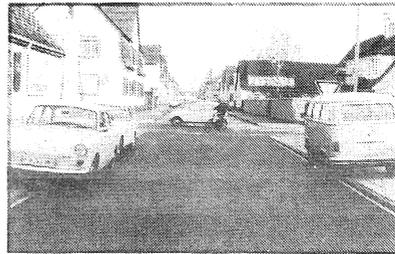
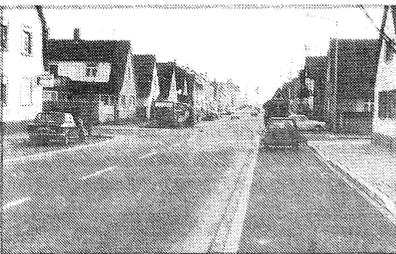
Kreuzung KR1 (Baseler Torstr./Rommelstr. Durlach)



Kreuzung KR2 (Röderweg/Richard-Wagner-Ring, Rastatt)



Kreuzung KR3 (Freydorfstr./Moltkestr., Karlsruhe)



Kreuzung KR4 (Wilhelmstr./Bahnhofstr., Neureut)

Abb. 3-8: Für die empirischen Untersuchungen gewählte innerstädtische Kreuzungen

3.5.2 Meßanordnung - Meßdurchführung

Die Messungen bestanden aus einer Reihe von Versuchsfahrten mit einem Meßfahrzeug (VW Passat). Zur Erfassung der verkehrstechnischen Daten stand das Bandaufzeichnungsgerät VDM 250 WEISS PRODATA zur Verfügung, das über Induktionsschleifen als Geber die entsprechenden Überfahrzeitpunkte der Fahrzeuge an den einzelnen Meßquerschnitten aufzeichnete.

a) Messungen mit Hilfe des Meßfahrzeugs VW-Passat

Das von jeweils einer Versuchsperson (VP) gefahrene Meßfahrzeug befand sich auf der nicht bevorrechtigten Straße der Kreuzung. Die Versuchsperson hatte vor den eigentlichen Testfahrten die Gelegenheit, auf einem Rundkurs sich an das Versuchsfahrzeug zu gewöhnen. Danach wurde ihr die Aufgabe gestellt, eine bevorrechtigte Straße zu überqueren. Bei jeder durchzuführenden Testfahrt (Annäherungsvorgang 200 m und anschließendes Kreuzen) wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Messungen im Fahrzeug (Abb. 3-9 a)

Messung der Eigengeschwindigkeit zur Ermittlung des Verzögerungsverhaltens (auch Verzögerungskorrekturen) im Annäherungsbereich einer Kreuzung; Erfassung der zeitlichen Aufeinanderfolge der Aktivitäten des Fahrers im Fahrzeug (Betätigung des Schalthebels, der Bremse und des Gaspedals).

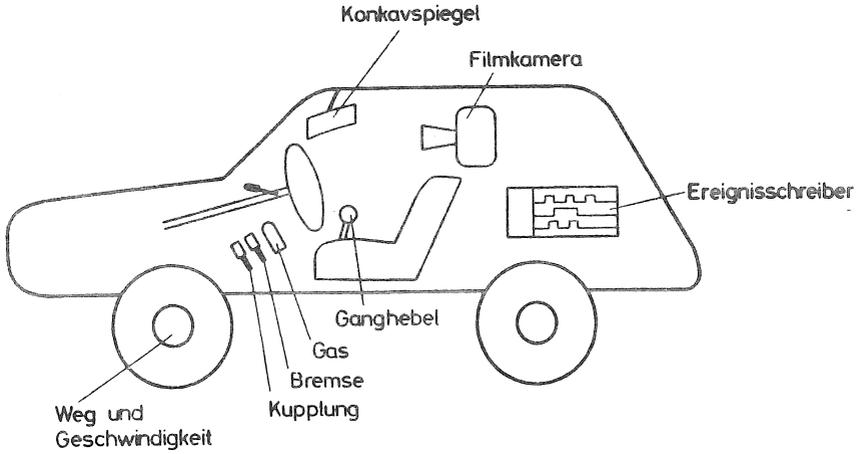


Abb. 3-9a: Ausrüstung des Versuchswagens VW-Passat



Abb. 3-9b: Einzelbild zur Registrierung des Beobachtungsverhaltens

- Beobachtung der Versuchsperson und Messung aus dem Fahrzeug:

Erfassung des Beobachtungsverhaltens der jeweiligen Versuchsperson bei unterschiedlichen Sichtverhältnissen und unterschiedlichen Verkehrsbelastungen auf der Hauptstraße mit Hilfe einer Super 8 Kamera (Modell NIZO S 800) (Abb. 3-9 b).

- b) Erfassung der Daten zur Ermittlung der verkehrstechnischen Kenngrößen im Hauptstrom

Die Induktionsschleifen wurden an den ausgewählten Kreuzungen so angeordnet (Abb. 3-10), daß der Bewegungsablauf auf der Hauptstraße von links und von rechts in zeitlichem Bezug zur Bewegung des Meßfahr-

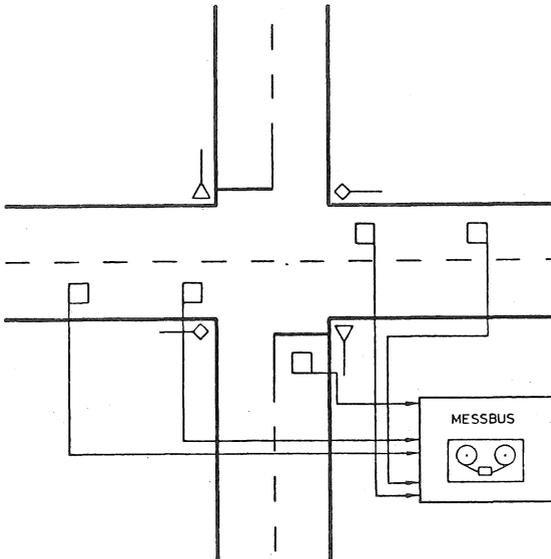


Abb. 3-10: Messanordnung für den Einsatz von Induktionsschleifen an Kreuzungen

zeugs VW-Passat erfaßt werden konnte. Diese Meßmethode diente der objektiven Aufzeichnung des Verkehrsgeschehens, auf Grund dessen die jeweilige Versuchsperson die Entscheidung für das momentane Fahrverhalten bis zum eigentlichen Kreuzungsvorgang traf.

Die Gewährleistung der zeitsynchronen Datenaufnahme der beiden Meßsysteme wurde durch mehrere Tests sichergestellt.

Die Messungen erfolgten an den in Kap. 3.5.1 beschriebenen Kreuzungen. Für die Versuchsfahrten standen 4 männliche VP zwischen 24 und 29 Jahren mit jeweils mindestens 5-jähriger Fahrpraxis zur Verfügung. An einem Versuchstag wurde nur an einer Kreuzung gemessen. Die Anzahl der Fahrten pro VP lag bei 40 bis 60 Fahrten pro Versuchstag.

3.5.3 Aufbereitung und Auswertung der Meßdaten - Ergebnisse

Die Aufbereitung und Auswertung der Meßdaten erfolgte im wesentlichen unter den beiden Gesichtspunkten

- F A H R E R,
- U M W E L T.

Zum ersten Problemkreis FAHRER wurden Aussagen erwartet, die Auskunft darüber geben, inwieweit der Mensch durch die zu einem sicheren Fahren notwendigen Tätigkeiten beansprucht wird und wo bei einer eventuellen Überlastung der Fahrer entlastet werden kann.

Des weiteren sollte untersucht werden, welche Wechselwirkung zwischen den Systemen FAHRER und UMWELT besteht. Speziell sollte darauf eingegangen werden, in welchem Maß die Umwelt, repräsentiert durch das Verkehrsgeschehen, die Informationsaufnahme des Fahrers über den visuellen Kanal beeinflusst.

Ein weiteres Ziel der empirischen Untersuchungen war, aus den gewonnenen Ergebnissen Eichkurven für das Verhalten nicht bevorrechtigter Fahrer an Kreuzungen in der Form zu ermitteln, die es ermöglicht, sie in das Simulationsmodell "KREUZEN" einzubringen.

3.5.3.1 Analyse der Tätigkeiten

Für die Durchführung einer Tätigkeitsanalyse unter dem Aspekt "Sicheres Fahren" wurden nur die Tätigkeiten des Fahrers aufgezeichnet, die zur Bewältigung der Verkehrssituation "Kreuzen einer bevorrechtigten Straße" wichtig erschienen, und zwar Schalten, Kuppeln, Bremsen, Gasgeben und Beobachten des Hauptstroms.

Bei der Erstellung des Tätigkeitsprofils über den gesamten Fahrweg wurde folgendermaßen verfahren:

Der Annäherungsbereich (ca. 80m) und der unmittelbar an den Haltepunkt anschließende Fahrbereich (engerer Kreuzungsbereich, Bereich nach der Kreuzung) von ca. 20 m wurde in 5 m-Intervalle unterteilt. Jedes dieser Intervalle wurde hinsichtlich der in diesem Intervall auftretenden Tätigkeiten untersucht. Da sich die Tätigkeitsprofile für die vier Kreuzungen im wesentlichen quantitativ entsprechen, ist die Häufigkeit der Tätigkeiten über der gesamten Untersuchungsstrecke von 100 m (Annäherungsbereich, Kreuzung, Bereich nach der Kreuzung) stellvertretend für alle Kreuzungen am Beispiel der Kreuzung KR4 dargestellt.

Die Analyse der Einzeltätigkeiten über dem Weg (Abb. 3-11) ergab folgenden Sachverhalt:

Tätigkeit Bremspedal: Die Versuchspersonen begannen den Bremsvorgang (Aufleuchten der Bremslichter) im allgemeinen bei einem Abstand von ca. 50 - 60 m von der Kreuzung. Die Betätigung des BREMSPEDALS in diesem Bereich deutet darauf hin, daß der Fahrer von da ab beginnt, sich auf den Kreuzungsvorgang vorzubereiten. Der Anstieg der Häufigkeitswerte der Aktivität mit abnehmenden Abstand zur Kreuzung läßt ebenfalls die immer größere werdende Relevanz der Entscheidung zum Kreuzen erkennen. In einer Entfernung von ca. 20 m bis 30 m zum Kollisionsbereich sind die auf die Kinematik des Fahrzeugs einwirkenden Tätigkeiten fast ausschließlich durch die Aktivität Bremsen abgedeckt.

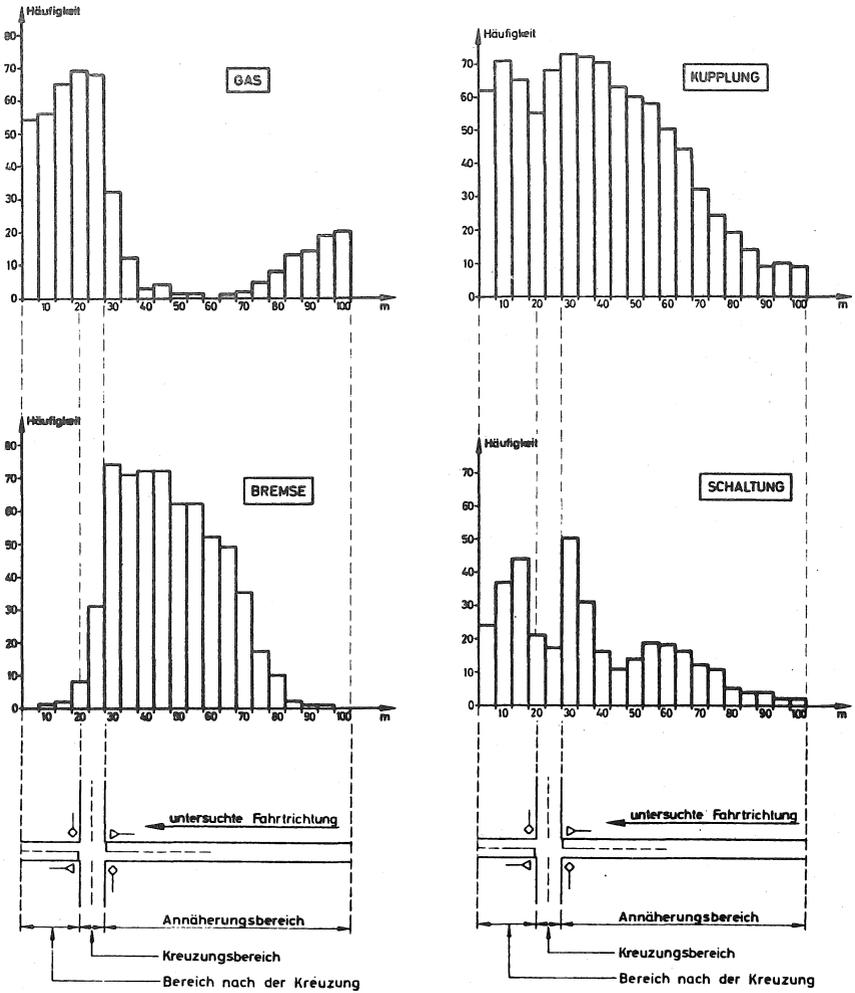


Abb. 3-11: Häufigkeitsverteilung der Einzeltätigkeiten beim Kreuzen (70 Fahrten)

Tätigkeit Gaspedal: Die zweite, die Kinematik des Fahrzeugs beeinflussende Aktivität, die Betätigung des GASPEDALS, stellt den Komplementärvorgang zum Bremsen dar. Die Aktivität Gaspedal nimmt mit abnehmendem Abstand zur Kreuzung ab und steigt annähernd sprunghaft beim Befahren des Kollisionsbereichs an.

Tätigkeit Kupplungspedal: Aus der Analyse der Tätigkeit Kupplung wird die Doppelfunktion dieser Tätigkeit deutlich. Zum einen hat das Kuppeln die Aufgabe zu ermöglichen, von einem Gang in den anderen zu schalten, zum anderen wird durch das Betätigen des Kupplungspedals die Bereitschaft des Fahrers zum Halten angezeigt. Die Häufigkeitswerte der Aktivität KUPPLUNGSPEDAL sind deshalb hauptsächlich in drei Bereichen vertreten. Im ersten Bereich (etwa 30 bis 40 m Abstand zum Kollisionsbereich) zeigt die Betätigung der Kupplung den Schaltvorgang an. Im zweiten Bereich (unmittelbarer Kreuzungsbereich) repräsentieren die Häufigkeitswerte die Bereitschaft zum Halten und das Einlegen des ersten Ganges. Auf der restlichen Strecke hat das Kuppeln ausschließlich die Funktion, das Anfahren bzw. Schalten zu ermöglichen.

Tätigkeit Schaltung: Die Häufigkeitsverteilung der Tätigkeit SCHALTUNG zeigt die Bereiche, in denen das Schalten besonders ausgeprägt ist. Der erste Bereich hat einen Abstand von 30 bis 40 m zur Kreuzung. Hier wird im wesentlichen vom dritten in den zweiten Gang geschaltet. Der zweite Bereich liegt im unmittelbaren Kreuzungsbereich. Hier wird der erste Gang eingelegt, und der Fahrer bereitet sich auf den eigentlichen Kreuzungsvorgang vor. Der dritte Bereich ist gekennzeichnet durch das Überfahren der Kreuzung, und die Schalthäufigkeit repräsentiert hier den Umschaltvorgang vom ersten in den zweiten Gang.

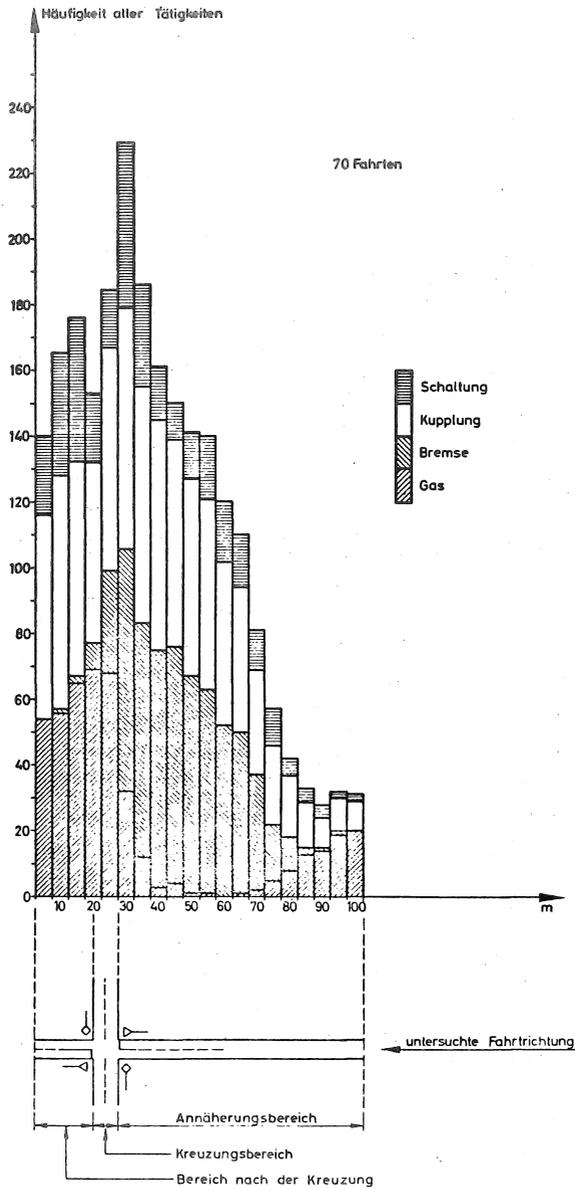


Abb. 3-12: Häufigkeitsverteilung aller Tätigkeiten beim Kreuzen (70 Fahrten)

Aus dem Übersichtsdiagramm (Abb. 3-12) der Tätigkeiten ist zu ersehen, daß mit abnehmendem Abstand von der Kreuzung die Summe der Häufigkeiten der notwendigen Einzeltätigkeiten stark zunimmt. Wenn man berücksichtigt, daß unmittelbar vor Beginn des Kollisionsbereichs zu den aufgezeigten Tätigkeiten die Beobachtung des Hauptstroms hinzukommt, stellt man fest, daß im Vergleich zur Fahrt auf der freien Strecke oder im weiteren Annäherungsbereich der Kreuzung die Häufigkeit der Tätigkeiten im unmittelbaren Kreuzungsbereich ein stark ausgeprägtes Maximum aufweist.

Die Abbildung zeigt, daß die Anzahl der Tätigkeiten, die die Kinematik des Fahrzeugs steuern, durch den Einsatz eines automatischen Getriebes bis zu ca. 50% reduziert werden können. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die einzelnen Tätigkeiten nicht unbedingt gleich stark belasten. Inwieweit der Einsatz eines automatischen Getriebes eine Verlagerung im Fahrverhalten des Fahrers ergibt, wäre noch zu klären, bevor allgemein gültige Aussagen bezüglich der Tätigkeitsreduzierung durch automatische Fahrhilfen möglich sind.

3.5.3.2 Beobachtungsverhalten des Nichtbevorrechtigten in Abhängigkeit von weg- und zeitbezogenen Kenn- größen des Straßenverkehrsablaufs

Die Analyse des Beobachtungsverhaltens der VP unmittelbar an der Kreuzung sollte die Frage beantworten, ob und ggf. inwieweit die Beobachtungsstrategie des Nichtbevorrechtigten von verkehrstechnischen Kenngrößen abhängt. Im Zusammenhang damit sollte untersucht werden, ob der Nichtbevorrechtigte an der Kreuzung seine Entscheidung zum Kreuzen vorwiegend nach wegbezogenen oder zeitbezogenen Kriterien fällt. Die Analyse des Beobachtungsverhaltens wurde daher getrennt nach Abhängigkeiten von weg- bzw. zeitabhängigen verkehrstechnischen Kenngrößen durchgeführt.

Als wegbezogene Kenngrößen sind die Verkehrsdichte, Abstände der bevorrechtigten Fahrzeuge und die Anzahl der Fahrzeuge, die sich im Bereich der Sichtweite auf der bevorrechtigten Straße befinden, zu verstehen. Die zeitbezogenen Kenngrößen des Verkehrsablaufs sind Verkehrsstärke, angebotene Zeitlücken und potentielle Zeiten im Hauptstrom und die Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge (s. Kap. 3.2).

Des weiteren sollte untersucht werden, ob und gegebenenfalls in welchem Maß die baulichen Gegebenheiten an der Kreuzung insbesondere die dadurch bedingte Sichtweite, einen Einfluß auf das Beobachtungsverhalten haben.

Da es sich als unmöglich erwies, unter Beachtung der notwendigen Sicherheitsmaßnahmen bei Versuchsfahrten dieser Art das Blickverhalten mit Hilfe eines NAC-Eyemark-Recorders (Abb. 3-13) zu erfassen, wie es z.B. DILLING benutzt hat, und außerdem die Kopfbewegung eine Dejustierung des NAC-Gerätes verursacht, wurde zur Analyse der Beobachtungsstrategie ausschließlich die Kopfbewegung der VP hinzugezogen. In Untersuchungen von ROBINSON (1971) wird außerdem darauf hingewiesen, daß es bei ähnlichen Fragestellungen, wie der hier vorliegenden, genügt, allein die Kopfbewegung zu erfassen, um Aussagen zum Beobachtungsverhalten machen zu können.

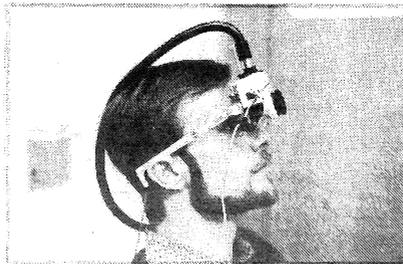


Abb. 3-13: Versuchsaufbau zur Registrierung des Blickverhaltens (NAC-Eyemark-Recorder)

Somit ist unter einer Beobachtung (Einzelbeobachtung) nach links bzw. rechts die Dauer der Drehung des Kopfes nach links bzw. nach rechts zum Zwecke der Beobachtung in eine von der zentralen Sehrichtung in Fahrtrichtung um mehr als 60° abweichende Richtung zu verstehen.

Beobachtungsverhalten in Abhängigkeit von wegbezogenen Kenngrößen des Verkehrsablaufs

Zunächst sollen die Ergebnisse der Analyse des Beobachtungsverhaltens in Abhängigkeit von den wegbezogenen verkehrstechnischen Kenngrößen vorgestellt werden.

Beobachtungsverhalten - Verkehrsdichte: Um zu zeigen, inwieweit das Beobachtungsverhalten des Nichtbevorrechtigten von der Verkehrsdichte abhängt, wurde untersucht, ob zwischen der durchschnittlichen Beobachtungszeit (arithmetischer Mittelwert der Beobachtungen nach links bzw. nach rechts vor einem Kreuzungsvorgang) und der räumlich-zeitlichen Dichte im linken bzw. rechten Hauptstrom ein Zusammenhang besteht. Die Darstellungen in Abb. 3-14 zeigen die aus den Filmaufnahmen ermittelten durchschnittlichen Beobachtungszeiten nach links bzw. nach rechts über die Verkehrsdichte, stellvertretend für alle Kreuzungen am Beispiel der Kreuzung KR3 aufgetragen. Die zwei Diagramme lassen die Tendenz erkennen, daß die durchschnittliche Beobachtungszeit nach links (\overline{TBL}) und rechts (\overline{TBR}) mit zunehmender Verkehrsdichte leicht ansteigt. Da zunächst ein linearer Zusammenhang zwischen \overline{TBL} und \overline{TBR} und der Verkehrsdichte vermutet wurde, war der Ansatz, mit Hilfe der linearen Regression quantitative Zusammenhänge herzuleiten, naheliegend. Ein statistischer Test ergab jedoch, daß die erwartete Linearität nicht signifikant war. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression lag durchweg unter 0,2; ein Test auf Linearität (z.B. F-Verteilung, KREYSZIK) mußte selbst bei einem Signifikanzniveau von 0,99 abgelehnt werden.

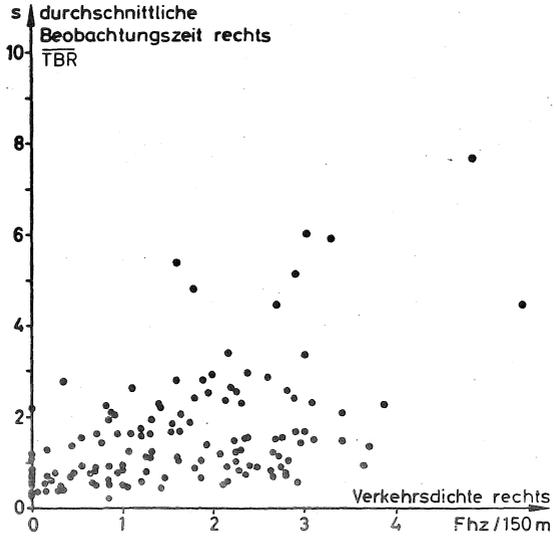
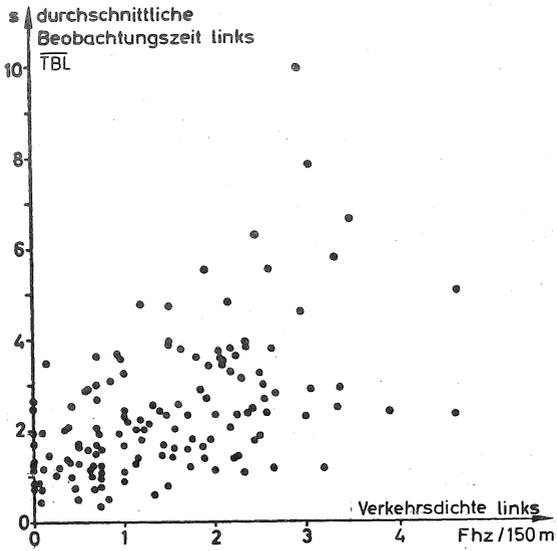


Abb. 3-14: Durchschnittliche Beobachtungszeit in Abhängigkeit von der räumlich-zeitlichen Verkehrsdichte im Hauptstrom (KR3)

Aus Abb. 3-14 ist weiterhin zu erkennen, daß die \overline{TBL} - Werte im Mittel höher liegen als die \overline{TBR} - Werte. Dieser Unterschied kann auf zwei Umstände zurückgeführt werden. Einerseits wird offenbar durch die in der Fahrschule erlernte Regel "erst links, dann rechts ..." dem Hauptstrom von links größere Bedeutung zugemessen und dadurch mehr Aufmerksamkeit gewidmet als dies beim Hauptstrom von rechts der Fall ist. Andererseits muß die Beobachtung der Fahrzeuge im linken Fahrstrom unter ungünstigeren Winkelverhältnissen erfolgen als die Beobachtung der Fahrzeuge im rechten Hauptstrom (FIND-EISEN, HÄKKINNEN), oder m.a.W., die Wahrnehmung der Bewegung der Fahrzeuge im linken Hauptstrom wird vor der Wahrnehmung der Bewegung der Fahrzeuge im rechten Hauptstrom bei gleichweiter Entfernung des Bevorrechtigten vom Kollisionsbereich (KB) überschwellig (s. Kap. 3.4).

Beobachtungsverhalten - Abstand des bevorrechtigten Fahrzeugs:

Abb. 3-15 zeigt die Dauer der Einzelbeobachtung nach links bzw. nach rechts ($\overline{TBL}/\overline{TBR}$) in Abhängigkeit vom Abstand des bevorrechtigten Fahrzeugs vom gemeinsamen Kollisionsbereich am Beispiel der Kreuzung KR3 stellvertretend für alle Kreuzungen. Hier konnte keine Korrelation zwischen dem Abstand des Bevorrechtigten und der Beobachtungszeit festgestellt werden. Der einzige aus dem Diagramm ablesbare Unterschied zwischen der Beobachtung nach links und nach rechts besteht darin, daß die \overline{TBL} -Werte im Mittel höher liegen und eine größere Streuung aufweisen als die \overline{TBR} -Werte. Auch hier ist der Hinweis auf die ungünstigeren Winkelverhältnisse bei der Beobachtung des Hauptstroms von links gegenüber der Beobachtung des Hauptstroms von rechts angebracht.

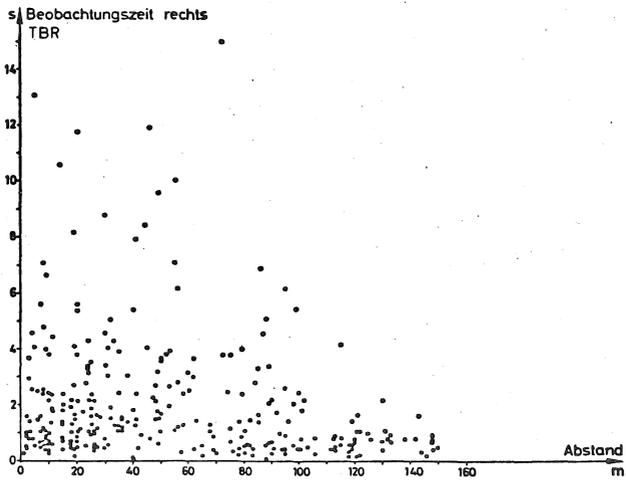
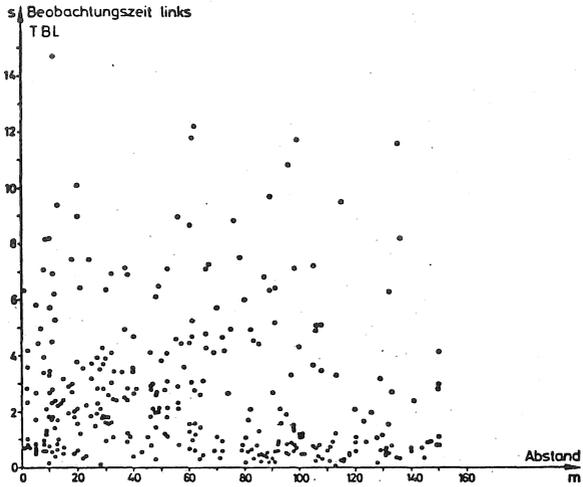


Abb. 3-15: Beobachtungszeit in Abhängigkeit vom Abstand des Bevorrechtigten vom Kollisionsbereich (KR3)

Beobachtungsverhalten - Anzahl der beobachtbaren Fahrzeuge
im Bereich der Sichtweite

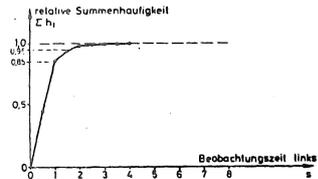
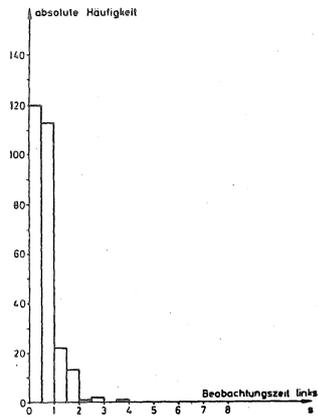
Dieser Teil der Auswertung bildet einen Schwerpunkt sowohl bezüglich der Ergebnisse zu den empirischen Untersuchungen als auch bei der quantitativen Ermittlung von Eichkurven für den Beobachtungsmechanismus im Simulationsmodell. Um den Zusammenhang zwischen der Dauer der Einzelbeobachtung und Anzahl der im Sichtbereich beobachtbaren Fahrzeuge im Hauptstrom (AFHZ) zu ermitteln, wurde zunächst eine Klasseneinteilung derart vorgenommen, daß sämtliche Beobachtungszeiten mit $AFHZ = 0$, $AFHZ = 1$, $AFHZ \geq 2$ jeweils in der entsprechenden AFHZ-Klasse zusammengefaßt wurden. Danach wurde innerhalb der AFHZ-Klassen die Beobachtungszeiten klassenweise mit einer Klassenbreite von 0,5 s sortiert. Die Abb. 3-16 a-d zeigen die absoluten Häufigkeiten der TB-Werte innerhalb der AFHZ-Klassen für die Kreuzungen KR1 und KR3.

In Abb. 3-17 sind die 85 %- und 95 % - Werte der TB-Werte mit $AFHZ = 0$, $AFHZ = 1$ und $AFHZ \geq 2$ tabellarisch für alle Kreuzungen aufgeführt.

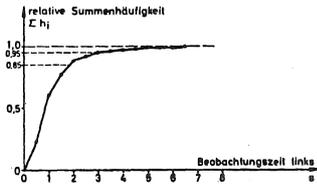
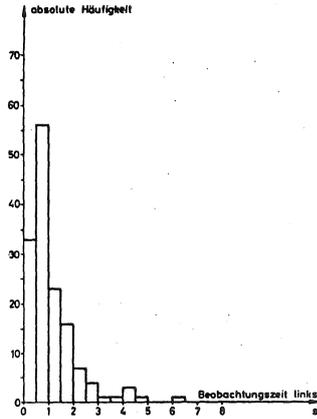
Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Bei Nullbelastung ($AFHZ=0$) im Hauptstrom schwankt der 95%-Wert der Beobachtungszeit bei den vier Kreuzungen zwischen 1,6 und 3,1 Sekunden für TBL und zwischen 1,25 und 1,9 Sekunden für TBR. Die entsprechenden 85%-Werte liegen bei TBL zwischen 1,0 und 2,8 Sekunden und bei TBR zwischen 0,85 und 1,4 Sekunden.

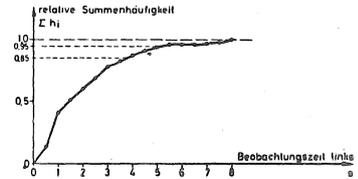
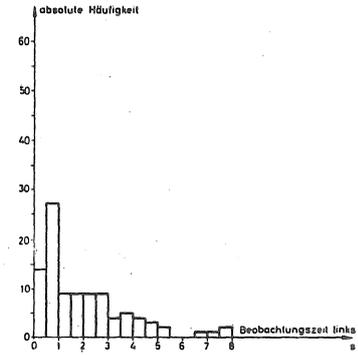
Bei einem beobachtbaren Fahrzeug im Hauptstrom ($AFHZ=1$) treten 95%-Werte auf, die für TBL zwischen 3,0 und 5,5 Sekunden und für TBR zwischen 2,3 und 4,0 Sekunden liegen. Die 85%-Werte nehmen bei TBL Werte zwischen 1,85 und 3,75 Sekunden und bei TBR Werte zwischen 1,45 und 2,9 Sekunden an.



AFHZ = 0

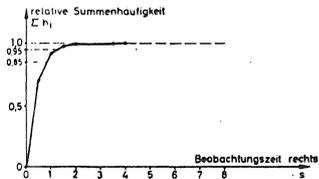
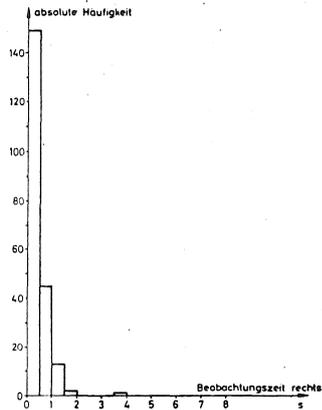


AFHZ = 1

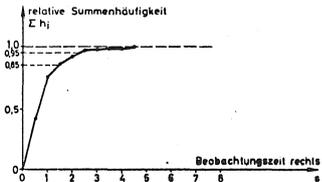
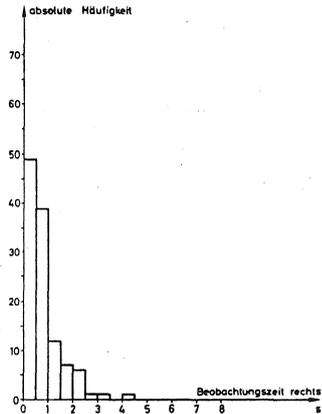


AFHZ = 2

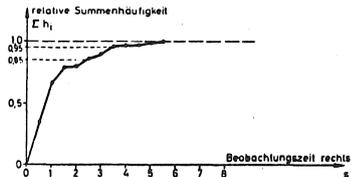
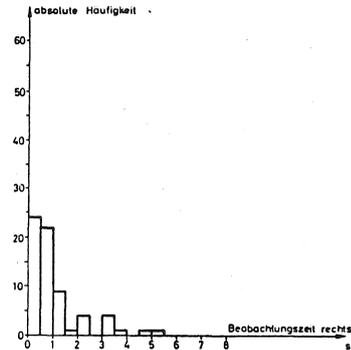
Abb. 3-16a: Empirische Verteilung der Beobachtungszeit nach links für einzelne AFHZ-Werte (Kreuzung KR1)



AFHZ = 0

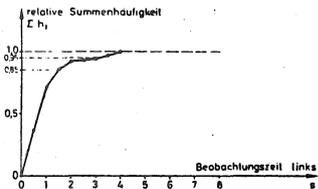
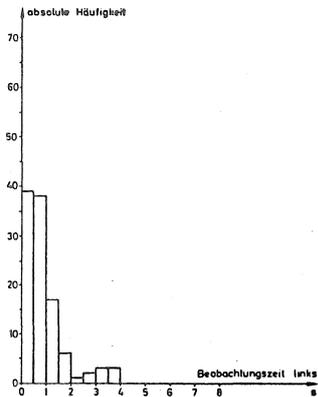


AFHZ = 1

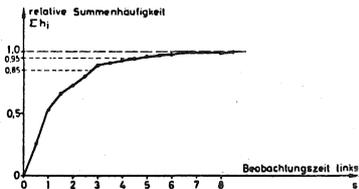
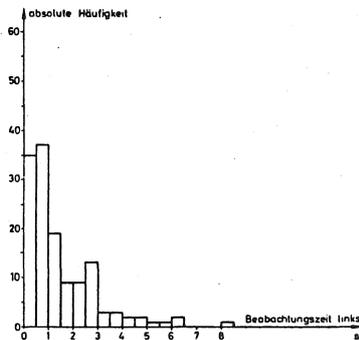


AFHZ = 2

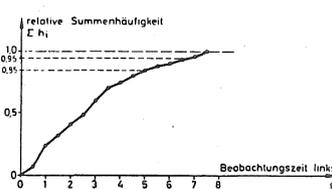
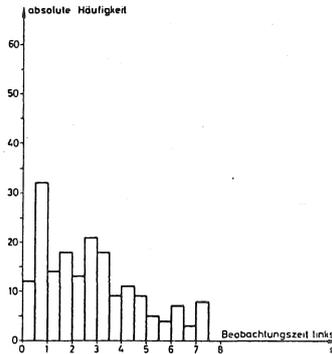
Abb. 3-16b: Empirische Verteilung der Beobachtungszeit nach rechts für einzelne AFHZ-Werte (Kreuzung KR1)



AFHZ = 0

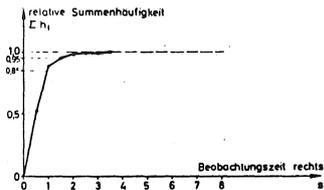
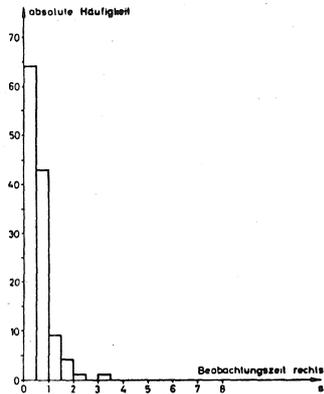


AFHZ = 1

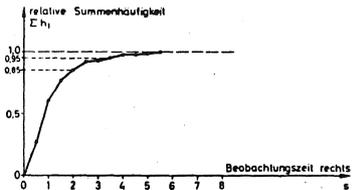
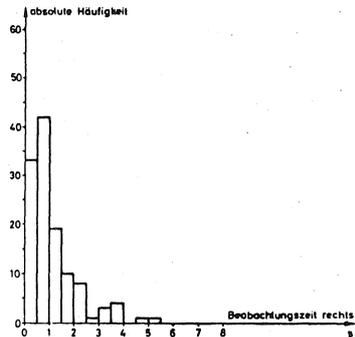


AFHZ = 2

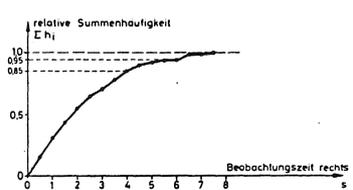
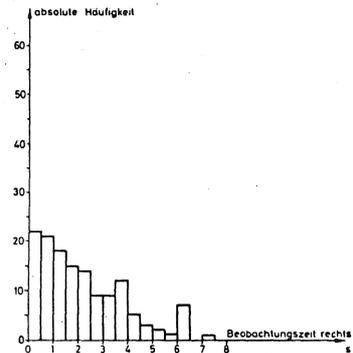
Abb. 3-16c: Empirische Verteilung der Beobachtungszeit nach links für einzelne AFHZ-Werte (Kreuzung KR3)



AFHZ = 0



AFHZ = 1



AFHZ = 2

Abb. 3-16d: Empirische Verteilung der Beobachtungszeit nach rechts für einzelne AFHZ-Werte (Kreuzung KR3)

	links		rechts		AFHZ = 0
	85 %	95 %	85 %	95 %	
KR 1	1,0	1,6	0,85	1,25	
KR 2	1,75	2,25	0,7	1,3	
KR 3	1,5	3,1	1,0	1,5	
KR 4	1,8	2,5	1,4	1,9	

	links		rechts		AFHZ = 1
	85 %	95 %	85 %	95 %	
KR 1	1,85	3,0	1,45	2,3	
KR 2	3,25	4,2	1,7	2,5	
KR 3	2,8	4,6	2,0	3,5	
KR 4	3,75	5,5	2,9	4,0	

	links		rechts		AFHZ \geq 2
	85 %	95 %	85 %	95 %	
KR 1	3,8	4,9	2,5	3,2	
KR 2	—*)	—*)	—*)	—*)	
KR 3	5,0	6,3	4,0	5,2	
KR 4	4,6	7,1	2,4	4,1	

Abb. 3-17: Tabellen der durchschnittlichen Beobachtungszeiten mit AFHZ=0, AFHZ=1 und AFHZ \geq 2
 *) = zu wenig Messwerte

Bei AFHZ \geq 2 schwanken die 95%-Werte für TBL zwischen 4,9 und 7,1 Sekunden und für TBR zwischen 3,2 und 5,2 Sekunden. Die 85%-Werte nehmen bei TBL Werte zwischen 3,8 und 5,0 Sekunden und bei TBR Werte zwischen 2,4 und 4,0 Sekunden an.

Bei Zugrundelegung des 95 % - Wertes für AFHZ = 0 ergibt eine Mittelung über die Kreuzungen KR1÷4 eine durchschnittliche Beobachtungszeit nach links von 2,4 Sekunden, während die durchschnittliche Beobachtungszeit nach rechts gemittelt über alle Kreuzungen nur 1,5 Sekunden dauert. Eine entsprechende Betrachtungsweise liefert bei AFHZ = 1 für die Beobachtung nach links 4,3 Sekunden und für die Beobachtung nach rechts 3,1 Sekunden. Die Beobachtungszeiten bei Anwesenheit eines Fahrzeugs im Sichtbereich sind demnach etwa doppelt so groß wie bei Nullbelastung. Eine analoge Auswertung für $AFHZ \geq 2$ ergab eine mittlere Beobachtungszeit nach links von 6,1 Sekunden und nach rechts von 4,1 Sekunden, gemittelt über alle Kreuzungen.

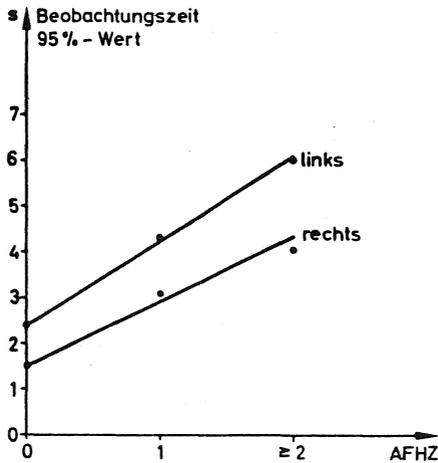


Abb. 3-18: Durchschnittliche Beobachtungszeit gemittelt über die Kreuzungen KR1-4 in Abhängigkeit von der Anzahl der beobachtbaren bevorrechtigten Fahrzeuge

Je größer demnach die Anzahl der Fahrzeuge im Sichtbereich ist, desto länger dauert die Einzelbeobachtung. Abb. 3-18 zeigt, daß bis zur Klasse AFHZ ≥ 2 die Annahme eines linearen Zusammenhangs möglich erscheint.

Abb. 3-19 stellt graphisch die Beobachtungszeit in Abhängigkeit vom Grad der Sichtweite dar. Es ist deutlich zu erkennen, daß mit abnehmender Güte der Sichtverhältnisse die Beobachtungszeit nach links und nach rechts zunimmt.

Die erste Beobachtung des Hauptstroms ist im Grunde die einzige von anderen Beobachtungen unabhängige Beobachtung des Hauptstroms. Deshalb wurde, um den Einfluß vorausgegangener Beobachtungen auf eine Beobachtung auszuschließen, die erste und zweite Beobachtung der VP vor dem Kreuzungsvorgang in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen und den verschiedenen AFHZ-Werten analysiert. Abb. 3-20 stellt die erste und zweite Beobachtung in Abhängigkeit von AFHZ und vom Grad der Sichtweite dar. Der unregelmäßige Verlauf der Kurven für die erste Beobachtung und der relativ geglättete Verlauf der Kurven für die zweite Beobachtung läßt vermuten, daß die erste Beobachtung im wesentlichen die Aufgabe einer Vororientierung an der Kreuzung hat und erst in den darauffolgenden Beobachtungen eine gezielte, von den Verkehrs- und Sichtverhältnissen abhängige Beobachtungsstrategie vom Nichtbevorrechtigten entwickelt wird.

Die Verteilungsfunktion der Beobachtungszeit wurde durch eine umfangreiche Testserie mit dem χ^2 -Test ermittelt. Aus nachstehender Tabelle sind die Ergebnisse der Testserie abzulesen. Es zeigt sich, daß die gesuchte Verteilungsfunktion der Beobachtungszeit am besten durch eine Exponentialverteilung beschrieben werden kann. Bei Klassenbreiten von 0,5 bis 1,0 s und einem Konfidenzniveau von 0,90 bis 0,999 (Anzahl der Freiheitsgrade zwischen 4 und 7) wurde die getroffene Annahme einer Exponentialverteilung am häufigsten nicht verworfen. Somit ist die Annahme einer Verteilungs-

Kreuzung	Richtung	AFHZ	Exponentialvert.				Gamma-Vert.				Log.-Norm.-Vert.				Normalvert.				
			.90	.95	.99	.999	.90	.95	.99	.999	.90	.95	.99	.999	.90	.95	.99	.999	
KR1	links	0	x	x	x	x	x	x	x	x									
		1		x	x	x		x	x	x		x	x	x					
		2	x	x	x	x		x	x	x			x	x				x	
	rechts	0			x	x				x				x					
		1	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x				
		2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	
KR2	links	0			x	x	x		x	x	x				x				
		1			x	x	x			x				x	x				
		2																	
	rechts	0				x	x		x	x	x				x	x		x	x
		1	x	x	x	x	x		x	x	x				x	x			
		2																	
KR3	links	0			x	x	x		x	x	x								
		1	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x			x	x	
		2	x	x	x	x	x		x	x	x				x				
	rechts	0																	
		1	x	x	x	x				x	x				x	x			x
		2	x	x	x	x	x	x		x	x	x			x	x	x		x
KR4	links	0	x	x	x	x				x	x								
		1	x	x	x	x				x	x						x	x	
		2	x	x	x	x	x				x	x	x	x				x	x
	rechts	0					x			x	x	x							x
		1	x	x	x	x	x			x	x	x							x
		2	x	x	x	x	x	x		x	x	x							x

ERGEBNISSE DER χ^2 -TESTSERIE FÜR DIE BEOBACHTUNGSZEITEN

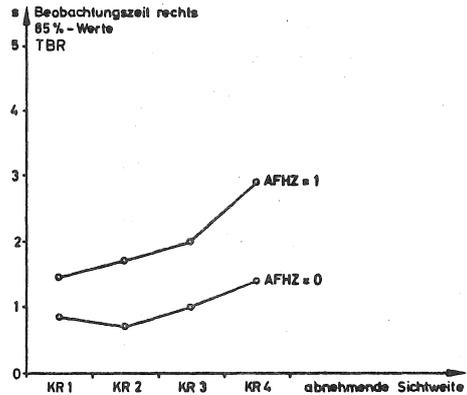
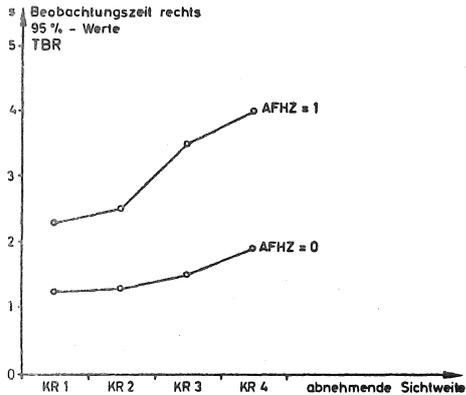
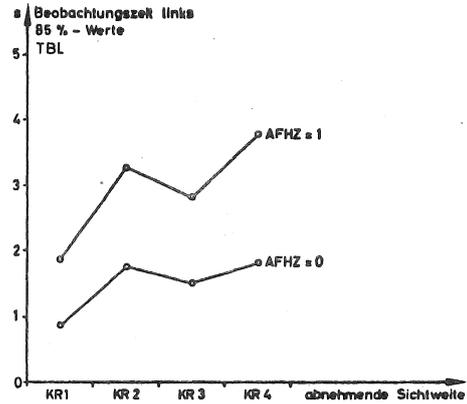
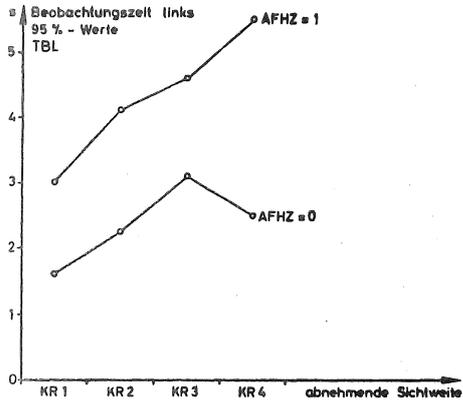
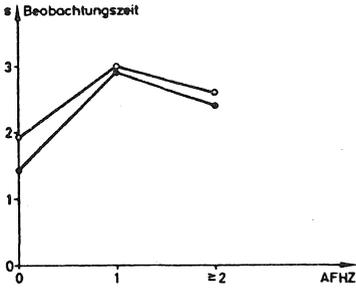
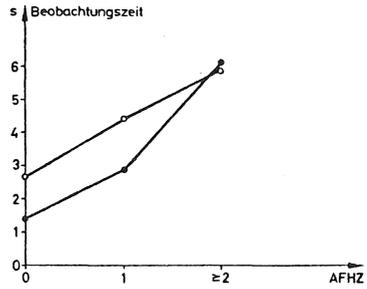


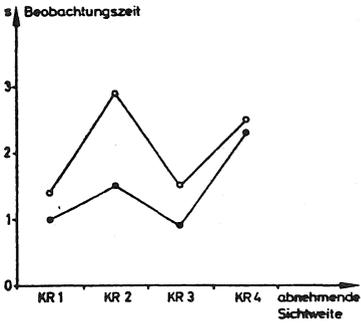
Abb. 3-19: Durchschnittliche Beobachtungszeit in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen



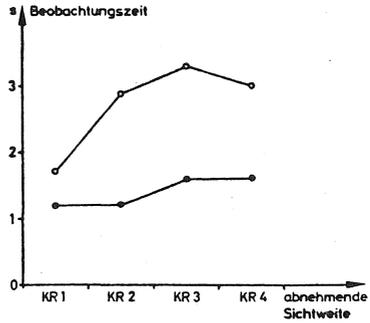
○ ± links } 1. Beobachtung, Mittelwert über KR1-4
 ● ± rechts } 95% - Werte



○ ± links } 2. Beobachtung über KR1-4
 ● ± rechts } 95% - Werte



AFHZ = 0 }
 ○ ± links } 1. Beobachtung
 ● ± rechts } 95% - Werte



AFHZ = 0 }
 ○ ± links } 2. Beobachtung
 ● ± rechts } 95% - Werte

Abb. 3-20: Erste und zweite Beobachtung in Abhängigkeit von der Anzahl der beobachtbaren bevorrechtigten Fahrzeuge (AFHZ) und in Abhängigkeit von der Sichtweite

funktion F der Beobachtungszeit TB mit dem Verteilungsparameter $1/\overline{TB}$ von der Form

$$F(TB \leq t) = 1 - e^{-\frac{1}{\overline{TB}} \cdot t} \quad (\text{Exponentialverteilung}) \quad (3.15)$$

vom Testergebnis her signifikant (vgl. Abb. 3-16a-d).

Die Verteilungsfunktion nach Gleichung (3.15) ist die Basis für den im Simulationsmodell "KREUZEN" (Kap. 4) eingebrachten Beobachtungsmechanismus.

Beobachtungsverhalten in Abhängigkeit von zeitbezogenen Kenngrößen des Verkehrsablaufs

Die Analyse des Beobachtungsverhaltens in Abhängigkeit von den zeitbezogenen verkehrstechnischen Kenngrößen (Verkehrsstärke, angebotene Zeitlücken im Hauptstrom, Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge im Hauptstrom) wird im folgenden erläutert.

Beobachtungsverhalten - Verkehrsstärke:

Bei der Ermittlung, ob und ggf. in welchem Maß die durchschnittliche Beobachtungszeit von der Verkehrsstärke während einer Vorbereitungsphase zum Kreuzen abhängt, ergeben sich etwa die gleichen Verhältnisse (Abb. 3-21) wie bei der Untersuchung der Relation durchschnittliche Beobachtungszeit - Verkehrsdichte. Stellvertretend für alle Kreuzungen sind die Ergebnisse von Kreuzung KR3 dargestellt. Auch hier wird ein linearer Ansatz für diese Beziehung durch einen statistischen Test bei einem Signifikanzniveau von 0,99 und einem Bestimmtheitsmaß der linearen Regression von $< 0,2$ als nicht signifikant verworfen.

Es wird jedoch ein leichter Anstieg der durchschnittlichen Beobachtungszeit mit zunehmender Verkehrsstärke festgestellt,

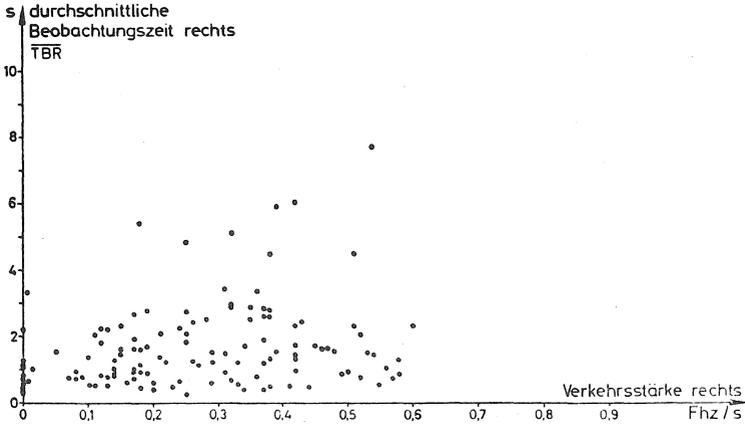
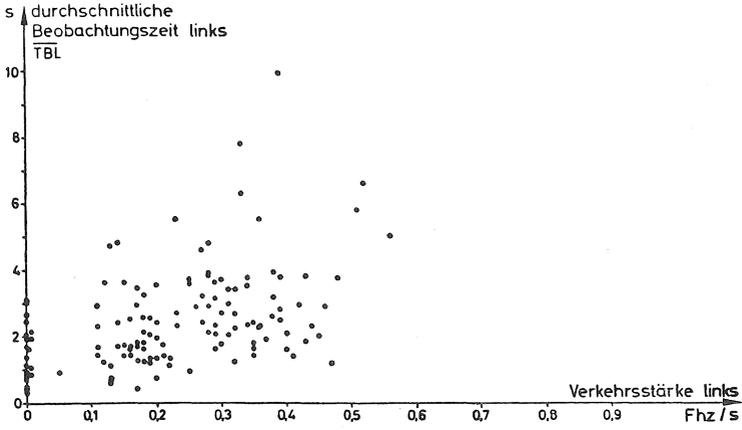


Abb. 3-21: Durchschnittliche Beobachtungszeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Fahrzeugstrom

der bei der Beobachtung nach links etwas steiler zu verlaufen scheint als bei der Beobachtung nach rechts, was auch hier auf die ungünstigen Winkelverhältnisse bezüglich des linken Hauptstroms gegenüber dem rechten Hauptstrom zurückgeführt werden kann.

Neben den Beobachtungszeiten ist auch die Anzahl der Beobachtungen nach links und nach rechts vor einem Kreuzungsvorgang von Interesse, da sie als indirektes Maß für die Belastung des Fahrers angesehen werden können. Die Anzahl der Beobachtungen wurde ebenfalls aus den Filmaufzeichnungen ermittelt. In Abb. 3-22 ist die Summe der Beobachtungen (links/rechts) in Abhängigkeit von der Summe der jeweils herrschenden Verkehrsstärken (links und rechts) für die am stärksten belastete Kreuzung K3 aufgetragen. Bei niedriger Verkehrsbelastung beschränkt sich der Nichtbevorrechtigte keineswegs auf zwei Beobachtungen (einmal links und einmal rechts), vielmehr wird jede Beobachtung, vor allem die nach links, die zur Entscheidung "Kreuzen" führt, mindestens einmal überprüft, bevor der eigentliche Kreuzungsvorgang eingeleitet wird. Die minimale Anzahl der Beobachtungen liegt, gemittelt über alle Kreuzungen, zwischen 3 und 4.

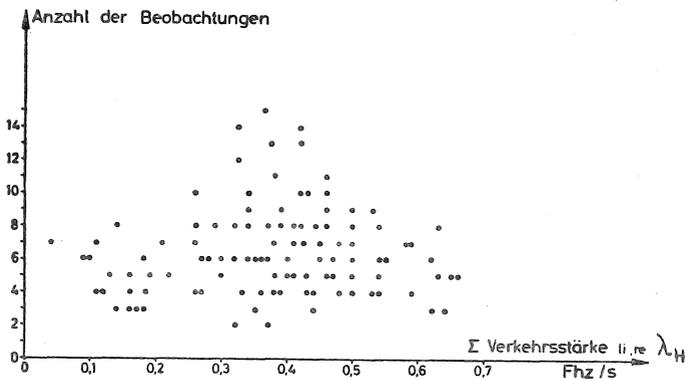


Abb. 3-22: Anzahl der Beobachtungen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke im Hauptstrom

Mit steigender Verkehrsbelastung steigt auch die Anzahl der Beobachtungen bei relativ großer Streuung leicht an und erreicht bei $\lambda_{\mu} \approx 0,4$ Fhz/s sein Maximum. Diese Verkehrsstärke entspricht einer mittleren kombinierten Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen beider Hauptströme von ca. 2,5 s. Unter Berücksichtigung der kinematischen Möglichkeiten der Fahrzeuge benötigt ein nicht bevorrechtigter Fahrer zum Überqueren einer Kreuzung je nach Beschleunigungsvermögen, Fahrstil, Länge des Fahrzeugs und Kreuzungsgeometrie etwa zwischen 2 und 6 Sekunden. Das Maximum der Beobachtungsaktivitäten liegt demnach bei angebotenen Zeitlücken oder potentiellen Zeiten im Hauptstrom, die in der Größenordnung der potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten liegen.

Bei Verkehrsstärken von mehr als 0,5 Fhz/s reduziert der Nichtbevorrechtigte seine Beobachtungsaktivitäten wieder.

Beobachtungsverhalten - Zeitlücken

Abb. 3-23 zeigt den aus empirischen Messungen ermittelten Zusammenhang zwischen den Beobachtungszeiten (Einzelbeobachtung) und den in einem Hauptstrom angebotenen Zeitlücken (t_H) und potentiellen Zeiten (t_{pB}). Unter der potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten (t_{pN}) ist der Zeitbedarf des Nichtbevorrechtigten vom momentanen Standort bis zum Überschreiten der Hinterkante des Fahrzeugs über die jenseitige Begrenzung des Kollisionsbereichs zu verstehen. Die potentielle Zeit des Bevorrechtigten (t_{pB}) ist als Zeitbedarf vom momentanen Standort unter Beibehaltung der momentanen Geschwindigkeit bis zum Erreichen der Vorderkante des Fahrzeugs am Kollisionsbereich definiert (s. Kap. 3.3).

Bei einer Klassenbreite der Zeitlücken und potentiellen Zeiten von 2 Sekunden zeigte sich, daß die Beobachtungszeit innerhalb der Zeitlückenklassen exponentialverteilt ist.

Durch Auftragen der komplementären Summenhäufigkeitswerte auf halblogarithmischem Papier wurde der Erwartungswert der Exponentialverteilung bestimmt. Die Erwartungswerte innerhalb der t_H und t_{PB} - Klassen sind in Abb. 3-23 als gestrichelte Linie eingezeichnet.

Abb. 3-23 läßt folgende Interpretation zu:

Zunächst sieht man, daß im Bereich sehr großer und kleiner Zeitlücken und potentiellen Zeiten der Nichtbevorrechtigte nur sehr kurz den bevorrechtigten Fahrzeugstrom beobachtet. Hier treten im Mittel Beobachtungszeiten zwischen 1 und 1,5 s auf. Anders verhält es sich, wenn die angebotenen Zeitlücken und potentiellen Zeiten im Bereich der potentiellen Zeit des nicht bevorrechtigten Fahrers liegen (vgl. Abb. 3-22). Hier erreichen die Beobachtungszeiten die Maximalwerte. Sie liegen bei der Beobachtung nach links bei etwas höheren t_H - und t_{PB} -Werten als bei der Beobachtung nach rechts. Der Unterschied ist erklärbar mit den oben erläuterten ungünstigen Winkelverhältnissen gegenüber dem Hauptstrom von links und dem erlernten Verhaltensmuster "Erst links, dann rechts".

Bei t_H - und t_{PB} - Werten von mehr als 6 Sekunden sinken die Beobachtungsaktivitäten und die durchschnittlichen Beobachtungszeiten wieder (vgl. Abb. 3-22).

Der Anstieg der Beobachtungszeiten bei angebotenen Zeitlücken und potentiellen Zeiten im Hauptstrom von der Größenordnung der potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten kann ein Hinweis darauf sein, daß bei diesen Zeitlücken und potentiellen Zeiten der Nichtbevorrechtigte den größten Unsicherheiten bei der Entscheidung zum Kreuzen ausgesetzt ist. Mit der Annahme, daß je nach Risikobereitschaft und Geschwindigkeit des Nichtbevorrechtigten seine potentielle Zeit bei ca. 2 bis 6 Sekunden liegt, können für einen potentiellen

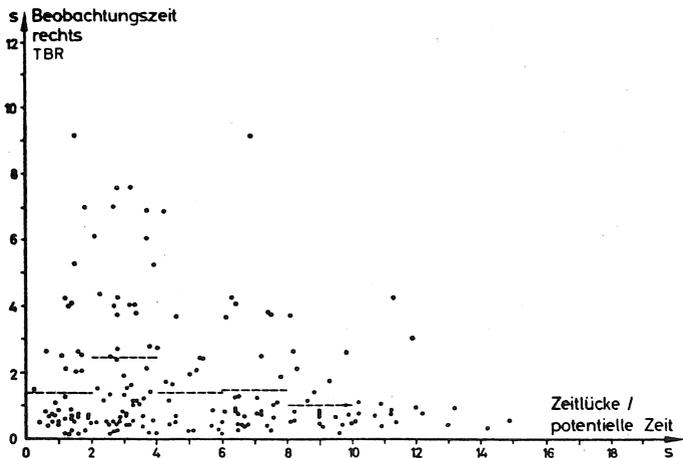
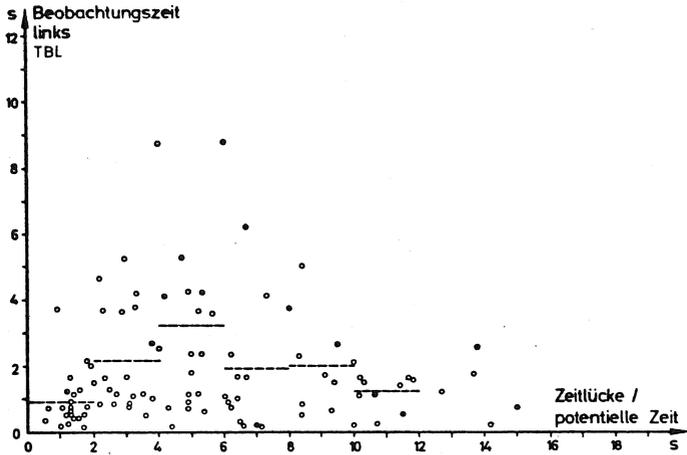


Abb. 3-23: Beobachtungszeit in Abhängigkeit von den angebotenen Zeittücken und potentiellen Zeiten im bevorrechtigten Fahrzeugstrom

Kreuzungsvorgang Zeitlücken im Hauptstrom ausgenutzt werden, die ebenfalls zwischen 2 und 6 Sekunden und darüber liegen.

Kritische Verkehrsstärken - potentielle Zeit - Kombinationen an der Kreuzung

Nach diesen Ergebnissen liegt die Frage nahe, für welche Verkehrsstärken im Hauptstrom die Wahrscheinlichkeit, daß Zeitlücken zwischen 2 und 6 Sekunden auftreten, am größten ist, da diese Verkehrsstärken in Kombination mit den entsprechenden potentiellen Zeiten des Nichtbevorrechtigten sicher einen Risikofaktor an der Kreuzung ausmachen können.

Bezeichnet man mit t_{Hk} die Untergrenze und mit t_{Hg} die Obergrenze der Menge der Zeitlücken im Hauptstrom, die zwischen t_{Hk} und t_{Hg} auf der Zeitachse liegen, und nimmt man weiterhin an, daß die Fahrzeugankünfte poissonverteilt sind, so gilt für die Wahrscheinlichkeit P , daß Zeitlücken auftreten, die zwischen t_{Hk} und t_{Hg} liegen,

$$P = P(t_{Hk} \leq t \leq t_{Hg}) = e^{-\lambda t_{Hk}} - e^{-\lambda t_{Hg}},$$

mit λ = Verkehrsstärke mit der Dimension Fhz/s.

Mit der ersten Ableitung $\frac{dP}{d\lambda} \stackrel{!}{=} 0$ erhält man die λ -Werte, für die P maximal wird:

$$\frac{d P(t_{Hk} \leq t \leq t_{Hg})}{d \lambda} = - t_{Hk} e^{-\lambda t_{Hk}} + t_{Hg} e^{-\lambda t_{Hg}} \stackrel{!}{=} 0.$$

Daraus folgt

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{t_{Hg} - t_{Hk}} \ln \frac{t_{Hg}}{t_{Hk}}. \quad (3.16)$$

λ_{\max} entspricht der Verkehrsstärke, bei der die Wahrscheinlichkeit am größten ist, daß Zeitlücken in einem Fahrzeugstrom auftreten, die zwischen t_{HK} und t_{Hg} Sekunden liegen.

Eine Variation der t_{HK} und t_{Hg} - Werte mit 1 s -Intervallen in Gleichung 3.16 innerhalb des Bereichs von 2 bis 6 Sekunden liefert in der graphischen Darstellung die in Abb. 3-24 gezeigten Kurvenscharen.

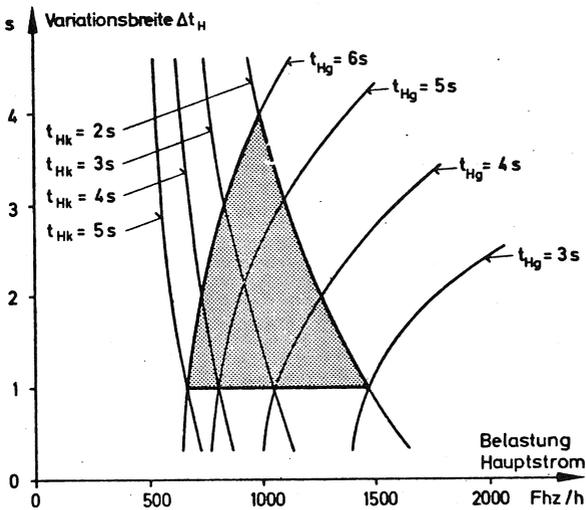


Abb. 3-24: Gefahrenbereich beim Kreuzen

Mit der empirisch abgesicherten Aussage, daß in diesem Bereich zwischen 2 und 6 Sekunden der Vergleich der potentiellen Zeiten, d.h. die Bildung der potentiellen Zeitdifferenz für den Nichtbevorrechtigten an der Kreuzung besonders kritisch ist, verbunden mit der durchaus plausiblen

Annahme, daß dann potentielle Zeiten des Nichtbevorrechtigten in diesem Bereich ebenso kritische Werte darstellen, kann Abb. 3-24 folgendermaßen interpretiert werden:

Je kleiner die Variationsbreite $\Delta t_H = t_{Hg} - t_{Hk}$ bzw. je kleiner die Variationsbreite der potentiellen Zeiten des Nichtbevorrechtigten an der Kreuzung ist, desto größer ist der Bereich der Verkehrsstärken, in denen Zeitlücken auftreten, die einen potentiell kritischen Kreuzungsvorgang zulassen. Mit zunehmender Variationsbreite der potentiellen Zeiten wird dieser Bereich immer kleiner und strebt einem kritischen Wert zu.

Beobachtungsverhalten - Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugs

Abb. 3-25 zeigt die Dauer der Einzelbeobachtung über der Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge aufgetragen. Zwischen der Beobachtungsdauer und der Geschwindigkeit konnte keine Korrelation festgestellt werden. Die Streuung der Werte der Beobachtungsdauer nach links und nach rechts nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit zwar zu, es wäre aber voreilig, dies mit einer zunehmenden Unsicherheit des Nichtbevorrechtigten erklären zu wollen, da die bei den Versuchsfahrten gemessenen v_{max} -Werte im Hauptstrom mit 18,9 m/s (68 km/h) noch zu den im innerstädtischen Bereich zulässigen Geschwindigkeiten gerechnet werden können.

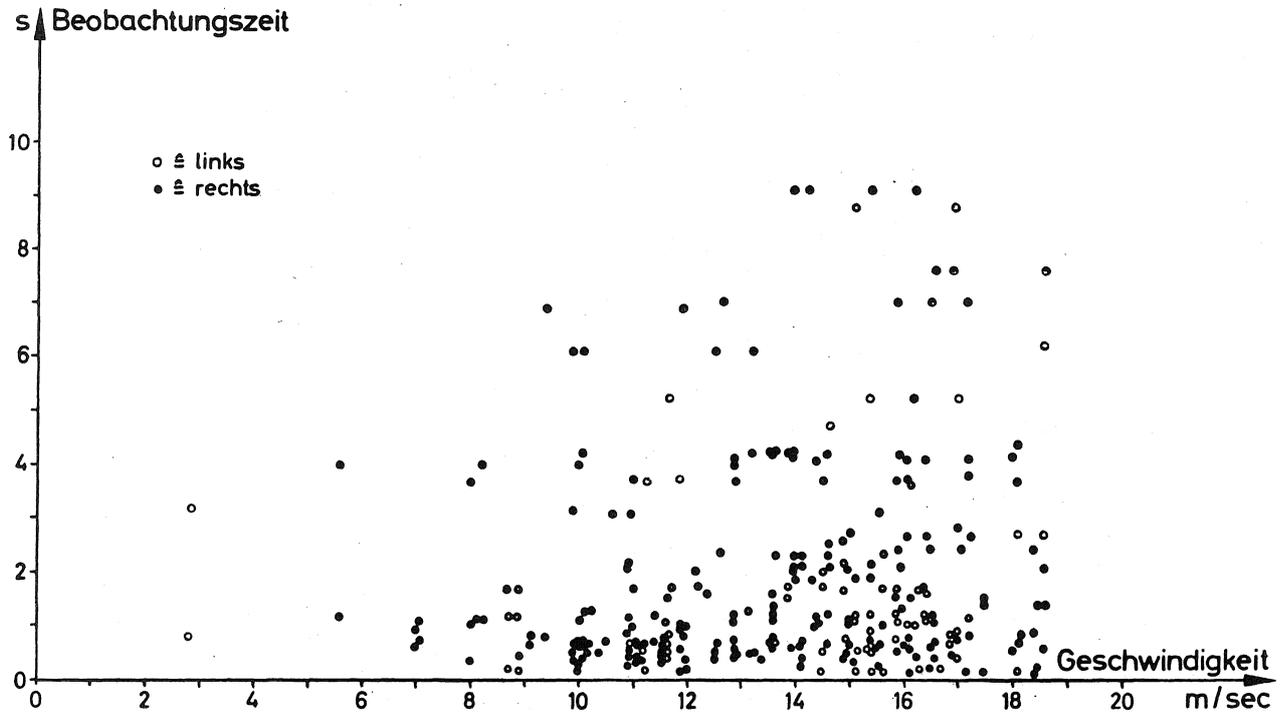


Abb. 3-25: Beobachtungszeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge

3.5.3.3 Verzögerungsverhalten des Nichtbevorrechtigten an der Kreuzung

Aus den bei den Versuchsfahrten aufgezeichneten Geschwindigkeitswerten mit Hilfe eines zur Tachometerwelle parallel geschalteten elektronischen Tachometers der Fa. VDO wurde das Verzögerungsverhalten der Versuchspersonen im Annäherungsbereich einer Kreuzung ermittelt.

Dieser Teil der Untersuchungen zielte vor allem auf die Ermittlung von Eich- bzw. Kalibrierungswerten für das im Simulationsmodell mikroskopisch eingebrachte Verzögerungsverhalten des einzelnen Fahrers.

Es zeigte sich, daß sämtliche Versuchspersonen sich nicht mit einer konstanten Bremsverzögerung der Kreuzung näherten, sondern mehrmals den Verzögerungswert korrigierten, teils durch sogenanntes "Runterschalten" oder zusätzliches Betätigen des Bremspedals (Abb. 3-26).

Die Verzögerungswerte wurden aus den Geschwindigkeits-Zeit-Linien graphisch ermittelt.

Die größten Verzögerungswerte des nicht bevorrechtigten Fahrzeugs traten etwa im zeitlichen Mittel des Abbremsvorgangs vom Anfang der Verzögerung aus gesehen bis zum Stillstand vor dem Kollisionsbereich auf.

Die gesamte Variationsbreite der ermittelten Verzögerungswerte während einer Annäherung an den Kollisionsbereich lag zwischen 0,5 und 3,0 m/s².

Die in Abb. 3-26 einer empirisch ermittelten Geschwindigkeits-Zeit-Linie gegenübergestellte entsprechende Kurve eines simulierten Fahrzeug zeigt beispielhaft für einen Annäherungsvorgang eines Nichtbevorrechtigten die relativ gute Übereinstimmung der Empirie mit der Simulation.

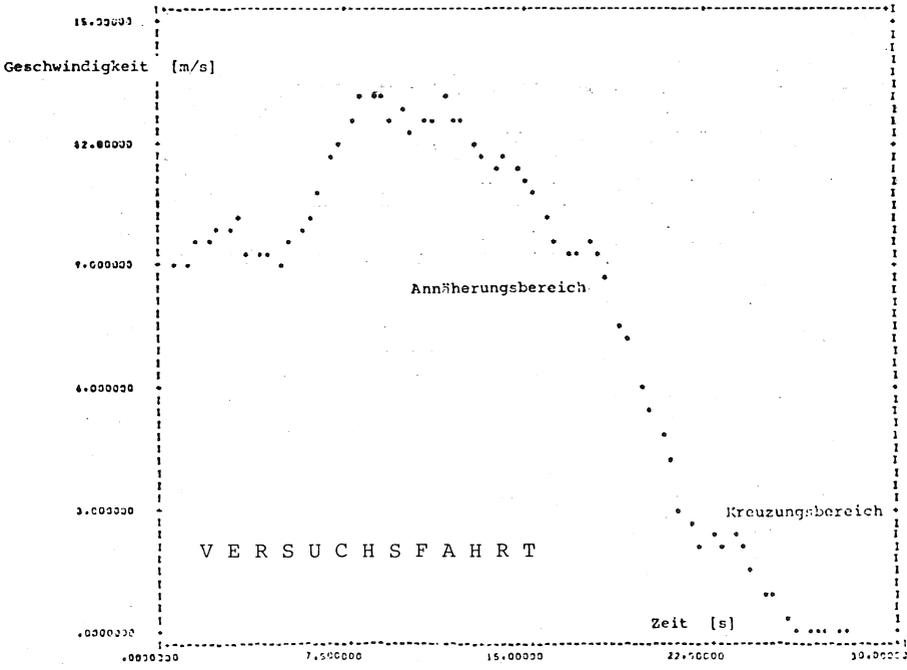
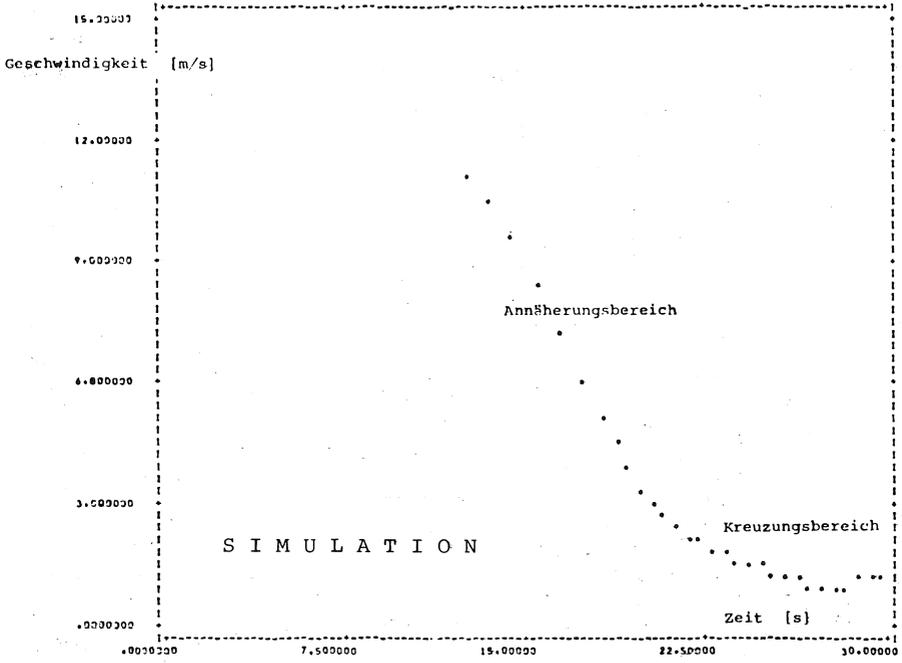


Abb. 3-26: Geschwindigkeit - Zeit - Diagramm einer Versuchsfahrt und eines simulierten Fahrzeugs

3.5.4 Zusammenfassende Bemerkungen zu den empirischen Untersuchungen

Die empirischen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Tätigkeitsanalyse des Nichtbevorrechtigten in der Verkehrssituation "Kreuzen" ergab ein stark ausgeprägtes Tätigkeitsmaximum im unmittelbaren Kreuzungsbereich. Die Ergebnisse zeigen u.a., daß für den Fahrer durch geeignete Fahrhilfen, z.B. durch ein automatisches Getriebe, etwa 50 % (ungewichtete Angabe) der notwendigen Tätigkeiten entfallen.
- Bei sämtlichen untersuchten Kreuzungen zeigte sich, daß die Beobachtungszeiten exponentialverteilt sind und sich durch die Verteilungsfunktion

$$F(TB \leq t) = 1 - e^{-\frac{1}{\overline{TB}} \cdot t}$$

beschreiben lassen. Der Funktionsparameter \overline{TB} entspricht dem Erwartungswert der Dauer der Einzelbeobachtungen. Dieser Erwartungswert ist abhängig von der Blickrichtung (links oder rechts) und von den Sicht- bzw. Verkehrsverhältnissen im Hauptstrom.

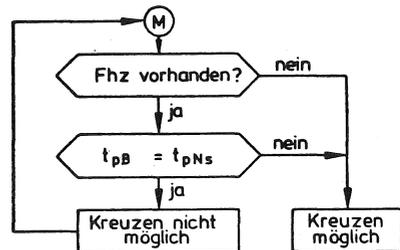
- Bezüglich des Beobachtungsverhaltens nach links und nach rechts wurde festgestellt, daß im Mittel die Beobachtung nach links je nach Sicht- und Verkehrsverhältnissen ca. 1 bis 2 Sekunden länger dauert als die Beobachtung nach rechts. Dies ist zum einen erklärbar durch die ungünstigeren Winkelverhältnisse, unter denen die Beobachtung des Hauptstroms von links erfolgen muß, zum anderen kann das auf das in der Fahrschule erlernte Verhaltensmuster an Kreuzungen zurückgeführt werden.

- Bei der Untersuchung darüber, inwieweit die Sichtverhältnisse im unmittelbaren Kreuzungsbereich das Beobachtungsverhalten beeinflussen, wurde eine Korrelation der Dauer der Einzelbeobachtung mit den Sichtverhältnissen derart festgestellt, daß mit schlechter werdenden Sichtverhältnissen die Dauer der Einzelbeobachtung im Mittel zunimmt.
- Es zeigte sich, daß auch die Verkehrsverhältnisse im Hauptstrom die Beobachtungsdauer stark beeinflussen, und zwar steigt die Beobachtungszeit mit zunehmender Anzahl beobachtbarer Fahrzeuge im Hauptstrom vermutlich linear an (s. Abb. 3-18).
- Bezüglich der Einzelbeobachtung in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen und der Größe AFHZ wurde festgestellt, daß die erste Beobachtung an der Kreuzung im allgemeinen dazu dient, eine Vororientierung bezüglich der Verkehrs- und Sichtverhältnisse durchzuführen und erst die darauffolgenden Beobachtungen die dargestellten Abhängigkeiten aufzeigen.
- Die Beobachtungszeit und die Beobachtungsaktivitäten der Nichtbevorrechtigten zeigen bei Zeitlücken und potentiellen Zeiten im Hauptstrom von der Größenordnung der eigenen potentiellen Zeit ein Maximum.
- Es konnte nicht nachgewiesen werden, daß die Beobachtungszeiten des Nichtbevorrechtigten mit den Abständen bevorrechtigter Fahrzeuge vom Kollisionsbereich und deren Geschwindigkeiten korrelieren. Die ermittelten Zeitkorrelationen, verbunden mit den nicht nachweisbaren Korrelationen Beobachtungszeit/Abstand bzw. Beobachtungszeit/Geschwindigkeit, weisen stark darauf hin, daß die Zeit in irgendeiner Form als Kombination aus Weg und Geschwindigkeit ein Kriterium für die Entscheidung zum Kreuzen darstellt. Außerdem ist eine weitere, stark die Beobachtungszeit beeinflussende

Größe die Anzahl der beobachtbaren Fahrzeuge im Bereich der Sichtweite. Verbindet man diese Ergebnisse, so ergibt sich folgende Beobachtungs- und Entscheidungsstrategie für den Nichtbevorrechtigten:

Bei der zeitlichen Entfernung des Bevorrechtigten von weniger als 2 Sekunden und mehr als 6 Sekunden vom Kollisionsbereich beobachtet der Nichtbevorrechtigte den Hauptstrom nur kurz und stellt im wesentlichen fest, ob im Sichtbereich ein Fahrzeug vorhanden ist oder nicht. Treten zeitliche Abstände im Bereich der eigenen potentiellen Zeit auf, kommt zu dieser Feststellung der Anwesenheit eines Fahrzeugs im Hauptstrom die Notwendigkeit eines Zeitvergleichs der potentiellen Zeiten hinzu, was sich in einem Anstieg der Beobachtungszeiten vermutlich durch notwendige, genauere und intensivere Fixation der bevorrechtigten Fahrzeuge ausdrückt (siehe VOSS, 1977). Dem Vorgang des Kreuzens gehen somit folgende stetig ineinander übergehende Prozesse voraus:

- Feststellen, ob Fahrzeug vorhanden
- Vergleich der potentiellen Zeiten
- Entscheiden, ob Kreuzen möglich oder nicht



Die Entscheidung zum Kreuzen ist somit eine Kombination zwischen einer "Ereignisentscheidung" und einer "Vergleichsentscheidung". Dabei soll unter einer Ereignisentscheidung die Entscheidung des Fahrers gegenüber einem diskreten Ereignis und unter einer Vergleichsentscheidung die Entscheidung des Fahrers aufgrund des Resultats eines Vergleichs stetig auftretender Größen verstanden werden.

3.5.5 Konsequenzen für die Praxis

Aus den Ergebnissen der empirischen Untersuchungen sind folgende, praxisorientierte Konsequenzen unter dem Gesichtspunkt V E R K E H R S I C H E R H E I T ableitbar:

- Das in der Verkehrssituation "Kreuzen einer bevorrechtigten Straße" festgestellte Aktionsmaximum der für die Regelung der Kinematik des Fahrzeugs notwendigen Tätigkeiten im unmittelbaren Kreuzungsbereich kann durch automatische Fahrhilfen (z.B. automatisches Getriebe) entscheidend reduziert werden. Durch Wegfall der Notwendigkeit der Schalthebelbedienung werden außerdem Aktionskapazitäten frei für andere im Kreuzungsbereich gegebenenfalls benötigte Bedienungselemente (z.B. Blinker, Scheibenwischer) oder andere Tätigkeiten.
- Die Differenz der potentiellen Zeiten als Entscheidungskriterium zu Kreuzen ergibt eine notwendige Mindestsichtweite von 60 bis 80 m bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 50 km/h im bevorrechtigten Fahrstrom. Bei Geschwindigkeiten von 70 km/h im bevorrechtigten Fahrzeugstrom sind aufgrund dieser Überlegungen Mindestsichtweiten von 70 bis 100 m erforderlich.
- Aus der Untersuchung über das Beobachtungs- und Entscheidungsverhalten kann abgeleitet werden, daß ein Zulassen von Parken und Halten vor dem Kreuzungsbereich in jeweils gleichweiter Entfernung von den Straßenkanten eine nicht sinnvolle Bestimmung darstellt. Von der nicht bevorrechtigten Straße nach rechts gesehen ist die Mindestsichtweitenbedingung i.a. erfüllt. Dagegen erscheint es notwendig, für diese Bedingung auch von der nicht bevorrechtigten Straße nach links gesehen dadurch zu sorgen, daß hier das Halten und Parken schon in größerer Entfernung vom Kreuzungsbereich unterbleibt.

- Die Entscheidung zum "Halten" oder "Nicht Halten" sollte dem Nichtbevorrechtigten bei schlechten Sichtverhältnissen durch das Errichten eines STOP-Schildes erleichtert werden.

- Unter Beachtung der Blickwinkelgeschwindigkeit aufgrund der Standortänderung des beobachteten bevorrechtigten Fahrzeugs sollte versucht werden, durch geeignete bauliche Maßnahmen und Geschwindigkeitsbeschränkungen die im Kap. 3.4 aufgeführten kritischen Abstands, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnisse zu vermeiden. Anhaltspunkt kann dabei die in Abb. 3-7 dargestellte Graphik sein.

4. Modell zur Simulation des Verkehrsablaufs an vorfahrt- geregelten innerstädtischen Straßenkreuzungen

Die Ergebnisse aus den empirischen Untersuchungen bestätigen im Prinzip die Richtigkeit der gewählten Vorgehensweise.

Mit Hilfe empirischer Untersuchungen allein sind jedoch Aussagen zur Leistungsfähigkeit eines innerstädtischen Straßenverkehrsknotens unter bestimmten Randbedingungen nur mit sehr hohem Meßaufwand möglich. Dazu kommt noch, daß die einzelnen Ereignisse und Fahrsituationen im großen und ganzen nicht reproduzierbar sind.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist hierbei die große und sehr schwierig bestimmbare Vielfalt von Faktoren, die bei den einzelnen Versuchsfahrten die Testpersonen zufällig beeinflussen (Fußgänger, parkende Fahrzeuge etc.). Doch selbst bei weitestgehender Ausschaltung solcher, den Kern der Untersuchung störender Faktoren, gelingt es auf empirischen Weg nicht, eine ausreichende Anzahl von Kreuzungsvorgängen zu erhalten, um über den gesamten Bereich möglicher Kombinationen von Verkehrszuständen im Haupt- und Nebenstrom statistisch abgesicherte Aussagen zu machen.

Zur Untermauerung und Ergänzung der empirischen Ergebnisse werden daher modellhafte Untersuchungen mittels der Simulation des Kreuzungsvorgangs durchgeführt.

Die Simulation kann je nach Problemstellung auf einer zeitorientierten oder auf einer ereignisorientierten Betrachtungsweise aufbauen. Bei der Nachahmung des Verkehrsflusses wird üblicherweise die zeitorientierte Betrachtungsweise des Verkehrsablaufs angewandt. Bei der vorliegenden Problemstellung erscheint es jedoch notwendig, die einzelnen Entscheidungsprozesse im Simulationsmodell ereignisorientiert zu betrachten. Wegen des beschränkt zur Verfügung

stehenden Speicherplatzes der Rechenanlage muß ein minimaler Ereignisabstand festgelegt werden, da im Extremfall das System sich sonst so kleine Ereignisintervalle wählen kann (ms-Bereich), die bezüglich des Rechenaufwandes nicht mehr vertretbar sind.

Als Programmiersprache wurde SIMULA 67 gewählt. SIMULA 67 ist von den Sprachmerkmalen her eine dem ALGOL 60 sehr stark verwandte Programmiersprache.

Die nützlichsten Eigenschaften dieser Sprache sind das sogenannte "Listenkonzept" und das sogenannte "Simulationskonzept". Bei dem Listenkonzept werden in den einzelnen "Klassen" Speicherbereiche und Prozeduren in Blöcken zusammengefaßt. Diese können zu jedem Zeitpunkt über spezifische Namen aufgerufen werden. Zur Manipulation des Listenkonzepts liegen fertige Prozeduren vor, so daß sich besonders die Organisation von komplexen Systemen (z.B. Warteschlangen), die in anderen Programmiersprachen nur mit großem Aufwand (z.B. Indizes, Array-Felder) durchgeführt werden kann, einfach gestaltet. Das Simulationskonzept ermöglicht die Vereinbarung von sogenannten "Prozessklassen", die mit relativ wenig Aufwand eine quasiparallele Abarbeitung von Prozessen erlauben.

4.1 Bisherige Arbeiten

In den in der Literatur vorgestellten Simulationsmodellen für den Verkehrsablauf an Kreuzungen (z.B. STEIERWALD, STAMM, SIEGLOCH, TONKE) wird im wesentlichen nicht von der Betrachtung des Nebenstromfahrzeugs ausgegangen, sondern von einer Betrachtung der Zeitlücken des Hauptstroms. In früheren Arbeiten (z.B. GRABE, DORFWIRTH, HARDERS) zur Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage (LSA) wird angenommen, daß der bevorrechtigte Verkehrsstrom stationär ist und die Zeitlücken zwischen den

Fahrzeugen exponentialverteilt sind. Außerdem wird davon ausgegangen, daß die zeitlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen im Hauptstrom durch die Begriffe "Block" und "Antiblock" beschrieben werden können. Dabei wird der Zeitabschnitt, in dem es für den Nichtbevorrechtigten möglich ist, den Hauptstrom zu kreuzen, als Antiblock, ein Zeitabschnitt, in dem ein Kreuzen nicht möglich ist, als Block bezeichnet. Der Schwellenwert bei der Abfrage, ob ein Block oder Antiblock vorliegt, ist dabei die "im Mittel kleinste annehmbare Zeitlücke" (HARDERS), die sogenannte Grenzzeitlücke t_g .

In neueren Arbeiten (SIEGLOCH, TONKE) wird darauf verwiesen, zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten nicht die Grenzzeitlücke t_g zu benutzen, sondern die Funktion

$$EN(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq t_0 \\ \frac{t-t_0}{t_f} & \text{für } t > t_0 \end{cases}$$

mit

- t_0 = diejenige Zeitlücke, die im Mittel von einem nicht bevorrechtigten Fahrzeug nicht angenommen wird (Nullzeitlücke),
- t_f = diejenige Zeitlücke, mit der die nicht bevorrechtigten Fahrzeuge den Kollisionsbereich befahren (Folgezeitlücke),

zu bestimmen, die es ermöglicht, den Erwartungswert der in eine Zeitlücke der Größe t einfahrenden Nebenstromfahrzeuge zu ermitteln.

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt davon ab, wie genau die Grenzzeitlücke t_g bzw. die Funktion $EN(t)$ bestimmt werden können (TONKE).

Bei sämtlichen Modellen bleiben eventuelle Leistungsverluste, die durch Sichtbehinderung und Zeitverluste durch notwendige Informationsaufnahme des Nichtbevorrechtigten an der Kreuzung verursacht sind, unberücksichtigt. Da diese Frage im innerstädtischen Bereich eine besondere Relevanz besitzt, wurde versucht, das hier vorgestellte Simulationsmodell "KREUZEN" so zu konzipieren, daß auch dieser Einfluß untersucht werden kann.

4.2 Ablaufdiagramm des Simulationsmodells "KREUZEN"

Basierend auf den empirischen Untersuchungen, die in Kap. 3 vorgestellt wurden, gehen die modellmäßigen Überlegungen beim Simulationsmodell "KREUZEN" von der Betrachtung des Nichtbevorrechtigten aus. Das Ablaufdiagramm der Verkehrssituation "KREUZEN" für ein Nebenstromfahrzeug (Abb. 4-1) gliedert sich im Simulationsmodell entsprechend der Einteilung in Subfunktionen (s. Kap. 3.1) ebenfalls in zwei Bereiche.

Der erste Bereich erstreckt sich vom Anfang der Untersuchungsstrecke bis zu dem Punkt, von dem aus die bevorrechtigte Straße eingesehen werden kann (Sichtpunkt XUS) und der zweite Bereich vom Sichtpunkt bis zu der Linie XHALT, an der der Nichtbevorrechtigte halten muß, wenn die Verkehrsverhältnisse einen Kreuzungsvorgang nicht zulassen.

Vom Beginn der Fahrt (Input) bis zu dem Punkt, von dem aus noch ein Halten vor dem Kollisionsbereich mit einer komfortablen Bremsverzögerung möglich ist (Bremspunkt XUB), ist

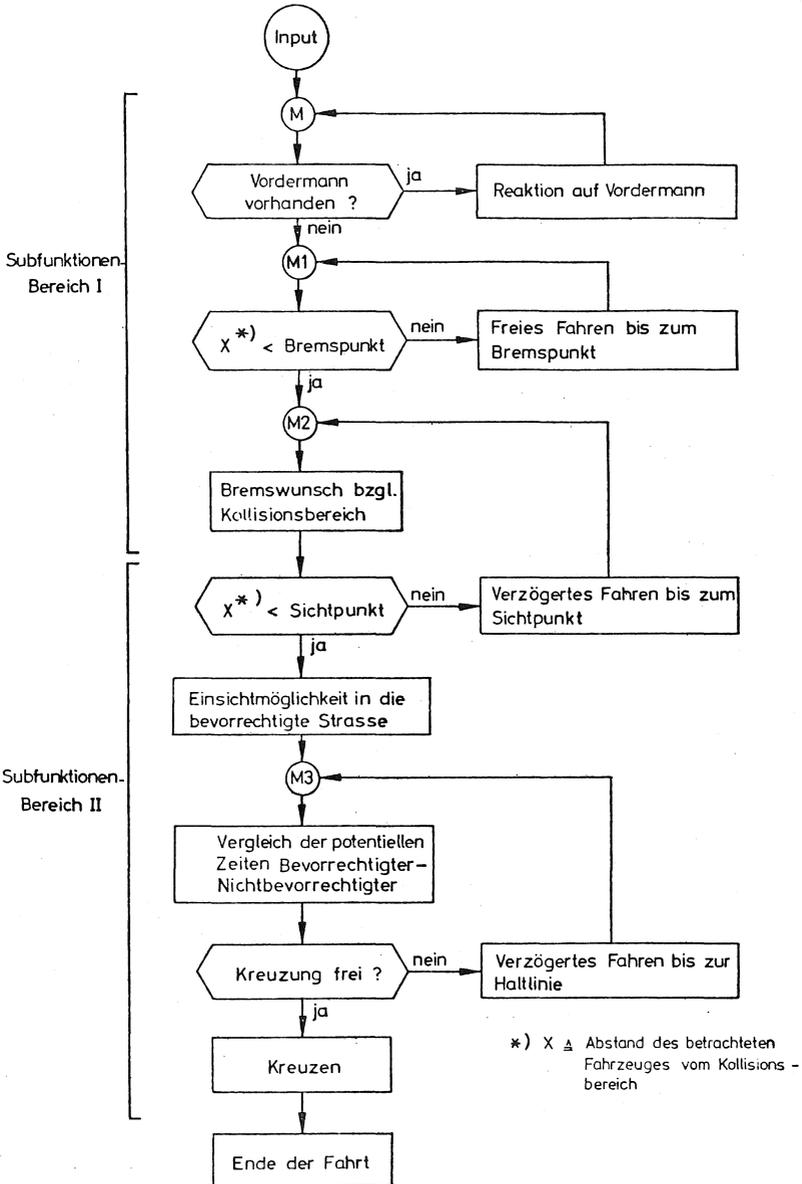


Abb. 4-1: Ablaufdiagramm der Verkehrssituation KREUZEN aus der Sicht des Nichtbevorrechtigten

unter der Annahme, daß kein Vordermann oder ein genügend großer Abstand zum Vordermann vorhanden ist, die Bewegung des Nichtbevorrechtigten als "Freies Fahren" zu bezeichnen.

Wenn der Bremspunkt überschritten ist, bereitet sich der Fahrer durch die Wahl einer Bremsverzögerung auf den Kreuzungsvorgang vor. Sobald er den Sichtpunkt überschritten hat, besteht die Möglichkeit, den bevorrechtigten Verkehrsstrom zu beobachten. Ist seine Beobachtung positiv bezüglich des Kreuzens, beschleunigt der Fahrer sein Fahrzeug und kreuzt den bevorrechtigten Fahrzeugstrom; ist seine Beobachtung negativ, richtet er seine Bremsverzögerung so ein, daß er noch vor dem Kollisionsbereich zu Halten kommt und wartet, bis sich ihm eine Gelegenheit zum Kreuzen bietet.

Bei Anwesenheit eines Vordermanns über die gesamte Untersuchungsstrecke wird die Vereinfachung getroffen, daß sich das Verhalten des betrachteten Nichtbevorrechtigten solange nach dem Fahrverhalten des Vordermanns richtet, bis dieser die bevorrechtigte Straße kreuzt.

Das Simulationsmodell "KREUZEN" ist so konzipiert, daß Kreuzungsvorgänge an Kreuzungen mit unterschiedlichen Belastungen im Haupt- und Nebenstrom und unterschiedlichen Sichtverhältnissen abgehandelt werden können.

4.3 Bausteine des Simulationsmodells "KREUZEN"

Grundlage des entwickelten Simulationsmodells ist das von WIEDEMANN erarbeitete Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf einer einspurigen Straße. Die modellhafte Nachbildung des Bewegungsablaufs erfolgt bei WIEDEMANN zeitorientiert im 1 s-Takt.

Im vorliegenden Modell "KREUZEN" wurde die Betrachtungsweise der Bewegungsabläufe auf der nicht bevorrechtigten Straße derart modifiziert, daß eine ereignisorientierte Betrachtungsweise mit einem minimalen Ereignisabstand von 0,3 s gewählt wurde.

Das Simulationsprogramm KREUZEN und weiterführende Erläuterungen zur Handhabung des Programmes sind in der Programmbibliothek des Instituts für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe einzusehen.

4.3.1 Aufbau der fahrer- und fahrzeugspezifischen Elemente

Die Fahrzeuge im Hauptstrom und im Nebenstrom werden im Simulationsmodell in kinematischer Hinsicht unterschiedlich behandelt. Die fahrer- bzw. fahrzeugspezifischen Kenngrößen der Fahrzeuge im Haupt- und Nebenstrom sind im folgenden, soweit es zum Verständnis notwendig ist, kurz erläutert:

Bevorrechtigte Fahrzeuge (CLASS BFAHRER):

Für die Fahrzeuge im Hauptstrom wird angenommen, daß sie sich für einen Untersuchungsfall alle mit gleicher konstanter Geschwindigkeit bewegen. Die Zeitlücken zwischen den einzelnen Fahrzeugen sind exponentialverteilt mit einer minimalen Zeitlücke von 2 s (verschobene Exponentialverteilung). Sowohl die Geschwindigkeit der Fahrzeuge als auch der Mittelwert der Zeitlückenverteilung können im Input des Simulationsprogramms variiert werden.

Nicht bevorrechtigte Fahrzeuge (CLASS NFAHRER):

Die Berechnung der Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position eines nichtbevorrechtigten Fahrzeugs werden in den Prozeduren "REAKTION AUF DEN VORDERMANN", "FREIES FAHREN BIS ZUM BREMSPUNKT", "VERZÖGERTES FAHREN BIS ZUM SICHTPUNKT", "VERZÖGERTES FAHREN BIS ZUM STILLSTAND" und "KREUZEN" nach dem in Abb. 3-1 dargestellten Schema durchgeführt.

Die zentrale Größe ist bei diesen Berechnungen die Beschleunigung bzw. Verzögerung des betrachteten Fahrzeugs. Sie erfolgte nach Abfrage der Wahrnehmungsschwellen bei einem vorhandenem Vordermann (Kap. 4.3.2) oder bei fehlendem Vordermann nach Abfrage des Abstands des betrachteten Fahrzeugs vom Kollisionsbereich durch Einsetzen der Relativgrößen (z.B. Geschwindigkeitsdifferenz, Abstand) in die Bewegungsgleichungen für die gleichförmige und gleichförmig beschleunigte Bewegung.

4.3.2 Zufallsgeneratoren - Reaktions- und Entscheidungsmechanismen

Für die Festlegung von bestimmten fahrer- bzw. fahrzeugspezifischen Kenngrößen werden Zufallsgeneratoren eingesetzt, um die stochastischen Einflüsse im Verkehrsgeschehen im Simulationsmodell "KREUZEN" nachbilden zu können.

Zusätzlich von den von WIEDEMANN eingeführten fahrer- bzw. fahrzeugspezifischen Kenngrößen der Fahrer-Fahrzeug-Elemente, werden im Simulationsmodell "KREUZEN" noch solche Kenngrößen benötigt, die das Verhalten des Nichtbevorrechtig-

ten an einer vorfahrtsregeltem Kreuzung beschreiben. Es sind dies zum einen die positiven bzw. negativen potentiellen Zeitdifferenzen als Entscheidungskriterium für das Kreuzen, zum anderen die vom Verkehrsgeschehen abhängigen Beobachtungszeiten des Nichtbevorrechtigten nach links bzw. nach rechts (s. Kap. 3).

Berechnung der potentiellen Zeiten im Simulationsmodell "KREUZEN"

Bevorrechtigter Fahrer:

Die potentielle Zeit des Bevorrechtigten t_{pB} wird nach Gleichung 4.2 berechnet.

$$t_{pB} = \frac{x_B}{v_B} \quad (v_B = \text{const}) \quad (4.2)$$

mit

x_B = Abstand des bevorrechtigten Fahrzeugs von der Vorderkante des Kollisionsbereichs,

v_B = Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugs.

Nicht bevorrechtigter Fahrer:

Die Berechnung der potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten zum Befahren des Kollisionsbereichs erfolgt bei Zugrundelegung einer gleichförmigen oder gleichförmig beschleunigten Bewegung nach Gleichung 4.3:

$$t_{pNs} = -\frac{v_F}{b_F} + \sqrt{\left(\frac{v_F}{b_F}\right)^2 + \frac{2 \cdot x_F}{b_F}} \quad (b_F \neq 0) \quad (4.3)$$

mit

v_F = aktuelle Geschwindigkeit des nicht
bevorrechtigten Fahrers,

x_F = Abstand der Hinterkante des nicht bevor-
rechtigten Fahrzeugs vom jenseitigen
Ende des Kollisionsbereichs,

b_F = mögliche Beschleunigung oder Verzögerung
des nicht bevorrechtigten Fahrzeugs
(normalverteilt zwischen 1.0 und 3.0 m/s²).

Die Entscheidung zum Kreuzen erfolgt im Simulationsmo-
dell nach dem in Kap. 3.3 vorgestellten Modell der po-
tentiellen Zeiten. Die potentielle Zeitdifferenz, d.h.
der potentielle Zeitvorteil bzw. Zeitnachteil des Nicht-
bevorrechtigten gegenüber dem Bevorrechtigten bis zum
Erreichen des Kollisionsbereichs gilt dabei als Entschei-
dungskriterium.

Läßt die ermittelte potentielle Zeitdifferenz keinen
Kreuzungsvorgang zu, so muß sich der Nichtbevorrechtig-
te gegenüber der folgenden Zeitlücke im Hauptstrom ent-
scheiden. Das Entscheidungskriterium zum Kreuzen bein-
hältet demnach je nach Verkehrssituation entweder die
Bildung einer potentiellen Zeitdifferenz und die Abfrage,
ob diese positiv oder negativ ist oder den Vergleich der
potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten mit den an-
gebotenen Zeitlücken im Hauptstrom.

Berechnung der Einzelbeobachtung

Die Berechnung der Einzelbeobachtung TB erfolgt entsprechend der in Kap. 3.5.3.2 beschriebenen Verteilungsfunktion F nach Gleichung 4.4:

$$TB = - \overline{TB} \ln (1-F) \quad (4.4)$$

mit

TB = Beobachtungszeit,

\overline{TB} = Erwartungswert der Beobachtungszeit,

F = Wert der Verteilungsfunktion.

Der Wert F der Verteilungsfunktion liegt zwischen 0 und 1 und ist im Rechenprogramm über einen zwischen 0 und 1 gleichverteilten Zufallsgenerator eingebracht. Je nach dem Wert der Größe AFHZ wird ebenfalls der Erwartungswert \overline{TB} nach der folgenden Tabelle gewählt:

AFHZ	\overline{TB}_{li}	\overline{TB}_{re}
0	1.0	0.7
1	2.0	1.4
≥ 2	3.0	2.1

Die Umsetzzeit zwischen zwei Beobachtungen links/rechts ist deterministisch mit 0.5 s im Programm eingebracht.

Wahrnehmung - Entscheidung - Reaktion

Es werden grundlegend zwei Arten von Wahrnehmungs- und Entscheidungsmechanismen unterschieden. Der erste Mechanismus bezieht sich auf das Erkennen von Relativgeschwindigkeiten aufgrund des Eindrucks von der Größenänderung des betrachteten Objekts, während der zweite Mechanismus sich auf die Wahrnehmung und Entscheidung bezüglich der Fahrzeuge im Hauptstrom bezieht.

Eine ausführliche Beschreibung des zuerst genannten Mechanismus erfolgte bereits in Kap. 3.4. Er wird im Simulationsmodell ausschließlich dazu herangezogen, im nicht bevorrechtigten Fahrzeugstrom Reaktionen auf ein vorausfahrendes Fahrzeug auszulösen (s. Prozedur REAKTION).

Die Prozedur REAKTION (Abb. 4-2) beinhaltet etwas modifiziert die Abfragen für die kinematischen Relativgrößen bezüglich des Vordermanns des betrachteten nicht bevorrechtigten Fahrers nach dem von WIEDEMANN vorgestellten Modell (Abb. 4-3). Je nach dem aktuellen Zustand bezüglich Abstands- und Geschwindigkeitsdifferenz gegenüber dem Vordermann wird vom betrachteten Nichtbevorrechtigten eine Zielbremsung auf ein schon beinahe stehendes Fahrzeug (BREMSAX), eine Verzögerung auf einen gewünschten Folgeabstand (BREMSBX), oder ein Folgevorgang bezüglich des Vordermanns (FOLGEN) durchgeführt.

Der zweite Mechanismus bezieht sich auf die Wahrnehmung und Entscheidung bezüglich der Fahrzeuge im Hauptstrom. In Abb. 4-4 ist dieser Mechanismus schematisiert dargestellt. Da das Simulationsmodell unter dem Aspekt "sicheres Fahren" erstellt ist, wird für die Wahrnehmung der Fahrzeuge im Hauptstrom davon ausgegangen, daß jedes Fahrzeug, das sich im Sichtbereich aufhält, auch gesehen wird. Somit beschränkt sich die Wahrnehmung

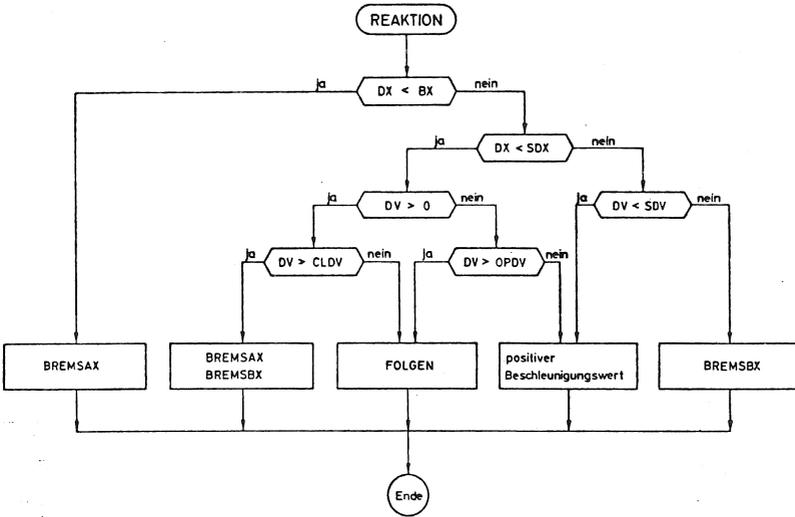


Abb. 4-2: Prozedur "REAKTION"

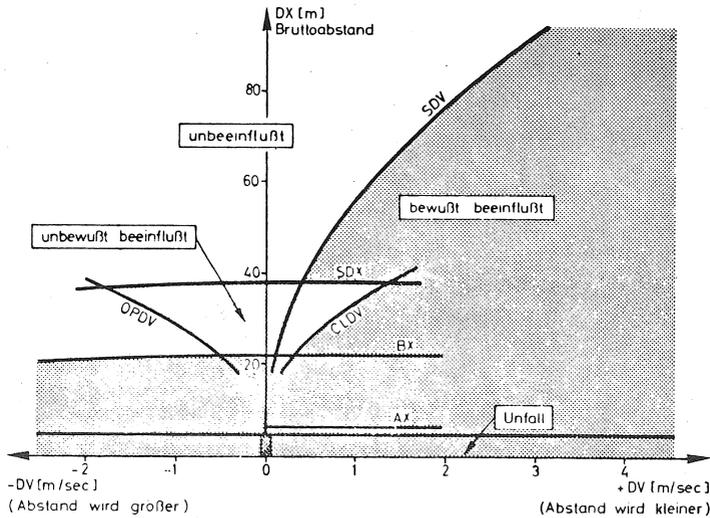


Abb. 4-3: Wahrnehmung und Entscheidung (nach WIEDEMANN)

bezüglich des Hauptstroms im Simulationsmodell "KREUZEN" zunächst auf die Frage, wieviel Fahrzeuge sich im relevanten Sichtbereich befinden (wie groß ist AFHZ?). Entsprechend wird nach der o.g. Tabelle die Größe \overline{TB} gewählt und die Beobachtungszeit nach Gleichung 4.4 bestimmt. Danach wird festgestellt, ob in dem bevorrechtigten Fahrzeugstrom von links bzw. von rechts eine zum Kreuzen genügend große potentielle Zeit oder Zeitlücke vorhanden ist.

In der darauffolgenden "Durchschnittsbildung" wird geprüft, ob diese gefundenen Zeitintervalle im linken und rechten bevorrechtigten Fahrzeugstrom im Kollisionsbereich einen gemeinsamen Durchschnitt besitzen oder disjunkt sind. Im ersten Fall wird getestet, ob der ermittelte Durchschnitt genügend groß ist, um einen Kreuzungsvorgang zu ermöglichen. Fällt dieser Test negativ aus, so wird das Kreuzungsvorhaben vorläufig aufgegeben und der Algorithmus neu aufgerufen. Bei positivem Test wird nach Beendigung der Beobachtung die Kreuzung passiert. Sind die Zeitlücken disjunkt, wird geprüft, ob eine der gefundenen Zeitlücken für sich einen Kreuzungsvorgang zuläßt. Ist das Ergebnis positiv, wird zum frühest möglichen Zeitpunkt, d.h. nach Beendigung der Beobachtungen, die Kreuzung passiert. Ist das Ergebnis negativ, so wird wie schon bei der "Durchschnittsbildung" verfahren und der Algorithmus neu aufgerufen.

4.4 Konzeption der Auswerteprogramme

Die Auswerteprozeduren sind soweit möglich und sinnvoll vom Simulationsprogramm getrennt und in einem eigenen externen Auswerteprogramm zusammengefaßt. Die für die Auswertung benötigten Daten werden in codierter Form auf einer Datei zwischengelagert. Der Nachteil der hierdurch verursachten erhöhten Ausgabezeit wird dadurch aufgewogen, daß die Auswertung der durch Simulation gewon-

nenen Daten getrennt und unabhängig von den eigentlichen Simulationsläufen durchgeführt werden kann. Es ist so möglich, die Auswertung nach verschiedenen Gesichtspunkten vorzunehmen, ohne jedesmal einen neuen Simulationslauf durchführen zu müssen.

4.5 Simulationstechnische Untersuchungen

Durch die empirischen Untersuchungen konnte die Frage weitgehend geklärt werden, welche Beobachtungsstrategien der nicht bevorrechtigte Fahrer an der Kreuzung entwickelt und welche quantitativen Zusammenhänge zwischen der Beobachtungszeit und den Verkehrs- bzw. Sichtverhältnissen in erster Näherung bestehen. Auf der Basis der bisher gewonnen empirischen Ergebnisse kann jedoch wegen der Instationaritäten des Verkehrsflusses selbst für die Dauer einer Testfahrt keine Aussage über die Auswirkungen der Verkehrs- und Sichtverhältnisse an Kreuzungen auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße gemacht werden. Um auch diesen Teil der Untersuchungen abzudecken, wurden Simulationsläufe mit unterschiedlichen, aber je Lauf konstant gehaltenen Eingabegrößen durchgeführt. Die Parametervariation beschränkte sich auf die Inputgrößen

- Sichtverhältnisse (Gehwegbreite),
- Verkehrsstärke im Hauptstrom,
- Geschwindigkeit im Hauptstrom.

Bei allen Simulationsläufen betrug die Simulationsdauer 1200 Sekunden, von denen jeweils ein Intervall von 1000 Sekunden ausgewertet wurde.

4.5.1 Einfluß der Sichtverhältnisse an der Kreuzung auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße

Für die simulationstechnischen Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen wurde angenommen, daß die Kreuzung bis an die Gehwegbreite hoch bebaut ist, so daß sich bei Vorgabe einer gewünschten Sichtweite in die bevorrechtigte Straße der Sichtpunkt XUS in Abhängigkeit von der Gehwegbreite leicht berechnen läßt.

Die Sichtverhältnisse wurden im Simulationsmodell in der Form variiert, daß die Gehwegbreite auf der bevorrechtigten und nicht bevorrechtigten Straße ausgehend von 6 m in 3-m-Intervallen bis auf 30 m vergrößert wurde. Für jede dieser Gehwegbreiten wurden Simulationsläufe durchgeführt, wobei die Gesamtbelastung des Hauptstroms, ausgehend von 0 Fhz/h in 200 Fhz/h-Intervallen, bis auf 1400 Fhz/h erhöht wurde. Die Input-Verkehrsstärke auf der nicht bevorrechtigten Straße lag zwischen 700 und 900 Fhz/h. Die in diesem Zusammenhang für die Auswertung interessante Größe war die maximal mögliche Belastung des Nebenstroms in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen oder mit anderen Worten in Abhängigkeit von der Lage des Sichtpunktes XUS.

In Abb. 4-5 sind die Simulationsergebnisse graphisch dargestellt. Man sieht deutlich, daß bei abnehmender Belastung des Hauptstroms die ermittelten Kurven auffächern. Erklärbar ist dies mit der Vorverlagerung des Sichtpunktes und damit verbunden mit der Vorverlagerung des Zeitpunktes der Entscheidung zum Kreuzen. Die Zeitverluste, die bei schlechten Sichtverhältnissen an Kreuzungen durch notwendige Beobachtungen im unmittelbaren Kreuzungsbereich bei Stillstand des Nichtbevorrechtigten auftreten, fallen bei

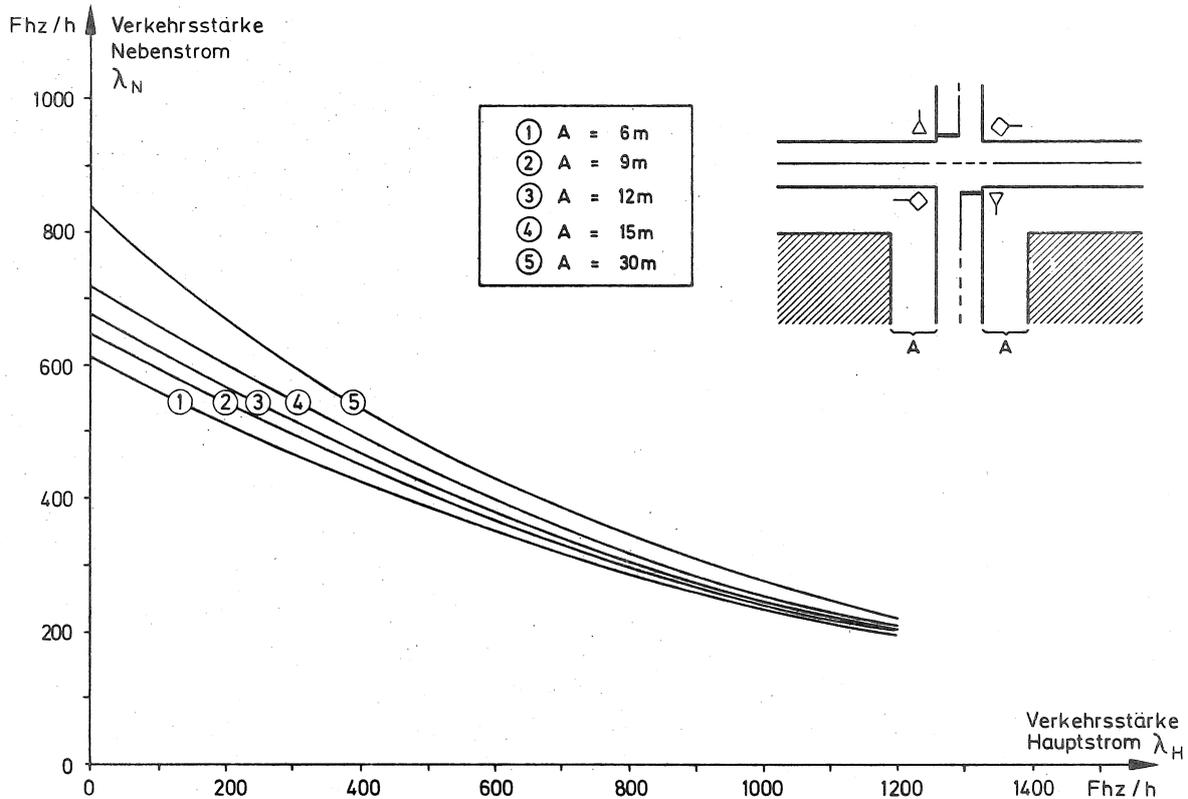


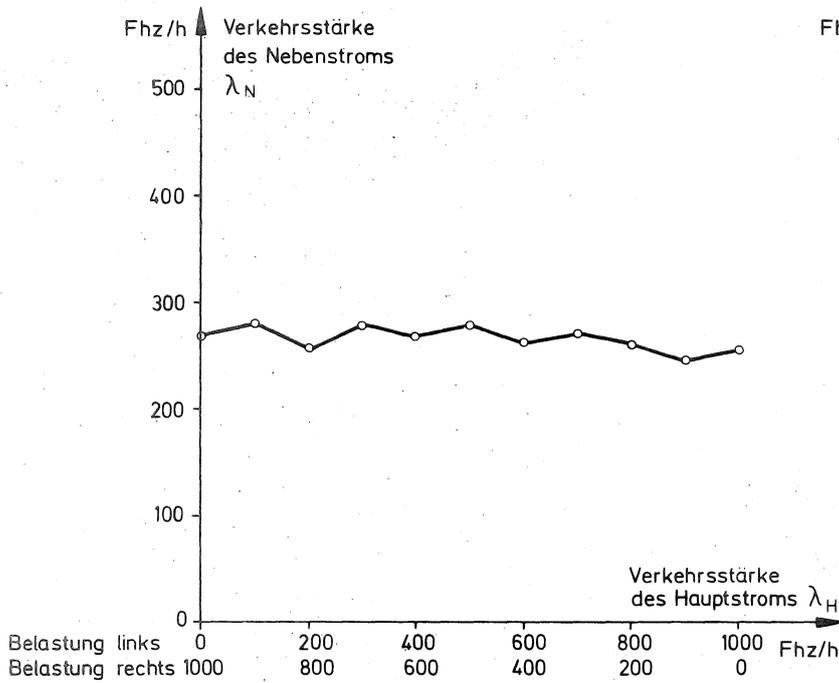
Abb. 4-5: Maximal zulässige Verkehrsstärke des Nebenstroms in Abhängigkeit von den Sichtverhältnissen

Vorverlegung des Sichtpunktes nicht mehr so stark ins Gewicht, da dann die Beobachtung des Hauptstroms noch während der Annäherung an die Kreuzung, d.h. in Bewegung erfolgen kann. Dabei können von Nichtbevorrechtigten zum einen kleinere im Hauptstrom angebotene Zeitintervalle zu einem Kreuzungsvorgang genutzt werden, zum anderen kann bei einer zu kleinen Zeitlücke im Hauptstrom die nächste oder übernächste genügend große Zeitlücke im Hauptstrom ohne vorheriges Halten für einen Kreuzungsvorgang angenommen werden.

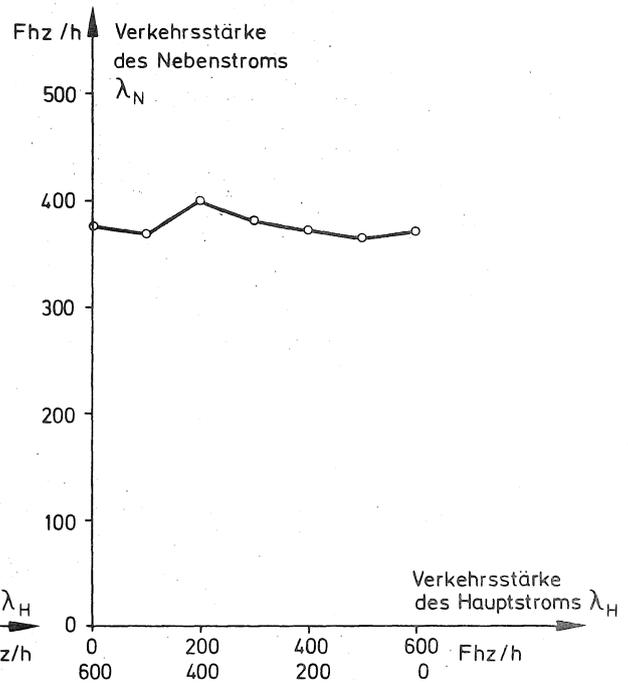
Bei größeren Belastungen im bevorrechtigten Fahrzeugstrom ist der Einfluß der Sichtverhältnisse nicht mehr so ausgeprägt. Dies erscheint auch plausibel, da bei höheren Belastungen unabhängig von den Sichtverhältnissen allein aufgrund der Verkehrsverhältnisse oft ein Halten vor dem Kreuzungsvorgang notwendig wird.

4.5.2 Einfluß der Belastung des bevorrechtigten Fahrzeugstroms auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße

Bei den Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße in Abhängigkeit von der Belastung des Hauptstroms hatte der Sichtpunkt XUS einen Abstand zwischen 20 und 40 m vom Kollisionsbereich. Es wurde zunächst eine Reihe von Simulationsläufen durchgeführt, die klären sollten, inwieweit eine Asymmetrie der Verkehrsstärke des Hauptstroms einen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße hat. Die Ergebnisse sind in Abb. 4-6 dargestellt. Es zeigt sich, daß asymmetrische Hauptstromverhältnisse keinen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße haben. Es wird deshalb in den weiteren Simulationsläufen immer von symmetrischen Hauptstromverhältnissen ausgegangen.



$\lambda_{Hges} = 1000$ Fhz/h



$\lambda_{Hges} = 600$ Fhz/h

Abb. 4-6: Maximal zulässige Verkehrsstärke des Nebenstroms in Abhängigkeit von asymmetrischen Hauptstromverkehrsstärken

Die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße von der Gesamtbelastung des Hauptstroms ist in Abb. 4-7 graphisch dargestellt. Vergleichsweise sind die entsprechenden Kurven von DORFWIRTH, HARDERS, JESSEN und SIEGLOCH unter der Annahme eines stationären Hauptstroms und bei einer Grenzzeitlücke von $t_g = 6$ s eingezeichnet. Der gegenüber den übrigen Kurven etwas flachere Kurvenverlauf der Simulationsergebnisse kann wie folgt erklärt werden:

Bei den in Kapitel 4.1 erwähnten Simulationsmodellen wird davon ausgegangen, daß jede genügend große Zeitlücke oder potentielle Zeit, die im Hauptstrom angeboten wird, auch tatsächlich zu einem Kreuzungsvorgang genutzt wird. Dieses Kriterium führt auch zu den hohen Leistungsgrundwerten für die nicht bevorrechtigte Straße bei geringer Belastung des Hauptstroms und kann so nur annähernd bei keinerlei Sichtbeschränkung des nicht bevorrechtigten Verkehrsstroms in der Realität erreicht werden.

Im Simulationsmodell "KREUZEN" kann nun der Fall eintreten, daß zwar eine genügend große Zeitlücke gefunden wird, daß jedoch zum Feststellen dieser Zeitlücke, d.h. durch notwendige Beobachtungen so viel Zeit verloren geht, daß diese gefundene Zeitlücke für einen Kreuzungsvorgang nicht mehr genutzt werden kann.

Überträgt man diesen Sachverhalt, der auch bei den empirischen Untersuchungen festgestellt wurde, auf die auf das Grenzzeitlücken-Modell gestützten Verfahren, so kommt diesem Zeitverlust durch Beobachtungen eine Erhöhung der Grenzzeitlücke um etwa 1 bis 2 Sekunden gleich. Bei Anwendung des von SIEGLOCH entwickelten Modells entsprechen die Zeitverluste durch Beobachtung einem Ansteigen der Nullzeitlücke in der gleichen Größenordnung.

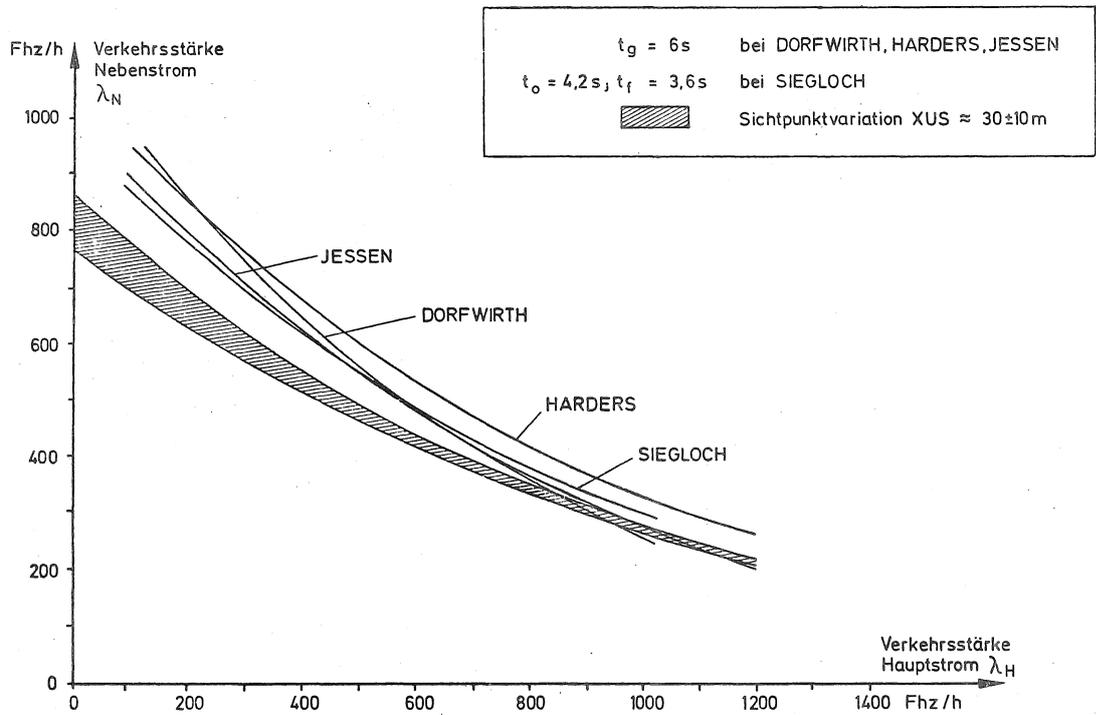


Abb. 4-7: Maximal zulässige Verkehrsstärke des Nebenstroms in Abhängigkeit von der Hauptstromverkehrsstärke

4.5.3 Einfluß der Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugstroms auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße

Durch diesen Teil der Untersuchungen sollte die Frage beantwortet werden, ob und gegebenenfalls in welchem Umfang die Geschwindigkeit auf der bevorrechtigten Straße die Leistungsfähigkeit der Nebenstraße beeinflusst. Bei einer fest vorgegebenen Sichtweite in die bevorrechtigte Straße werden durch die Erhöhung der Geschwindigkeit die im Hauptstrom angebotenen potentiellen Zeiten im Mittel kleiner, so daß bei steigender Geschwindigkeit des Hauptstroms mit einem Abfall der Leistungsfähigkeit der Nebenstraße zu rechnen ist.

Für Gesamtbelastungen des Hauptstroms von jeweils 400 Fhz/h, 800 Fhz/h, 1200 Fhz/h und 1600 Fhz/h wurde die Geschwindigkeit des Hauptstroms in dem Bereich von 30 bis 80 km/h variiert. Die Input-Verkehrsstärke des nicht bevorrechtigten Fahrzeugstroms war konstant und betrug 700 Fhz/h. Die Gehwegbreiten der bevorrechtigten und der nicht bevorrechtigten Straße waren bei jedem Simulationslauf 6 m.

In Abb. 4-8 sind die Ergebnisse der Simulationsläufe mit Geschwindigkeitsvariation graphisch dargestellt. Bei geringen Hauptstrombelastungen (≤ 400 Fhz/h) hat die Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugstroms keinen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit der Nebenstraße. Bei größeren Belastungen (> 400 Fhz/h) nimmt die Leistungsfähigkeit mit zunehmender Geschwindigkeit leicht ab. Die o.g. Erwartungen wurden zwar durch die Ergebnisse der Simulationsläufe von der Tendenz her bestätigt, jedoch sind die Unterschiede hinsichtlich der Leistungsfähigkeitswerte zu gering, um daraus verkehrstechnische Konsequenzen bzw. Maßnahmen ableiten zu wollen.

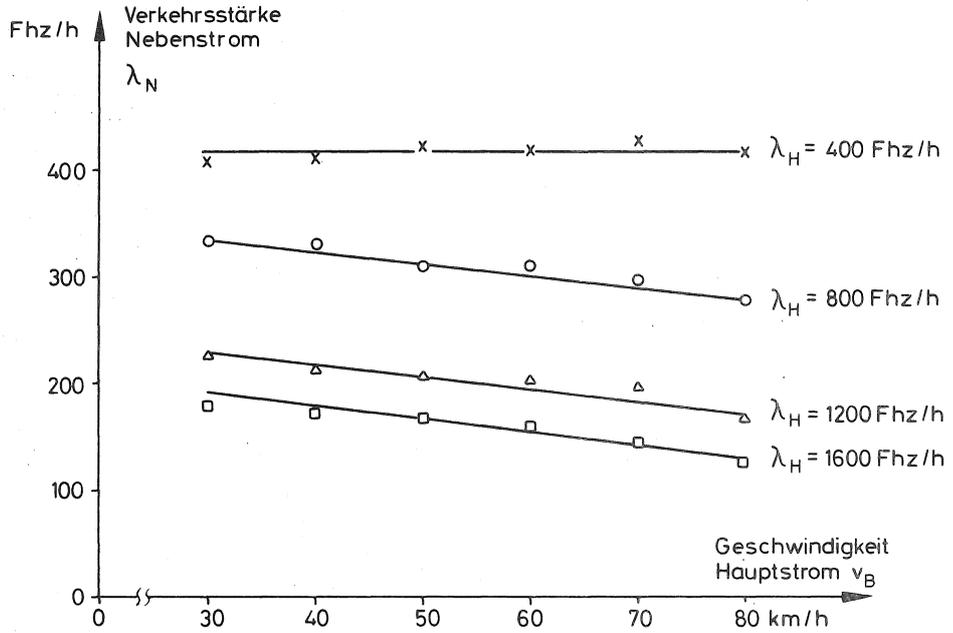


Abb. 4-8: Maximal mögliche Verkehrsstärke des Nebenstroms in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Hauptstroms

4.6 Zusammenfassende Bemerkungen zu den simulationstechnischen Untersuchungen

Nach Erstellung des Simulationsmodells mußten zunächst quantitative Vergleiche zwischen dem in der Realität gemessenen Verhalten und dem Verhalten im Simulationsmodell angestellt werden, um damit eine erste Kalibrierung des Modells vorzunehmen. Nachdem die entsprechenden Eichkurven, die es ermöglichen, das Beobachtungsverhalten und Verzögerungsverhalten im Bereich der Kreuzung quantitativ zu beschreiben, ermittelt waren, wurden diese Kalibrierungsfunktionen, um der Zufälligkeit des Verkehrsgeschehens gerecht zu werden, mit Zufallsgeneratoren belegt, im Simulationsmodell eingebracht.

Die Entscheidung zum Kreuzen oder Nichtkreuzen erfolgt im Simulationsmodell auf der Basis des potentiellen Zeitvorteils bzw. Zeitnachteils des Nichtbevorrechtigten gegenüber dem Bevorrechtigten. Die experimentellen Ergebnisse lassen dieses Entscheidungskriterium plausibel erscheinen.

Da das Modell unter dem Aspekt "Sicheres Kreuzen" erstellt ist, sind beim Vergleich der potentiellen Zeiten keine "Schätzfehler" zugelassen, so daß sich der Nichtbevorrechtigte aufgrund der kinematischen Gegebenheiten im unmittelbaren Kreuzungsbereich entscheidet. Die Tatsache, daß dieser Zeitvergleich stochastische Eigenschaften besitzt, wird dadurch berücksichtigt, daß die Berechnung der potentiellen Zeit des Nichtbevorrechtigten durch die Wahl normalverteilter Beschleunigungswerte erfolgt.

Der Beobachtungsmechanismus des Nichtbevorrechtigten ist entsprechend dem aus den Experimenten ermittelten

Verhalten im Simulationsmodell eingebracht. Die exponentialverteilten Beobachtungszeiten wurden durch einen Zufallsgenerator erzeugt.

Bisher in der Literatur vorgestellte Simulationsmodelle (z.B. STEIERWALD, STAMM, TONKE) gehen bei der Betrachtung der Verkehrssituation KREUZEN unter dem Aspekt der **L e i s t u n g f ä h i g k e i t** im wesentlichen von der Analyse des bevorrechtigten Fahrzeugstroms aus und untersuchen die Frage, wieviele Fahrzeuge des nicht bevorrechtigten Fahrzeugstroms eine im bevorrechtigten Fahrzeugstrom angebotene Zeitlücke für einen Kreuzungsvorgang nutzen können. Bei dieser Betrachtungsweise bleiben durch Beobachtungsaktivitäten des Nichtbevorrechtigten eventuell verursachte Zeitverluste unberücksichtigt. Ebenso erfolgt bei dieser Betrachtungsweise keine Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse an einer Kreuzung, wie zum Beispiel eingeschränkte Sichtverhältnisse, die wie bei den empirischen Untersuchungen festgestellt wurde, allein schon Wartezeiten in erster Position von bis zu 3 bis 4 Sekunden verursachen können.

Die hier vorgestellten Ergebnisse aus den Simulationsläufen zeigen, daß die Sichtverhältnisse an einer vorfahrtgeregelten innerstädtischen Kreuzung einen deutlichen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße derart ausüben, daß mit abnehmender Sichtqualität die Leistungsfähigkeit ebenfalls zurückgeht. Dies macht sich vor allem bei schwachen Hauptstromverkehrsstärken bemerkbar. Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke des Hauptstroms ergeben nicht die hohen Leistungswerte, wie z.B. nach HARDERS bei einer Grenzzeitlücke von 6 s, sondern liegen, vor allem bei niedriger Hauptstromverkehrsstärke, deutlich unterhalb dieser Werte. Erklärbar ist dies mit den Zeitverlusten, die durch notwendige Beobachtungen des Nichtbevorrechtigten im unmittelbaren Kreuzungsbereich entstehen.

5. Vergleichende Bewertung Empirie - Simulation

Empirische Untersuchungen im Straßenverkehr haben nicht selten die Aufgabe, anhand realer Gegebenheiten Gesetzmäßigkeiten aufzuzeigen und daraus

- Ansätze für theoretische Modelle,
- Bestätigung theoretischer Modelle,
- allgemeingültige Verhaltensweisen von Fahrern oder eines Kollektivs von Fahrern

abzuleiten. Der hohe Anspruch der Allgemeingültigkeit für empirische Untersuchungen kann nur mit sehr großem Meß- und Auswerteaufwand erfüllt werden. Dessen ungeachtet bleibt noch das Problem der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und, speziell im Straßenverkehr, die Instationarität des Verkehrsablaufs.

Mit Hilfe von Simulationsmodellen des Straßenverkehrs ist es möglich, den Einfluß durch den Gesetzgeber vorgeschriebener oder definierbarer, durch die Umwelt verursachter Gegebenheiten auf den Verkehrsablauf zu untersuchen. Dabei sind die Basis all dieser Modelle empirisch ermittelte Kalibrierungsfunktionen, die eine mathematische Beschreibung des Verhaltens des einzelnen Fahrers unter bestimmten Randbedingungen erlauben. Folglich bestimmt ganz entscheidend die Genauigkeit der Kalibrierungsfunktionen die Allgemeingültigkeit der durch Simulation gewonnenen Aussagen. Inwieweit Vereinfachungen der Kalibrierungsfunktionen zugunsten der Rechenzeit möglich sind, ohne die Empfindlichkeit des Modells entscheidend herabzusetzen, ist dabei von Fall zu Fall abzuklären.

In der vorliegenden Arbeit ist eine vergleichende Bewertung nicht ohne weiteres möglich, da die durch Messung

im realen Verkehrsgeschehen gewonnenen Ergebnisse mehr mikroskopischen Charakter besitzen, während die durch Simulation gewonnenen Ergebnisse mehr makroskopischen Charakter haben.

Die empirischen Untersuchungen lieferten durch Beobachtung des nicht bevorrechtigten Fahrers in seinem Fahrzeug und eine zeitsynchrone Erfassung der Daten der Fahrzeuge des bevorrechtigten Fahrzeugstroms Kalibrierungsfunktionen, die qualitative und quantitative Aussagen zum

- Beobachtungsverhalten,
- Fahrverhalten,
- Entscheidungsverhalten

des Nichtbevorrechtigten in Abhängigkeit von den verkehrstechnischen Kenngrößen des Hauptstroms zuließen. Da es für diese Untersuchungen notwendig war, Versuchspersonen einzusetzen, um Aussagen zu den einzelnen Verhaltensmustern machen zu können, ergibt sich ganz vordergründig das Problem der Allgemeingültigkeit der Ergebnisse; da es sehr schwierig sein wird, die Versuchspersonen so auszuwählen, daß sie einem sogenannten "Durchschnittsfahrer" entsprechen. Die Konsequenz wäre, viele Versuchsfahrten mit möglichst vielen männlichen und weiblichen Versuchspersonen durchzuführen. Um aber in einem zeitlich vernünftigen, vom Personalaufwand her gesehen, noch vertretbaren Rahmen zu bleiben, beschränkt man sich bei solchen empirischen Untersuchungen, bei denen der Mensch das zu untersuchende Objekt darstellt, auf die beiden Alternativen

- "viele Versuchsfahrten mit wenigen Versuchspersonen",
- "wenige Versuchsfahrten mit vielen Versuchspersonen".

In der vorliegenden Arbeit wurde der ersten Alternative der Vorzug gegeben, da bei den geplanten Versuchsfahrten der zusätzliche organisatorische und personaltechnische sowie zeitliche Aufwand bei der zweiten Alternative, wie man leicht sieht, in keinem Verhältnis zur Wirksamkeit gestanden wäre.

Die Ergebnisse aus den Simulationsläufen zeigen, daß sich die Simulation als ergänzende Methode zur rein empirischen Vorgehensweise bei Problemstellungen dieser Art anbietet. Während durch Experimente im realen Verkehrsgeschehen versucht wird, durch eine Vielzahl von Versuchen unerwünschte Randbedingungen zu eliminieren, um daraus einen quasistationären "Versuchsraum" zu schaffen, ist es mit Hilfe der Simulation relativ einfach, reproduzierbare, stationäre Zustände über einen längeren Zeitraum hinweg zu halten.

Nach ersten Erfolgen mit simulationstechnischen Untersuchungen wird jedoch sehr oft der Fehler gemacht, dem Simulationsmodell zu viel abzuverlangen. Ein Simulationsmodell kann nur so gut sein, wie die Annahmen und Randbedingungen, unter denen es erstellt wird. Genügend Sorgfalt bei der Kalibrierung des Modells erhöht die Realität der Ergebnisse und ermöglicht es, zum Beispiel bei der Simulation des Straßenverkehrs, Grenzsituationen oder Verkehrszustände zu erzeugen, die in der Realität kaum meßbar sind.

Eine vergleichende Bewertung Empirie - Simulation liefert zu dem Problemkreis der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung des Menschen als Fahrzeugführer das Ergebnis, daß zur Analyse des Systems FAHRER - FAHRZEUG - UMWELT empirische Untersuchungen notwendig sind; sie können nicht durch simulationstechnische Untersuchungen ersetzt

werden. Das Untersuchungskonzept (Versuchspersonen) solcher Forschungsvorhaben führt dabei jedoch zwangsläufig zu einer Einbuße hinsichtlich der Allgemeingültigkeit der Ergebnisse, da der Kraftfahrer im allgemeinen gewohnt ist, von einem Ort A zu einem Ort B mit seinem Fahrzeug zu gelangen und nicht wie es in den Testfahrten verlangt wird, auf einem Rundkurs zu fahren. Diesem Mangel wird versucht, durch nicht zu kurze Rundkurszyklen entgegenzuwirken. Als ergänzende Methode ergibt sich dann durch die Simulation die Möglichkeit, makroskopische Zusammenhänge im System FAHRER - FAHRZEUG - UMWELT aufzuzeigen, um daraus Maßnahmen, z.B. hinsichtlich der Leistungsfähigkeit oder Wirtschaftlichkeit eines Verkehrssystems abzuleiten.

6. Zusammenfassung

Ein hoher Prozentsatz aller Verkehrsunfälle wird durch "menschliches Versagen" verursacht. Ein Teil davon wird dadurch hervorgerufen, daß der Mensch überfordert ist, alle notwendigen Informationen aufzunehmen, zu verarbeiten und in Aktionen umzusetzen.

Die Wechselbeziehungen zwischen den FAHRER-FAHRZEUG- bzw. FAHRER-UMWELT-Elementen sind sehr vielschichtig und basieren im wesentlichen auf dem Informationsaustausch zwischen den jeweiligen Systemkomponenten. Dabei bestimmt der Mensch als schwächste Komponente dieser Wechselbeziehungen mehr oder weniger bewußt die Intensität und den Zeitbedarf für diesen Informationsaustausch. Wegen der besonderen Bedeutung des Faktors "Zeit" bei Informationsverarbeitungsprozessen ist es deshalb von Interesse, Zeitkonstanten zu bestimmen und Zeitabhängigkeiten aufzuzeigen, die den Informationsverarbeitungsprozess, in diesem Falle repräsentiert durch das Beobachtungsverhalten gegenüber optisch dargebotenen Reizen, beeinflussen.

Ziel des empirischen Teils der Arbeit war es, qualitative und quantitative Zusammenhänge zwischen der Informationsaufnahme und -verarbeitung des nicht bevorrechtigten Fahrers an einer vorfahrtgeregelten innerstädtischen Kreuzung und den verkehrstechnischen Kenngrößen des bevorrechtigten Fahrzeugstroms in der Verkehrssituation KREUZEN aufzuzeigen.

Die Ergebnisse zeigen, daß das Beobachtungsverhalten des Nicht-bevorrechtigten in charakteristischer Weise von den Sichtverhältnissen an der Kreuzung und von den Verkehrsverhältnissen im Hauptstrom abhängt. Eine Tätigkeitsanalyse für ausgewählte Tätigkeiten zeigt weiterhin, wo für den Fahrer auf der nicht bevorrechtigten Straße Belastungsspitzen auftreten.

Aus den gewonnenen Ergebnissen lassen sich Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit ableiten.

Aufbauend auf den empirischen Ergebnissen wurde ein Simulationsmodell für den Verkehrsablauf an einer vorfahrtgeregelten innerstädtischen Kreuzung erstellt, mit dem Leistungsfähigkeitsbetrachtungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der simulationstechnischen Untersuchungen veranschaulichen den Einfluß der Zeitbedarfswerte für die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen auf die Leistungsfähigkeit der nicht bevorrechtigten Straße.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag dar zur Klärung der Frage, inwieweit die Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung des Menschen als Fahrzeugführer die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Systems FAHRER-FAHRZEUG-UMWELT bestimmen. Die Ergebnisse lassen zwar erste Aussagen zu diesem Problembereich zu, die Kompliziertheit des Untersuchungsgegenstandes macht es jedoch schwierig, umfassende, allgemeingültige Konsequenzen zu ziehen.

7. Literaturverzeichnis

BAKER, G.A., GREYER, W.F.

Visual Presentation of Information,
WADC TR, 54-160, 1954, Wright-Air-Development Center
WPAFB, Ohio

BRILON, W.

Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen
Landstraßen
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 201, Bonn 1976

CHAPANIS, A.

Research Techniques in Human Engineering,
Baltimore, John Hopkins-Press, 1959

CHENCHANNA, P.

Verfahren zur Optimierung der konstruktiven Fahrzeugpa-
rameter im System Fahrer - Fahrzeug - Umwelt
Automobiltechnische Zeitschrift 76, 1974

COERS, H.G.

Aufsätze über den Verkehrsfluß - Untersuchungen nach
dem räumlich-zeitlichen Prinzip
Die Straße, Heft 6, 7 und 8, 1970

CONRAD, D.W.

The Interaction of Auditory Noise Annoyance Sensitivity
with Peripheral Visual Sensitivity
Proceedings of the 16th. Annual Meeting of Human Factors
Society: Technology for Man, Los Angeles, Oktober, 1972

DILLING, J.

Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Straßen
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 151, Bonn 1973

DORFWIRTH, R.

Wartezeit und Rückstau von Kraftfahrzeugen an nicht signal-
geregelten Verkehrsknoten
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge,
Heft 43, Kirschbaum Verlag, Bad Godesberg, 1961

DUPUIS, H.

Fortlaufende Pulsfrequenzschreibung bei Kraftfahrern und
ihre Interpretation
Beiheft 3 zur Arbeitswissenschaft mit Sonderteil Arbeits-
mittel (Mainz), 1965

EDIE, L.C.

Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions
2nd. Intern. Symposium Theory of Traffic Flow, 1963

- ERNST, R.
Verkehrsablauf an Straßenknoten - ein Beitrag zur
Bewertung der Vorfahrtbeachtung,
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 60, 1967
- FINDEISEN, H.G.
Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeu-
ge an nicht lichtsignalgeregelten Knotenpunkten
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 178, 1975
- GRABE, W.
Leistungsermittlung von nicht signalgeregelten Knoten-
punkten des Straßenverkehrs
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge,
Heft 11, Kirschbaum Verlag, Bad Godesberg 1961
- GRAMBERG, B., DANIELSEN, A.
Sehen und Verkehr
Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, 1967
- GREENSHIELD, B.D., SCHAPIRO, D., ERICKSEN, E.L.
Traffic Performance at Urban Street Intersections
Yale University, 1947
- HABERICH, F.J.
Eigenschaften unseres Auges und Verkehrsunfälle
Zeitschrift Ärztliche Fortbildung, 51, 712, 1962
- HANDSCHMANN, W., VOSS, M.
Der Mensch als Fahrzeugführer
Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Menschen,
FAT-Schriftenreihe Nr. 8, Forschungsvereinigung Automobil-
technik eV (FAT), Westendstr. 61, 6000 Frankfurt/M 17
- HARDERS, J.
Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer
Verkehrsknoten
Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 76, 1968
- HELANDER, M.
Physiological Reactions of Drivers as Indicators of Road
Traffic Demand
Transportation Research Record, 1975
- HÄKKINEN, K.
Estimation of Distance and Velocity in Traffic Situations
Report No. 3, Institute of Occupational Health, 1963
- HÖFNER, K.J., HOSKOVEC, J.
Registrieren der Blickbewegung beim Autofahren - bisherige
Forschungen
Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 19, 1973
- JESSEN, G.-D.
Ein Richtlinienvorschlag für die Behandlung der Leistungs-
fähigkeit von Knotenpunkten ohne Signalregelung
Straßenverkehrstechnik, 1968

JOHANNSEN, G.

Ein nichtlineares vielparametrisches Regler-Mensch-Modell
Dissertation, Juli 1971, Berlin

JONSSON, B.

Function of the Muscles of the Upper Limb in Car Driving
Ergonomics, 18 (4), 1975

KELLEY, CH.

Manual and Automatic Control
J. Wiley Inc. New York, 1968

KITTEL, V.

Ein augenärztlicher Beitrag zum Problem der Verkehrsunfälle
Deutsches Gesundheitswesen 10, 943, 1955

KLINGER, K.-P.

Amplitudenvariationen akustisch evozierter Potentiale
in Abhängigkeit von der Signalinformation und belastungs-
bedingter Ermüdung
Intern. Zeitschrift für Angewandte Physiologie, 31, 1973

KLIX, F.

Information und Verhalten
Verlag Hans Huber, Stuttgart

KORNHUBER, H.H.

Informationsverarbeitung im Menschen
TU Berlin, Fortgeschrittenenstudienprogramm, Automati-
sierung, Analyse und Synthese dynamischer Systeme, Nr. 44
Biokybernetik, 1972

KRAISS, K.F.

Zum Einfluß des Bewegungswiderstandes auf die Güte
manueller Regelung,
Dissertation Berlin 1970

KRAISS, K.F.

Vision and Visual Displays
Introduction to Human Engineering (Reprints), NATO Training
Course, Utrecht, Mai 1976

LECRET, F.

La conduite sur autoroute: effet de signaux lumineux sur
le niveau de vigilance
Communication au 5ème Congrès International d'Ergonomie,
Amsterdam, 1973

LEUTNER, V., WANDREY, D.

Neuropsychopharmaka in Klinik und Praxis
Schattauer, Stuttgart 1965

LEUTZBACH, W.
Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses
Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1972

MARTIN, W.
Verkehrsablauf auf Stadtstraßen
Dissertation, Karlsruhe 1975

MICHAELS, R.M.
Perceptual Factors in Car Following
Proceedings 2nd. Intern. Symposium on Theory of Traffic
Flow 1963, OECD, Paris 1965

MÜLLER-LIMMROTH, W.
Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit des Kraftfahrers
und zu ihren Grenzen
Festvortrag, Christophorus-Stiftung, HUK-Verband, Hamburg,
1977

NIEMANN, K.
Messungen und Berechnungen über das Regelverhalten von
Autofahrern
Dissertation, Braunschweig 1972

RADL, G.W.
Untersuchungen zur Quantifizierung der psychischen Be-
anspruchung bei simulierten Fahrzeugführungsaufgaben,
Anthropotechnische Mitteilungen Nr.8/69,
Meckenheim 1969

RAST-K.
Richtlinien für den Ausbau von Stadtstraßen; Teil: Kno-
tenpunkte; Abschnitt 1: Plangleiche Knotenpunkte

ROBINSON, G.H., CLARK, R.L. et al.
Visual Search by Automobile Drivers
Symposium on Psychological Aspects of Driver Behaviour,
1971

RETZKO, H.G.
Vergleichende Bewertung verschiedener Arten der Verkehrs-
regelung an städtischen Straßenverkehrsknotenpunkten
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 12, 1961

ROBINSON, D.A.
The Mechanics of Human Saccadic Eye Movements
Journal of Physiology, 1974

ROCKWELL, T.H.
Eye Movement Analyses of Visual Information Acquisition
in Driving: An Overview
North Carolina State University, Raleigh, 23 pp, 1971

SALVATORE, S.

Perception of Motion as Related to Retinal Eccentricity,
a Literature Review Injury Control Research Laboratory
Research Report ICRL-RR-70-7, USPHS, Washington, D.C.,
1970

SHANNON, C.E.

The Mathematical Theory of Communication
Urbana, 1962

SIEGLOCH, W.

Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignal-
steuerung
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 154, 1973

STAMM, J.-M.

Untersuchungen zur Festlegung von Dimensionierungsbelastungen
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, heft 218, Bonn 1976

STEIERWALD, G.

Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode in der Straßenverkehrs-
technik
Habilitationsschrift, TH Aachen, 1960

TAFEL, H.J.

Untersuchungen für ein System zur automatischen Verkehrs-
datenerfassung und Verkehrsbeeinflussung auf Schnellstraßen
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 180, Bonn 1975

TIESLER, G.

Bewegungswahrnehmung in Fahrzeugsimulatoren
Forschungsbericht 12, Meckenheim: Forschungsinstitut für
Anthropotechnik, 1973

TONKE, F.

Wartezeiten bei instationärem Verkehr an Knotenpunkten ohne
Lichtsignalanlage
Dissertation TH Darmstadt, 1978

VOSS, M.

Messung der Beanspruchung bei Informationsbelastung in
Mensch-Maschine-Systemen
IITB-Mitteilungen der Fraunhofer-Gesellschaft zur För-
derung der angewandten Forschung e.V., 1977

WIEDEMANN, R.

Simulation des Verkehrsflusses
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität
(TH) Karlsruhe, 1973

8. Anhang

Fehlerbetrachtung zu den empirischen Untersuchungen

Die Genauigkeit von Ergebnissen aus empirischen Untersuchungen hängt zum einen von den Randbedingungen ab, unter denen die Messungen stattfinden, zum anderen sind der durch elektronische und mechanische Intoleranzen an den Geräten selbst (Instrumentenfehler) und der durch Bedienungs- und Ablesefehler des Meßpersonals bedingte "Meßfehler" ein entscheidender Faktor.

Eine Beschreibung des Einflusses der Randbedingungen bei der hier vorliegenden Problemstellung auf die Genauigkeit der Ergebnisse ist nur qualitativ möglich, da unter den Überbegriff Randbedingung Begriffe einzuordnen sind, wie Motivation der Versuchsperson (VP), Bereitschaft der VP, sich der Testsituation auszusetzen, Gewöhnung der VP an das Versuchsfahrzeug, subjektiver Eindruck der Verkehrssituation auf die VP u.ä.. Darauf wird im folgenden nicht näher eingegangen, es soll nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Instrumentenfehler treten oft als regelmäßige Fehler auf, die entweder konstante oder systematische Fehler sind. Wegen ihrer Regelmäßigkeit kann man sie aber im allgemeinen feststellen und eliminieren.

Anders verhält es sich bei den durch das Meßpersonal verursachten Fehlern; sie sind unregelmäßig oder auch zufällig. Der Einfluß dieser Fehler auf die Genauigkeit der Ergebnisse hängt davon ab, ob die ermittelten Größen $f(x_i)$ direkt aus den aufbereiteten Meßdaten eines Typs x_i gewonnen werden und absolute Größen sind oder ob es sich bei den ermittelten Größen um relativierte Größen $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ handelt, die sich durch mathematische Verknüpfung von mehreren empirisch ermittelten Größen x_i unterschiedlichen Typs ergeben.

Bei der Ermittlung absoluter Größen gestaltet sich die Fehlerbetrachtung einfach, denn ein ermittelter Meßfehler von z.B. $\pm 5\%$ ergibt einen Gesamtfehler des Resultats von ebenfalls $\pm 5\%$.

Die Ermittlung des Fehlers von relativierten Größen der Form $f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ erfolgt nach der von GAUSS entwickelten Ausgleichsrechnung, z.B. unter Anwendung des sogenannten Fehlerfortpflanzungsgesetzes. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz besagt, daß sich der wahre Fehler Δf des Resultats als Linearform der einzelnen Beobachtungsfehler Δx_i darstellen läßt.

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \Delta x_n^2}$$

Im folgenden wird zu prüfen sein, ob es sich bei der ermittelten Größe um eine absolute Größe der Art $f(x_i)$ oder um eine relativierte Größe der Form $f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ handelt, um dann die entsprechende Fehlerbetrachtung durchzuführen.

Für die nachstehenden empirisch ermittelten Größen soll eine Fehlerbetrachtung durchgeführt werden:

- Dauer der Einzelbeobachtung des Nichtbevorrechtigten,
- Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge,
- Verkehrsstärke des bevorrechtigten Fahrzeugstroms,
- räumlich-zeitliche Verkehrsdichte im Hauptstrom,
- Zeitlücken und potentielle Zeiten im bevorrechtigten Fahrzeugstrom.

Dauer der Einzelbeobachtung des Nichtbevorrechtigten

Die Dauer einer Einzelbeobachtung wurde durch Auszählen der einzelnen Bilder der Filmaufnahmen aus den Messungen ermittelt. Die Filmgeschwindigkeit betrug 18 Bilder/s. Durch den Vergleich der Auswertungen gleicher Beobachtungszeiten durch fünf verschiedene Personen wurde versucht, die Genauigkeit der ermittelten Beobachtungszeiten zu bestimmen. Dabei kann der Mittelwert aus den Einzelmessungen als Schätzwert für die zu messende Größe herangezogen werden.

Beispiel:

Für die gleiche Einzelbeobachtung wurden von den o.g. Personen folgende Zeiten durch Einzelbildauswertung bestimmt:

- 1. Person TB_1 : 3,89 s
- 2. Person TB_2 : 3,94 s
- 3. Person TB_3 : 3,94 s
- 4. Person TB_4 : 4,11 s
- 5. Person TB_5 : 3,89 s

Als Schätzwert $\hat{T}B$ für die zu messende Größe TB ergibt sich

$$\hat{T}B = \frac{3,89 + 3,94 + 3,94 + 4,11 + 3,89}{5} = 3,95$$

Für den mittleren Fehler des Schätzwertes bei direkten Messungen mit "gleicher Präzision" gilt allgemein

$$\Delta \hat{T}B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TB_i - \hat{T}B)^2}{n(n-1)}}$$

Für $n = 5$ ergibt sich in dem o.g. Fall

$$\Delta \hat{T}_B = 0,041.$$

Das bedeutet, daß der aus den Mittelwerten der Einzelmessungen ermittelte Schätzwert $\hat{T}_B = 3,95$ s mit einem Fehler von $\pm 0,041$ s behaftet ist.

$$\hat{T}_B = (3,95 \pm 0,041) \text{ s.}$$

Dies entspricht einem prozentualen Fehler von 1%. Mit der Annahme, daß der mittlere Fehler des Schätzwertes konstant ist, ergibt sich bei einer Variationsbreite der Einzelbeobachtung zwischen 0,5 s und 7,0 s ein prozentualer mittlerer Fehler zwischen 0,6% und 8,2%.

Geschwindigkeit der bevorrechtigten Fahrzeuge

Die Ermittlung der Geschwindigkeit v_B der bevorrechtigten Fahrzeuge erfolgte nach der Beziehung

$$v_B = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

mit

Δs = Abstand der Induktionsschleifen auf der bevorrechtigten Straße,

Δt = Fahrzeit des bevorrechtigten Fahrzeugs für die Strecke Δs .

Die ermittelten Geschwindigkeitswerte sind demnach Durchschnittsgeschwindigkeitswerte bevorrechtigter Fahrzeuge auf der Strecke Δs .

Der Abstand der Induktionsschleifen betrug bei jeder Messung 30 m; der bei der Ausmessung der Induktionsschleifen auftretende Fehler kann mit ± 4 cm angegeben werden.

Der bei der Erfassung der Überfahrtzeitpunkte durch die Induktionsschleifen auftretende systematische Fehler wird nach TAFEL in diesem Geschwindigkeitsbereich mit maximal $\pm 3\%$ angenommen. Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich danach für den mittleren Fehler der Geschwindigkeit Δv_B bei den Einzelfehlern $\Delta s_F = \pm 0,04$ m und $\Delta t_F = \pm 0,07$ s bei einer Geschwindigkeit des bevorrechtigten Fahrzeugs von 13 m/s

$$\Delta v_B = \sqrt{\left(\frac{\Delta s}{\Delta t}\right)^2 \Delta t_F^2 + \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \Delta s_F^2},$$

$$\Delta v_B = \pm 0,39 \text{ m/s.}$$

Dies entspricht bei einem vorgegebenen Durchschnittsgeschwindigkeitswert des bevorrechtigten Fahrzeugs von 13 m/s einem prozentualen Fehler von $\pm 3\%$.

Verkehrsstärke des bevorrechtigten Fahrzeugstroms

Für die während des Kreuzungsvorgangs herrschende Verkehrsstärke im bevorrechtigten Fahrzeugstrom kann angenommen werden, daß bedingt durch die Meßanordnung und die Form der Auswertung der Fehler bei der Ermittlung der Verkehrsstärke klein ist.

Bei Zugrundelegung der Formel

$$\lambda_H = \frac{n_H}{\Delta t}$$

mit

n_H = Anzahl der Fahrzeuge im Hauptstrom, die im
Meßintervall Δt den Meßquerschnitt passieren,

Δt = Meßintervall (30 s),

für die Berechnung der Verkehrsstärke im bevorrechtigten
Fahrzeugstrom, folgt für den absoluten Fehler $\Delta \lambda_H$ nach dem
Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta \lambda_H = \sqrt{\left(\frac{n_H}{\Delta t^2}\right)^2 \Delta t_f^2 + \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \Delta n_H^2} \quad 8.1$$

mit

Δt_f = mittlerer Fehler bei der Ermittlung des
Messintervalls Δt ($\pm 3\%$),

Δn_H = mittlerer Fehler bei der Ermittlung von n_H .

Mit der Annahme $\Delta n_H = 0$ vereinfacht sich die Berechnung
von $\Delta \lambda_H$ nach Gleichung 8.1 zu

$$\Delta \lambda_H = \pm \frac{n_H}{\Delta t^2} \cdot \Delta t_f \quad 8.2$$

Daraus folgt für den prozentualen Fehler die Beziehung:

$$\frac{\Delta \lambda_H}{\lambda_H} = \frac{\Delta t_f}{\Delta t} \quad .$$

Zwischen dem absoluten Fehler $\Delta\lambda_H$ und dem Fehler Δt_F bei der Ermittlung des Meßintervalls Δt besteht ein linearer Zusammenhang; die Größe des prozentualen Fehlers bei der Ermittlung von λ_H kann somit mit $\pm 3\%$ angegeben werden.

Räumlich-zeitliche Verkehrsdichte des bevorrechtigten Fahrzeugstroms

Die räumlich-zeitliche Verkehrsdichte des bevorrechtigten Fahrzeugstroms während des Kreuzungsvorgangs wurde auf graphischem Wege ermittelt. Zur Berechnung wurde die in Kapitel 3.2 erwähnte Beziehung benutzt

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{\Delta x \cdot \Delta t} \quad . \quad 8.3$$

Mit der Annahme, daß die Intervallgrößen Δx und Δt exakt bestimmbar sind, errechnet sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz der absolute Fehler ΔK zu

$$\Delta K = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{Fi}^2}{(\Delta x \cdot \Delta t)^2} \quad 8.4$$

mit

Δt_{Fi} = mittlerer Fehler bei der Bestimmung der Δt_i .

Mit Gleichung 8.3 folgt danach für den prozentualen Fehler $\Delta K/K$ die Beziehung

$$\frac{\Delta K}{K} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{F_i}^2}{\sum \Delta t_i}} \quad 8.5$$

Mit der Annahme, daß $\Delta t_{F_1} = \dots = \Delta t_{F_n} = \Delta t_F$ ist, folgt aus 8.5 die Beziehung

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta t_F \cdot \sqrt{n}}{\sum \Delta t_i}$$

wobei n die Anzahl der Zeitintervalle Δt_i ist.

Mit einem mittleren Fehler von $\Delta t_F = \pm 0,5$ s schwankt der prozentuale Fehler zwischen 1.0 und 7.0 Prozent.

Zeitlücken und potentielle Zeiten im bevorrechtigten Fahrzeugstrom

Die angebotenen Zeitlücken und potentiellen Zeiten im bevorrechtigten Fahrzeugstrom wurden aus der Differenz der Überfahrzeitpunkte an den Induktionsschleifen bestimmt. Wegen der direkten Ermittlungsmethode liefert ein Messfehler von $\pm 3\%$ für die Überfahrzeitpunkte ebenfalls einen prozentualen Fehler der Zeitlücken und potentiellen Zeiten von $\pm 3\%$.

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: Droste, 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 bedarfsorientierten 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 Fahrzeugpuls; 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., Siegener, W.: Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten; 1969.
- Nr. 14: Haight, F.A.: Problems in Transport Safety; 1970.
- Nr. 15: Dilling, J.: Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik; 1970.

- Nr. 16: Coblentz, 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. Siegenger).
- Nr. 2: Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- und Verteilungsmodelle; Seminarbericht SS 1968.
- Nr. 3: Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpässen; 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 Fluglärms auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen; Seminarbericht SS 1976.
- Nr. 20: Kombiniertes Verkehr; Seminarbericht WS 1976/77
- Nr. 21: Koordinierung der Lichtsignalanlagen eines Straßenzuges unter Berücksichtigung des öffentlichen Personennahverkehrs; Seminarbericht SS 1977.

Im Buchhandel erhältlich:

Lenz, K.-H., Garsky, J.: Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Straßenverkehrstechnik; Kirschbaum-Verlag 1968

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

Beckmann, H., Jacobs, F., Lenz, K.-H., Wiedemann, R., Zackor, H.: Das Fundamentaldiagramm; Kirschbaum-Verlag 1973.