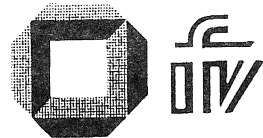


Uwe Reiter

**Simulation des Verkehrsablaufs
mit individuellen
Fahrbeeinflussungssystemen**

**INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN
UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)
PROFESSOR DR.-ING. D. ZUMKELLER**



Schriftenreihe Heft 53/94 ISSN 0341-5503

Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrbeeinflussungssystemen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Inform. Uwe Reiter
aus Sorengo (TI), Schweiz

Tag der mündlichen Prüfung: 8. Juli 1994

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Wiedemann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Uwe Köhler

Karlsruhe 1994

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe.

Danken möchte ich allen, die zum Gelingen des Ganzen beigetragen haben. An erster Stelle ist hier Herr Prof. Dr.-Ing. Rainer Wiedemann zu nennen, dem ich für die Übernahme des Referats danke. Er hat der Arbeit wichtige Impulse gegeben und mir gleichzeitig genügend Freiraum zur Realisierung gelassen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Köhler danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für alle kritischen Hinweise und Verbesserungsvorschläge.

Der empirische Teil der Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Abteilung K/EVW3 der Robert Bosch GmbH in Ettlingen. Danken möchte ich hier insbesondere Herrn Dipl.-Phys. Stefan Witte und Herrn Dr.rer.nat. Hermann Winner für ihre wohlwollende Unterstützung, für ihre kritischen Anregungen und für die Zurverfügungstellung der Meßeinrichtung. Der Hintergrund für die Modellierungsarbeiten stammte hingegen aus meiner Zusammenarbeit mit Partnern aus verschiedenen europäischen Ländern im DRIVE-I-Projekt ICARUS. Stellvertretend für alle anderen danke ich den Herren Prof. Dr. Mike McDonald und Dr. Mark Brackstone aus Southampton sowie Herrn Dr. Gösta Gynnerstedt aus Stockholm für die fruchtbare Zusammenarbeit, die eine Grundlage für diese Arbeit bildete.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch allen Kolleginnen und Kollegen am Institut, die jede/jeder auf ihre/seine Art dazu beigetragen haben, eine angenehme Arbeitsatmosphäre zu schaffen, in der vielfältige Diskussionen möglich waren und aus der Anregungen und Ansporn für das Anfertigen einer wissenschaftlichen Arbeit entspringen konnten. Danken möchte ich auch den Herren Thomas Nierlich und Ralf Traub, die mich bei den äußerst langwierigen Meßauswertungen mit großer Geduld unterstützt haben.

Ich widme die Arbeit meinen Eltern.

Karlsruhe, im September 1994

Uwe Reiter

Kurzfassung

Reiter, Uwe

Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrbeeinflussungssystemen
137 Seiten, 49 Abbildungen, 1 Tabelle, Literaturverzeichnis, 14 Seiten Anhang

Eine typische Anwendung der Simulation ist die Untersuchung von Auswirkungen, die noch nicht existierende oder noch nicht im Einsatz befindliche Systeme auf allgemeine Umweltbedingungen und -abläufe haben, so auch die Untersuchung des Einflusses, den Fahrbeeinflussungssystemen wie z.B. Abstandswarnung, Geschwindigkeitskontrolle und Fahrstreifenwechselhilfe auf den Verkehrsablauf haben. In dieser Arbeit wurde daher zunächst ein Simulationsmodell ausgewählt, das geeignet ist, den Einfluß von Fahrbeeinflussungssystemen auf das Fahrverhalten zu repräsentieren. Es handelt sich um ein mikroskopisches Modell, in dem die zu beeinflussenden menschlichen Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse hinreichend detailliert abgebildet werden.

Da die empirischen Grundlagen des ausgewählten Modells auf Messungen aus dem Jahre 1972 zurückgingen, schien es angebracht, neue Meßreihen mit einem Fahrzeug durchzuführen, das mit Sensoren für die Messung von speziell für den Fahrzeugfolgevorgang interessanten Parametern ausgerüstet war. Die Messungen wurden ausgewertet, das Modell konnte mit den Ergebnissen neu kalibriert werden. Es wurde anschließend anhand von lokal erhobenen makroskopischen Meßdaten validiert.

Zur Repräsentation des Einflusses von verschiedenen Fahrbeeinflussungssystemen auf das Fahrverhalten wurde zunächst ein generelles hierarchisches Modell entwickelt, das diesen Einfluß in mehrere, getrennt modellierbare Beeinflussungsstufen aufteilt. Dies ergibt eine leichte Veränder- und Erweiterbarkeit der einzelnen Stufen. Es wurde außerdem ein Mechanismus entworfen, mit dem das menschliche Adaptationsverhalten beschrieben werden kann, obwohl darüber in dieser Arbeit keine empirischen Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Das generelle Modell wurde daraufhin für die drei Fahrbeeinflussungssysteme konkretisiert. Die leichte Veränderbarkeit der einzelnen Stufen hat den Vorteil, daß künftige empirische Erkenntnisse, z.B. über das menschliche Adaptationsverhalten, oder die Realisierung eines konkreten Beeinflussungssystems leicht in das Modell integriert werden können.

Es wurde ein Simulationsplan entworfen, mit dem verschiedene Verkehrs- und Ausrüstungssituationen in verschiedenen Simulationsszenarien beschrieben wurden. Die Simulationsläufe konnten anschließend ausgewertet werden und der Einfluß der Systeme auf den Verkehrsfluß in Form von meßbaren Veränderungen ermittelt werden.

Summary

Reiter, Uwe

Simulation of traffic flow with systems assisting the driver

137 pages, 49 figures, 1 table, bibliography, 14 pages of annex

A typical application of simulation models is the investigation in the potential effects that not existing or not operating systems might have on general conditions or processes, as in this case the effects that systems influencing the driving behaviour individually will have on traffic flow. Examples for these systems are headway control, speed control and lane changing advice.

First of all a simulation model of traffic flow was chosen, suitable to represent the influence of the mentioned systems on driving behaviour. It is a microscopic simulation model, including a detailed representation of human perception and decisional processes as basis for human driving actions.

The empirical background of the chosen model was based on measurements from 1972. It therefore seemed appropriate to carry out new measurements using a special vehicle equipped with different sensors able to gather informations about car following processes. The measurements were evaluated and the results were used for a new calibration of the model. Subsequently the model was validated against macroscopic data from different spot measurements.

A general model was developed representing the influence of any assisting system on driving behaviour in a hierarchy of different levels. This decomposition of the influence allows a separate specification and modelling of each of the individual levels and hence results in a model that can easily be modified, adapted or extended. Within this work it was not possible to carry out extensive measurements about human adaptation to the systems of individual influence. Therefore a mechanism was designed that could still be used to represent the full range of human adaptation. The general model was then applied to the three systems, resulting in one specific model for each system of individual influence.

A simulation plan was established defining different situations concerning traffic conditions and proportions of equipped vehicles within different simulation scenarios. Simulation runs were evaluated, effects of the systems of individual influence on traffic flow were determined.

Résumé

Reiter, Uwe

Simulation du trafic routier avec des systèmes d'assistance pour les conducteurs
137 pages, 49 illustrations, 1 tableau, bibliographie, 14 pages en annexe

Des applications typiques pour les modèles de simulation sont des recherches sur les effets potentiels causés par des systèmes pas encore existants ou pas encore en utilisation concernant des conditions générales ou des procès d'environs comme dans ce cas l'analyse des effets produit par les systèmes d'assistance, qui influencent le comportement des conducteurs, sur les conditions générales du trafic routier. Des exemples pour ces systèmes sont: un système de contrôle de la distance relatif à véhicules précédants, un système de contrôle de la vitesse et des systèmes d'assistance pour changer la voie.

Tout d'abord un modèle pour la simulation du trafic routier a été choisi propre à représenter l'influence des systèmes d'assistance sur le comportement des conducteurs. Il s'agit d'un modèle microscopique, dans lequel les représentations des procès de perception et de décision du conducteur sont suffisamment détaillés pour y insérer l'influence des systèmes d'assistance.

Puisque la base empirique du modèle choisi remonte à des mesurages du 1972, il semblait convenable de faire des nouveaux mesurages en utilisant un véhicule spécial équipé avec différents capteurs pour enregistrer les procès de succession entre véhicules. Les données ont été analysées et les résultats ont été utilisées pour étalonner le modèle de base. La validation du modèle a été accompli en utilisant des données macroscopiques provenant de différents points de détection locale.

Un modèle général a été développé pour la représentation de l'influence de quelque système d'assistance sur le comportement du conducteur. C'est un modèle hiérarchique, dans lequel la représentation de l'influence est divisée en différents niveaux. Cette division permet de spécifier et de décrire chaque niveau séparément, ce qui résulte dans un modèle qui pourra être modifié, adapté et élargi facilement. Il n'était pas possible d'analyser empiriquement l'adaptation du comportement des conducteurs envers les systèmes d'assistance. Pour cette raison, c'était nécessaire de développer un mécanisme qui toutefois représente tout le domaine potentiel d'une future adaptation du comportement des conducteurs. Ensuite le modèle général a été transféré au trois systèmes d'assistance résultant dans trois modèles spécifiques.

Enfin le nouveau modèle a été utilisé pour la simulation de différentes situations de trafic et de différents degrés d'équipement des véhicules, décrit dans différents scénarios. Les simulations ont été analysées et les effets des systèmes d'assistance sur les conditions du trafic ont été déterminés.

Sommario

Reiter, Uwe

Simulazione del traffico stradale con sistemi d'assistenza per il conducente

137 pagine, 49 illustrazioni, 1 tabella, bibliografia, 14 pagine d'appendice

Un'applicazione tipica dei modelli di simulazione sono delle ricerche sugli effetti causati da sistemi inesistenti o non in impiego in relazione a condizioni generali o processi circostanti come, in questo caso, l'analisi degli effetti prodotti da sistemi d'assistenza che influenzano il comportamento del conducente sulle condizioni generali del traffico. Esempi di questi sistemi sono: un sistema di controllo della distanza rispetto ai veicoli antistanti, un sistema di controllo della velocità oppure sistemi d'assistenza per il cambio di corsia.

Prima d'ogni altro, fu scelto un modello di simulazione del traffico stradale adatto alla rappresentazione dell'influenza dei sistemi d'assistenza sul comportamento del conducente. Si tratta di un modello microscopico, nel quale le rappresentazioni dei processi percettivi e decisionali del conducente sono sufficientemente dettagliate per inserirvi l'influenza dei sistemi menzionati.

Poiché la base empirica del modello scelto risale a dati di misurazione del 1972, è sembrato opportuno eseguire nuove misurazioni usando un veicolo speciale equipaggiato con diversi sensori per raccogliere dati su processi di successione tra i veicoli. Le misurazioni furono analizzate ed i risultati vennero usati per una nuova calibratura del modello base. Poi, il modello fu convalidato, usando dati macroscopici raccolti in diverse misurazioni locali.

Un modello generico fu sviluppato per rappresentare l'influenza di qualsiasi sistema d'assistenza sul comportamento del conducente. È un modello gerarchico, nel quale la rappresentazione dell'influenza dei sistemi è suddivisa in differenti livelli. Questa suddivisione permette di specificare e di descrivere ogni livello separatamente e quindi ne risulta un modello facilmente modificabile, adattabile ed ampliabile. Non è stato possibile eseguire degli studi empirici sull'adattamento del comportamento dei conducenti in relazione ai sistemi d'assistenza. Per questo motivo si ritenne necessario sviluppare un meccanismo che rappresenti tuttavia tutto l'ambito potenziale dell'adattamento del comportamento dei conducenti. In seguito il modello generico fu convertito per i tre sistemi d'assistenza, risultando in tre modelli specifici.

Infine il nuovo modello di simulazione venne utilizzato. Differenti situazioni riguardanti condizioni di traffico e grado d'equipaggiamento dei veicoli furono descritte in differenti scenari. Le simulazioni furono analizzate e gli effetti dei sistemi d'assistenza furono così determinate.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Systeme individueller Fahrbeeinflussung	5
2.1	Beschreibung der Systeme	6
2.1.1	Abstandswarnung	8
2.1.1.1	Bisher verwendete Warnstrategien	8
2.1.1.2	Kinematischer Sicherheitsansatz	10
2.1.2	Geschwindigkeitskontrolle	12
2.1.3	Fahrstreifenwechselhilfen	14
2.2	Formen der Beeinflussung des Fahrverhaltens	15
3.	Modelle des Verkehrsflusses	17
3.1	Überblick	17
3.2	Mikroskopische Modelle des Verkehrsflusses	18
3.2.1	Modelle des Fahrzeugfolgeverhaltens	19
3.2.1.1	Kontinuierliche Fahrzeugfolgleichungen	20
3.2.1.2	Wahrnehmungsbasierte Beschreibung	21
3.2.1.3	Neuere Entwicklungen	25
3.2.2	Modelle des Fahrstreifenwechselverhaltens	27
3.3	Zusammenfassung	30
4.	Empirische Grundlagen der Modellierung	31
4.1	Mögliche Meßverfahren	31
4.1.1	Ortsfeste Meßverfahren	31
4.1.2	Bewegte Meßverfahren	32
4.2	Empirische Untersuchungen anderer Forschergruppen	33
4.2.1	Messungen des Fahrzeugfolgeverhaltens	33
4.2.2	Messungen des Fahrstreifenwechselverhaltens	36
4.3	Eigene Messungen	37
4.3.1	Beschreibung der Messungen	38
4.3.2	Auswertung der Messungen	41
4.3.3	Meßergebnisse	43
4.3.3.1	Aktionspunkte im Annäherungsverhalten	43
4.3.3.2	Aktionspunkte im Folgeverhalten	44
4.3.3.3	Minimale Folgeabstände	45
4.3.3.4	Das Beschleunigungsverhalten	47

5.	Kalibrierung und Validierung des Grundmodells	48
5.1	Nutzung empirischer Daten zur Erstellung, Kalibrierung und Validierung von Verkehrsflußmodellen	48
5.2	Modellkalibrierung	52
5.2.1	Kalibrierung der Schwelle des Annäherungsverhaltens	52
5.2.2	Kalibrierung der Schwellen des Folgeverhaltens	56
5.2.3	Kalibrierung des minimalen Folgeabstands	57
5.3	Modellvalidierung	58
6.	Modellierung des Einflusses individueller Fahrbeeinflussungssysteme	61
6.1	Bisherige Arbeiten	61
6.1.1	Felderproben von Fahrbeeinflussungssystemen	61
6.1.2	Adaptationsverhalten der Fahrer an diese Systeme	62
6.1.3	Bisherige Modellentwicklungen	63
6.2	Eigene Vorgehensweise	64
6.2.1	Modell des Einflusses der Abstandswarnung	72
6.2.2	Modell des Einflusses der Geschwindigkeitskontrolle	82
6.2.3	Modell des Einflusses der Fahrstreifenwechselhilfe	85
7.	Einsatz des Modells	89
7.1	Der Simulationsplan	89
7.1.1	Eingebaute Fahrbeeinflussungssysteme	90
7.1.2	Anteil ausgerüsteter Fahrzeuge	90
7.1.3	Form der Fahrverhaltensbeeinflussung	90
7.1.4	Verteilung der Fahrer auf Klassen der Verhaltensadaptation	90
7.2	Auswahl möglicher Auswertemethoden zur Analyse der Simulationsläufe	91
7.2.1	Ermittlung der makroskopischen Verkehrskenngrößen der Fahrbahn	94
7.2.2	Ermittlung der makroskopischen Verkehrskenngrößen der einzelnen Fahrstreifen	95
7.2.3	Ermittlung der mikroskopischen Größen	96
7.3	Auswertung und Analyse der Simulationsergebnisse	97
7.3.1	Das System Abstandswarnung	97
7.3.2	Das System Geschwindigkeitskontrolle	110
7.3.3	Der kombinierte Einsatz von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle	113
7.3.4	Das System Fahrstreifenwechselhilfe	119

8.	Zusammenfassung	123
8.1	Vorgehen	123
8.2	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse	124
8.2.1	Leistungsfähigkeit und Verkehrszustände	124
8.2.2	Reisegeschwindigkeit	126
8.2.3	Sicherheit	127
8.2.4	Fahrkomfort	128
8.2.5	Fahrstreifenaufteilung	128
8.3	Ausblick	129
9.	Literatur	131
A	ANHANG	

1. Einleitung

In verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprogrammen in Europa und Nordamerika, sowie in den Entwicklungslabors von Elektronik- und Automobilherstellern sind in den letzten Jahren verstärkt Systeme in Entwicklung und Erprobung, die geeignet sind, das individuelle Verkehrsverhalten in unterschiedlichen Formen zu beeinflussen. Dabei handelt es sich entweder um Systeme, die direkt im Fahrzeug installiert sind, oder um ortsfeste Systeme, die sich z.B. in der Wohnung, am Arbeitsplatz oder an einer Haltestelle des öffentlichen Personennahverkehrs befinden.

Gründe, warum derartige Systeme zur Zeit wieder stärker untersucht werden, sind einerseits die nun zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten: leistungsfähige Rechenanlagen, Systeme der Telekommunikation und der Meßtechnik, deren Baugröße und Produktionskosten einem massenhaften Einsatz nicht mehr im Wege stehen. Diesen Möglichkeiten steht ein ständig wachsendes Verkehrsaufkommen in den industrialisierten Ländern gegenüber, dem zunehmend nicht mehr mit einer Erweiterung der Verkehrsinfrastruktur begegnet werden kann, weil dafür entweder kein Platz mehr vorhanden ist, weil ein weiterer Ausbau ökologisch nicht mehr zu vertreten und/oder politisch nicht mehr durchsetzbar wäre oder weil dafür schlichtweg die finanziellen Mittel fehlen. Diesen Kapazitäts-Engpaß hofft man mit dem Einsatz von Elektronik zumindest noch etwas hinausschieben zu können, indem es gelingt, die bereits vorhandene Infrastruktur besser auszunutzen, ein spürbares Absinken der durchschnittlichen Reisezeiten durch Verkehrszusammenbrüche zu vermeiden und trotz der zunehmenden Verkehrsleistung eine Erhöhung der Verkehrssicherheit zu erreichen.

Die in Entwicklung befindlichen Systeme sollen an ganz unterschiedlichen Punkten im Verkehrsverhalten der Bevölkerung ansetzen. Informationssysteme am Wohnort oder am Arbeitsplatz sollen die Wahl des Verkehrsmittels, die Wahl der einzuschlagenden Route, die Abfahrtszeit und wenn möglich sogar die Wahl des Fahrtziels beeinflussen. Eine Beeinflussung der Fahrtzielwahl ist in der Regel im Berufs- und Ausbildungsverkehr nicht möglich, denkbar ist eine Beeinflussung aber beim Einkaufs-, Freizeit- und Gelegenheitsverkehr. Fahrzeugseitige Systeme können ebenfalls die Wahl der Fahrtroute beeinflussen, z.B. durch Empfehlung wenig belasteter Verbindungen. Sie können dabei noch während der Fahrt dynamisch auf Veränderungen der Netzbelastungen reagieren. Dazu werden allerdings straßenseitige Meß- und Auswerteeinrichtungen benötigt, die die aktuelle Streckenbelastungen im Netz dynamisch erfassen und aufbereiten können, z.B. durch Angabe einer zu erwartenden Reisezeit auf den einzelnen Strecken. All diese Systeme können als "verkehrsplanerische" Beeinflussungssysteme bezeichnet werden, da sie den Teil des individuellen Verkehrsverhaltens beeinflussen, der mit Modellen und Maßnahmen der Verkehrsplanung untersucht bzw. beeinflußt wird.

Dem gegenüber stehen solche ausschließlich fahrzeugseitigen Systeme, die die Bewegungen eines Fahrzeugs auf einer konkreten Fahrt beeinflussen und die ent-

sprechend als "verkehrstechnische" Beeinflussungssysteme bezeichnet werden können. Bei diesen Systemen wird nur die unmittelbare Umgebung des beeinflussten Fahrzeugs berücksichtigt. Beeinflussungsmotiv ist eine Optimierung des Fahrverhaltens bezüglich dieser unmittelbaren Umgebung, unabhängig von allen verkehrsplanerischen Aspekten.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Grundlage dafür zu schaffen, die sogenannten verkehrstechnischen Systeme schon vor ihrem tatsächlichen Einsatz zu untersuchen und die potentiellen Auswirkungen der Einführung dieser Technologien abzuschätzen. Als Werkzeug der Untersuchung soll die Simulation dienen.

Zunächst werden daher im Kapitel 2 diejenigen Systeme genauer vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden sollen, die sogenannten Fahrbeeinflussungssysteme. Als Einführung wird dabei auf die historische Entwicklung eingegangen, die schon mit Untersuchungen Ende der fünfziger Jahre in den USA beginnt. Es werden bisher entwickelte Systeme, dabei verwendete Strategien und begleitende empirische Untersuchungen vorgestellt. Diese historische Entwicklung endet mit der Beschreibung derjenigen Systeme, die zur Zeit in der Diskussion sind. Die wesentlichen Systeme werden ausgewählt und deren Funktionsweise detailliert beschrieben. So vorhanden, wird auch für die speziell ausgewählten Systeme auf die historische Entwicklung eingegangen, indem die Strategien der Fahrbeeinflussung vorgestellt werden, die für diese Systeme theoretisch entwickelt bzw. praktisch erprobt wurden. Ergebnis dieser Beschreibungen ist eine kinematisch und/oder verkehrstechnisch sinnvolle Definition der zu verwendenden Strategie und der Form der Fahrverhaltensbeeinflussung für die betrachteten Beeinflussungssysteme.

Das anschließende Kapitel 3 widmet sich den Werkzeugen, die zur Untersuchung verwendet werden sollen. In einem historischen Überblick werden bereits existierende Simulationsmodelle des Verkehrsflusses vorgestellt. Die verschiedenen Ansätze werden diskutiert, diejenigen, die für diese Untersuchung eingesetzt werden können, werden daraufhin genauer beschrieben. Anschließend wird diskutiert, welche Modelle zur Bearbeitung der Fragestellung besonders geeignet sind, und es wird begründet, welche Modelle für die weitere Bearbeitung ausgewählt werden.

Werden wie bei dieser Arbeit zur Untersuchung von Umweltprozessen Modelle eingesetzt, die den interessierenden Umweltausschnitt und dort stattfindende Prozesse repräsentieren, so muß zuallererst sichergestellt werden, daß die eingesetzten Modelle die Umwelt bezüglich des Untersuchungsziels hinreichend genau nachbilden. Dieses Thema, die Erhebung und Verwendung von empirischen Daten, wird in den Kapiteln 4 und 5 behandelt.

Im Kapitel 4 wird zunächst beschrieben, welche Verfahren der Datenerhebung im Verkehrsfluß überhaupt möglich sind. Es wird beschrieben, welche empirischen Untersuchungen bisher Grundlage für die verschiedenen Stufen der Modellierung waren. Dazu werden die Messungen, die die Modellentwicklungen der in Kapitel 3 beschriebenen Modelle begleitet haben, kurz vorgestellt. Schwerpunkt dieser Vorstellung sind dabei diejenigen Messungen, die die empirische Grundlage für die

in dieser Arbeit verwendeten Modelle bildeten. Da alle diese Messungen schon länger zurückliegen, war es nötig, neue Messungen durchzuführen, um die Modelle den aktuellen Verkehrsbedingungen anzupassen. Es werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen beschrieben: Meßverfahren und Meßergebnisse.

Im Kapitel 5 wird daraufhin die Verwendung der erhobenen Daten zur Modellkalibrierung und Modellvalidierung beschrieben. Es wird zunächst diskutiert, von welcher Form die empirischen Daten sein müssen, mit denen Modelle entwickelt, kalibriert und validiert werden können. Dieser allgemeine Anspruch wird auf die Modelle des Verkehrsflusses übertragen. Hieraus ergibt sich dann, wie die erhobenen Daten konkret verwendet werden können, welche Parameter der verwendeten Modelle damit kalibriert werden können und wie das Modell validiert werden kann.

Damit ist die Grundlage der Untersuchung geschaffen: die zu modellierenden Beeinflussungssysteme sind vorgestellt, ein Simulationsmodell wurde ausgewählt, dieses Grundmodell ist auf aktuellen empirischen Daten gestützt und repräsentiert damit die Wirklichkeit vor Einführung der neuen Techniken hinreichend genau. Im nun folgenden Kapitel 6 wird beschrieben, wie der Einfluß der Beeinflussungssysteme im ausgewählten Verkehrsflußmodell nachgebildet wird. Dazu werden zunächst bisherige Arbeiten vorgestellt, angefangen mit Felderproben von Prototypen einiger Beeinflussungssysteme, wovon empirische Daten über das beeinflusste Fahrverhalten erhofft wurden, sowie praktische und theoretische Untersuchungen des menschlichen Adaptationsverhaltens und schließlich das prinzipielle Vorgehen anderer Forschergruppen bei der Modellierung des beeinflussten Fahrverhaltens. Darauf aufbauend bildet den Kern dieses Kapitels die Beschreibung eines generellen Modells des von Fahrbeeinflussungssystemen unterstützten Fahrverhaltens. Dieses generelle Modell wird daraufhin für die drei als wesentlich erkannten Systeme spezialisiert. Es wird jeweils beschrieben, wie der Einfluß jedes einzelnen dieser Systeme modelliert wird und wie dies in die ausgewählten Fahrverhaltensmodelle integriert wird. Ergebnis dieses Kapitels ist ein erweitertes Modell, mit dem das nicht beeinflusste, sowie das durch verschiedene Systeme und in verschiedenen Formen beeinflusste Fahrverhalten nachgebildet werden kann.

Trotz Felderproben und Überlegungen über das menschliche Adaptationsverhalten können noch keine endgültigen Aussagen darüber getroffen werden, welches Fahrverhalten sich nach Einführung der Fahrbeeinflussungssysteme einstellen wird. Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine empirischen Daten hierüber erhoben werden, da dazu speziell ausgerüstete Fahrzeuge oder komplexe Fahrsimulatoren benötigt worden wären, die aber nicht zur Verfügung standen. Und selbst wenn diese Versuche möglich gewesen wären, hätte damit bei vertretbarem Aufwand höchstens das kurz- und mittelfristige Adaptationsverhalten erfaßt werden können. Wie sich das Fahrverhalten langfristig ändert, kann daraus immer noch nicht mit Sicherheit abgeleitet werden. Im Modell wird dies berücksichtigt. Verschiedene Formen menschlicher Adaptation werden definiert, die Verteilung der Fahrer auf die verschiedenen Klassen der Verhaltensadaptation ist eine Eingangsgröße des Modells.

Im Kapitel 7, in dem der Einsatz des Simulationsmodells, die eigentlichen Simula-

tionsläufe, beschrieben werden, findet dieses fehlende Wissen über das menschliche Fahrverhalten Eingang. Hier werden die Simulationsszenarien beschrieben, die sich aus verschiedenen Kombinationen der Eingangsgrößen des Modells ergeben. Auch für die Parameter, die das menschliche Adaptationsverhalten beschreiben, werden verschiedene Kombinationen im Plan der Simulationsszenarien berücksichtigt. Damit wird es möglich, obwohl die menschliche Adaptation nicht exakt beschrieben werden kann, den Bereich einzugrenzen, in dem sich die Veränderungen im Verkehrsfluß bewegen werden, die sich durch Einführung der Fahrbeeinflussungssysteme ergeben. Der erste Teil des Kapitels besteht demzufolge aus der Beschreibung der Simulationsszenarien und aus der Begründung für die Auswahl. Der zweite Teil befaßt sich dann mit den Ergebnissen der Simulationsläufe. Es wird beschrieben, wie der Einfluß von Fahrbeeinflussungssystemen den Verkehrsfluß verändert und unter welchen Voraussetzungen sich spürbare Veränderungen ergeben.

Eine abschließende Bewertung der Simulationsergebnisse bildet das Kapitel 8, in dem die Ergebnisse zusammengefaßt und diskutiert werden. Dieses Kapitel enthält außerdem die Zusammenfassung der gesamten Arbeit und endet mit einem Ausblick auf künftig nötige Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet.

2. Systeme individueller Fahrbeeinflussung

Schon Ende der fünfziger und zu Beginn der sechziger Jahren wurde begonnen, über im Fahrzeug installierte Systeme nachzudenken, die den Fahrer in seinem Steuerungsprozeß unterstützen, bzw. ihm Teile der Steuerung abnehmen sollten. Die Entwicklungen bis 1962 bei der Radio Corporation of America und bei General Motors wurden von BREUNING (1962) zusammengefaßt. Er definierte ein *Schema des Fahrvorgangs*, der den gesamten Fahrer-Fahrzeug-Umgebungs-Komplex umfaßt (siehe Abb. 2-1), und anhand dessen er verschiedene Stufen der Fahrautomatisierung erklärte:

1. **Verständigung des Fahrers** (Wahrnehmung) über äußere Bedingungen, z.B. Ankündigung einer Abfahrt, Änderungen der Geschwindigkeitsbeschränkung oder auch dynamische Bedingungen wie Wetter- und Verkehrszustände (Nebel, Unfall, Verkehrsstörung).
2. **Verkehrsauswertung und Verständigung** (Entscheidung): das System wertet aktuelle Verkehrszustände automatisch aus und unterrichtet den Fahrer über die Ergebnisse in Form von Steuerungsvorschlägen, die dieser wiederum bei eigenen Entscheidungen berücksichtigen kann.
3. **Übernahme des gesamten Fahrvorgangs** (Handlung): der Fahrer wird nun nicht mehr nur unterstützt, ihm wird sogar die Steuerung der Fahrzeugbewegungen abgenommen. BREUNING beschreibt die technischen Anforderungen bei der Entwicklung automatischer Kontrollsysteme, hauptsächlich die Schwierigkeiten der automatischen Wahrnehmung. Die ersten Systeme waren mit straßenseitiger Überwachungs- und Leiteinrichtung ausgestattet. Die Probleme bei der Meßtechnik erklären, daß sich die Entwickler als erstes auf das hierfür am besten geeignete Straßensystem konzentrieren, den Autobahnverkehr.

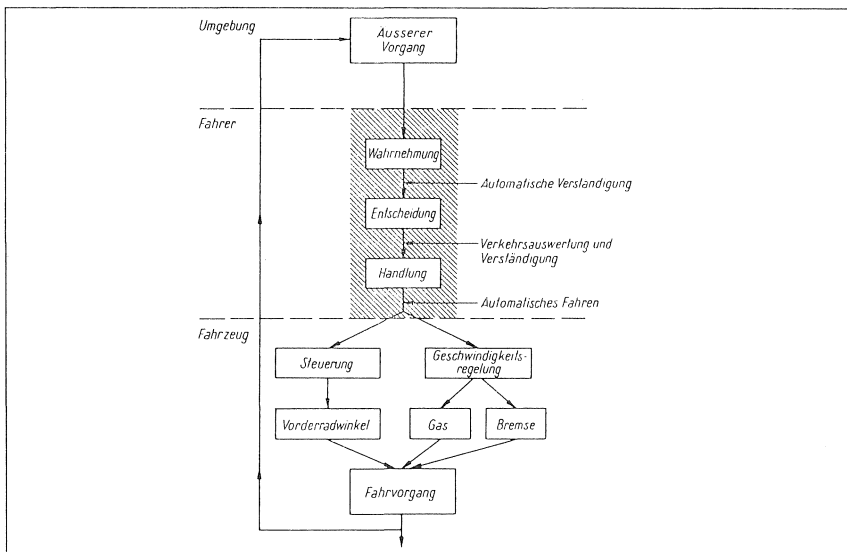


Abb. 2-1: Schema: Fahrer - Fahrzeug - Umgebung aus BREUNING (1962)

Die Überlegungen und Untersuchungen konzentrieren sich zunächst auf Systeme, die das Fahrverhalten in Längsrichtung betreffen, insbesondere auf Systeme, die den Fahrer beim Einhalten eines sicheren Abstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen unterstützen. Hierauf wird weiter unten noch ausführlicher eingegangen. In den sechziger Jahren gehen die Untersuchungen von den USA aus. In den siebziger und beginnenden achtziger Jahren beschäftigen sich auch europäische Forschergruppen mit Abstandswarnsystemen, wobei als Meßtechnik nun, wie zu dieser Zeit auch schon in den USA, auf am Fahrzeug angebrachten Sensoren aufgebaut wird, zumeist Radarsensoren, die unabhängig von straßenseitigen Einrichtungen Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zu vorausfahrenden Fahrzeugen erfassen können.

Ende der achtziger und zu Beginn der neunziger Jahre beschäftigen sich Forscher und Entwickler in den europäischen Forschungsprogrammen PROMETHEUS¹ und DRIVE² allgemeiner mit möglichen Systemen der Fahrbeeinflussung, von denen die Abstandswarngeräte nur ein, wenn auch wesentliches Beispiel sind. Eine Vielzahl dieser Systeme wird untersucht, die dort mit RTI (Road Transport Informatics), ATT (Advanced Transport Telematics) oder IVHS (Intelligent Vehicle Highway System) bezeichnet werden.

Eine kurze Übersicht über diese Systeme gibt der folgende Abschnitt. Die als grundlegend erkannten Systeme werden daraufhin genauer vorgestellt. Abschließend wird beschrieben, in welcher Form das Fahrverhalten durch die vorgestellten Systeme beeinflusst werden kann.

2.1 Beschreibung der Systeme

Die folgende Übersicht stammt aus dem DRIVE-Projekt ICARUS³ und umfaßt diejenigen Systeme, die auf Außerorts-Straßen eingesetzt werden können. In anderen Projekten, z.B. auch im Programm PROMETHEUS, werden ähnliche Systeme betrachtet, die dort aber z.T. mit anderen Namen bezeichnet werden.

- **Abstandswarnung (Headway Control)**
reguliert das Fahrverhalten in Längsrichtung, insbesondere das Abstandsverhalten zwischen den Fahrzeugen.
- **Geschwindigkeitskontrolle (Speed Control)**
reguliert das Geschwindigkeitsverhalten in Längsrichtung innerhalb eines

¹ PROMETHEUS: PROgraMme for an European Traffic System with Highest Efficiency and Unprecedented Safety

² DRIVE: Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe, 1989 - 1991

³ ICARUS: Interurban Control and Road Utilisation Simulation

Fahrstreifens, sowie Geschwindigkeitsunterschiede der Fahrzeuge auf verschiedenen Fahrstreifen.

- **Überholhilfen** (Overtaking Aids)
unterstützen den Fahrer beim Überholen auf Zwei-Richtungsstraßen durch Informationen über langsamere vorausfahrende Fahrzeuge und über Fahrzeuge im Gegenverkehr.
- **Fahrstreifenwechselhilfen** (Lane Changing Advice)
beeinflussen das individuelle Fahrstreifenwechselverhalten auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen durch Informationen über Fahrzeuge auf dem aktuellen und auf benachbarten Fahrstreifen.
- **Systeme zur Beeinflussung der Fahrstreifenaufteilung** (Vehicle Distribution Control)
regulieren die Aufteilung der Fahrzeuge aufgrund der Geschwindigkeit oder des Fahrzeugtyps auf die Fahrstreifen einer mehrstreifigen Richtungsfahrbahn.
- **Systeme zur Warnung vor Verkehrsstörungen** (Incident Warning Systems)
informieren den Fahrer über Störungen stromabwärts, beeinflussen damit u.U. die Routenwahl und harmonisieren den Verkehr im Bereich von Engpässen.
- **Fahrempfehlungen an Bus-Haltestellen** (Bus Stopping Advice)
Anderen Verkehrsteilnehmern werden rechtzeitig Empfehlungen zum Überholen/Fahrstreifenwechseln bzw. zum Reduzieren der Geschwindigkeit gegeben.
- **Verflechtungshilfen im Bereich von Ein/Ausfahrten** (Entry/Exit Guidance)
unterstützen den Fahrer beim Fahrstreifenwechsel im Bereich von Ein- und Ausfahrten: einfädeln, ausfädeln und verflechten.
- **Verkehrssteuerung an überlasteten Ausfahrten** (Overloaded Off-Ramp Control)
soll die Anzahl der Fahrzeuge beschränken, die eine schon überlastete Ausfahrt benutzen wollen.
- **Gepulkte Fahrzeuge** (Platooned Vehicles)
Es sollen Fahrzeugpuls gebildet werden, die sich nur aus Fahrzeugen mit vergleichbaren Geschwindigkeits- und Bremseigenschaften zusammensetzen (z.B. nur PKW) und die mit Hilfe von Systemen wie Abstandswarnung- und Geschwindigkeitskontrolle mit steter Geschwindigkeit und optimalen Abständen fahren.
- **Fahrstreifen für Fahrzeug-Konvois** (Convoy Lanes)
Spezielle Fahrstreifen sollen Fahrzeugen zur Verfügung stehen, die mit hohen Geschwindigkeiten und geringen Abständen in Puls fahren. Tauglich hierfür sind Fahrzeuge mit Systemen der automatischen Steuerung vom Typ Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle.

Als grundlegend für den Verkehr auf Richtungsfahrbahnen wurden drei Systeme erkannt: die Abstandswarnung, die Geschwindigkeitskontrolle und die Fahrstreifenwechselhilfe. Die anderen Systeme sind entweder Systeme, die nur für den Verkehr auf Zweirichtungsstraßen relevant sind oder sie beinhalten komplexere Steuerungsstrategien, die auf den drei Grundsystemen aufbauen. Diese drei Grundsysteme werden daher im folgenden genauer beschrieben. Es sind auch diese drei Systeme, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

2.1.1 Abstandswarnung

Systeme der Abstandswarnung werden, wie einleitend erwähnt, schon seit längerer Zeit untersucht. Ziele der Einführung dieses Systems waren neben der Entlastung des Fahrers von Anfang an eine Erhöhung der Sicherheit und der Leistungsfähigkeit.

Mit dem Einsatz von Abstandswarnsystemen sollte primär erreicht werden, daß Fahrer einen sicheren Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen einhalten. Abhängig von der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden kann der kinematisch sichere Abstand größer oder kleiner sein als der Abstand, den der Fahrer subjektiv als sicher einschätzt. In der Regel wird der Sicherheitsabstand bei höheren Geschwindigkeiten durch den Fahrer eher unterschätzt, bei niedrigeren Geschwindigkeiten hingegen eher überschätzt⁴. Bei höheren Geschwindigkeiten würde eine kinematisch sichere Fahrweise daher eher zu größeren Abständen führen.

Dennoch erhofft man sich von der Einführung dieser Systeme eine bessere Ausnutzung der Leistungsfähigkeit der Straßen. Zum einen wird die Streuung der Fahrzeugabstände reduziert und damit das Fahrverhalten insgesamt harmonisiert. Zum anderen werden die Sicherheitsabstände seltener unterschritten. Dadurch können heftige, durch zu kurze Abstände bedingte Bremsmanöver vermieden werden. Der Verkehrsablauf nahe der Leistungsfähigkeit wird stabiler, da es zu weniger Störungen und Verkehrszusammenbrüchen kommt, von denen sich der Verkehr, wenn sie erst einmal eingetreten sind, nur langsam wieder erholt. Außerdem werden die Fahrer motiviert, bei niedrigen Geschwindigkeiten die Abstände zu verkürzen und damit eine Erhöhung des Durchflusses in Engpaßsituationen oder bei erfolgten Verkehrszusammenbrüchen erreicht.

Von den genannten Zielen hängt es ab, welche Warnstrategie gewählt wird, welcher Wert als der optimale Abstand angezeigt wird. Berechenbare Größen sind der kinematisch sichere Abstand und die benötigte Verzögerung, mit der das Fahrzeug bremsen muß, wenn es sich einem langsameren vorausfahrenden Fahrzeug annähert.

2.1.1.1 Bisher verwendete Warnstrategien

ROECA und THOMAS (1963) benutzen bei ihrem Konzept zur Verhinderung von Auffahrunfällen eine Abstandsschwelle H , ab der das Fahrzeug automatisch verzögert wird. Diese Schwelle beschreibt den Abstand, ab dem eine Zielbremsung mit konstanter vorzugebender Beschleunigung A auf die Geschwindigkeit des Vorausfahrenden begonnen werden muß, um bei Abstand K die Geschwindigkeitsdifferenz auf null reduziert zu haben:

⁴ siehe z.B. WIEDEMANN (1974)

$$H = K + \frac{dv^2}{2 \cdot A} \quad (2-1)$$

mit dv der Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorausfahrenden. Für A werden verschiedene Vielfache von g untersucht: 0.02 g , 0.1 g und 0.5 g . Über den Zielabstand bei stetigem Verkehrsfluß K , auf den hingebremst wird und der dem sicheren Abstand entspricht, werden hier zunächst keine Aussagen gemacht.

COSGRIFF, ENGLISH und ROECA (1966) entwickeln ein komplexeres mathematisches Modell, in dem sie verschiedene Schwellen obigen Typs verwenden, jeweils mit unterschiedlichen Werten für A . Sie streben eine hohe Verkehrsdichte an und verwenden als Obergrenze für einen optimalen Abstand bei stetigem Verkehrsfluß einen Wert, der von der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit auf dem Fahrstreifen abhängt:

$$H [ft] = 2 \cdot v_{StSt} \quad (2-2)$$

mit v_{StSt} der mittleren Geschwindigkeit bei stetigem Verkehrsfluß (Steady State) in Fuß/Sekunde. Dies entspricht einer Zeitlücke von 2 Sekunden. Sicherheitsempfehlungen, die den Fahrern in der Bundesrepublik gegeben werden, sind von ähnlicher Art: In der Fahrschule wird empfohlen, einen Mindestabstand zu halten, der in Metern der Hälfte der Tachogeschwindigkeit (in km/h) entspricht. Dies entspricht einer Zeitlücke von 1,8 Sekunden. Die Autoversicherer empfehlen die "Methode-21-22", eine Zeitlücke von 2 Sekunden. In der Rechtssprechung wird eine Mindestlücke von 1,5 Sekunden gefordert.

LEUTZBACH, STEIERWALD, KÖHLER und ZACKOR (1975) entwickeln eine Warnstrategie basierend auf lokalen Messungen von Abständen und Geschwindigkeiten. Da sie festgestellt haben, daß die kinematisch notwendigen Abstände im Annäherungsbereich stärker unterschritten werden als im Folgebereich, werden zwei verschiedene Strategien definiert, wobei diejenige des Folgebereichs weniger streng gefaßt ist als die des Annäherungsbereichs. Im Folgebereich wird eine Strategie gewählt, die nach KÖHLER (1974) zu kolonnenstabilen Verhalten führt. Die Gleichung für die Grenzkurve des Abstands, ab der gewarnt wird, lautet:

$$\Delta x_N^F = 13,5 \cdot v_{n+1}^{0,4} \quad (2-3)$$

Im Annäherungsbereich wird ein Abstand gewählt, der den kinematisch notwendigen Bremsweg repräsentiert, wobei eine Reaktionszeit t_R von 1s angenommen wird:

$$\Delta x_N^A = v_{n+1} \cdot t_R + \frac{I}{2} \cdot \left(\frac{v_{n+1}^2}{b_{n+1}} - \frac{v_n^2}{b_n} \right) \quad (2-4)$$

Es werden verschiedene Kombinationen von Geschwindigkeiten v und Verzögerungs-

werten b des betroffenen ($n+1$) und des vorausfahrenden Fahrzeugs (n) untersucht.

In den Versuchen von LEUTZBACH, STEIERWALD, ZACKOR und JAHNKE (1981) und LEUTZBACH, JAHNKE (1981) werden autarke Abstandswarnsysteme untersucht, die als Strategie ebenfalls den kinematisch notwendigen Bremsweg verwenden (Formel 2-4).

2.1.1.2 Kinematischer Sicherheitsansatz

Zu unterscheiden ist, ob ein betrachtetes Fahrzeug einem anderen mit annähernd gleicher Geschwindigkeit folgt oder ob sich das Fahrzeug einem langsameren Vorderfahrzeug annähert. Allgemein kann ein kinematisch sicherer Abstand berechnet werden, bei dem zur Kollisionsvermeidung mit maximal möglicher Verzögerung gebremst wird. Im zweiten Fall kann zusätzlich ein Wert notwendiger Verzögerung angegeben werden, mit dem gebremst werden muß, um die Geschwindigkeitsdifferenz bei Erreichen des Sicherheitsabstands auf null reduziert zu haben. Für letzteren kann abhängig vom gewünschten Fahrkomfort ein Schwellenwert angegeben werden, der betragsmäßig geringer ist als die maximal mögliche Verzögerung. Werden Situationen, in denen die errechnete notwendige Verzögerung betragsmäßig höher ist als dieser Schwellenwert, vom System in geeigneter Form verhindert, ergibt sich ein komfortables Fahrverhalten, in dem stärkere Verzögerungen nur in Gefahrensituationen angewendet werden müssen.

Allgemein muß der kinematisch sichere Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug mindestens so groß sein, daß das Fahrzeug bei einem plötzlichen Bremsmanöver des Vorausfahrenden ohne Auffahrunfall bis zum Halt abbremsen kann. Der dazu erforderliche Brutto-Abstand setzt sich zusammen aus:

- der Fahrzeuglänge des vorausfahrenden Fahrzeugs,
- dem in der Reaktionszeit zurückgelegten Weg,
- dem eigentlichen Bremsweg und
- dem Stillstandsabstand.

Die Reaktionszeit ist die Zeit, die vom Auftreten eines Hindernisses bis zum Beginn des Bremsvorgangs vergeht. Sie setzt sich zusammen aus der Wahrnehmungszeit und der eigentlichen Reaktionszeit des Fahrers, sowie aus der Zeit für Pedalwechsel, Pedaldurchtritt und Ansprechzeit der Bremsen. Der Stillstandsabstand ist der Abstand, den haltende Fahrzeuge einhalten.

Je nach Anforderung an die Sicherheit, gibt es verschiedene Möglichkeiten einen Sicherheitsabstand zu definieren. Die strengste Definition ist die des **absolut sicheren Abstands**. Hierunter versteht man, daß das Fahrzeug innerhalb des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug zum Stillstand kommen können muß. Selbst wenn der Vorausfahrende, z.B. durch einen Unfall, unmittelbar zum Stehen kommt, genügt der absolut sichere Abstand dem Folgefahrzeug als Anhalteweg. Dieser Abstand berechnet sich für das Fahrzeug i durch:

$$\Delta x_{abs} = v_i \cdot \tau_i + \frac{1}{2} \cdot \frac{-v_i^2}{b_{i \min}} + c_i \quad (2-5)$$

mit v_i der Geschwindigkeit des Fahrzeugs, τ_i der Reaktionszeit, $b_{i \min}$ der maximalen Verzögerung und c_i der Summe aus Stillstandsabstand und Fahrzeuglänge.

Bei der Definition des **relativ sicheren Abstands** wird davon ausgegangen, daß der Vorausfahrende nicht unmittelbar zum Stehen kommen kann, sondern daß auch er eine maximal mögliche Verzögerung nicht überschreiten kann. Der Bremsweg des vorausfahrenden Fahrzeugs, das mit $i-1$ bezeichnet sei, ist daher vom Bremsweg des Fahrzeugs i abzuziehen:

$$\Delta x_{rel} = v_i \cdot \tau_i - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_i^2}{b_{i \min}} - \frac{v_{i-1}^2}{b_{i-1 \min}} \right) + c_i \quad (2-6)$$

Dabei ist $b_{i-1 \min}$ die maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs.

Für den Fall, daß beide Fahrzeuge das gleiche Bremsvermögen haben und mit annähernd gleicher Geschwindigkeit fahren, reduziert sich die Formel auf den in der Reaktionszeit zurückgelegten Weg $v_i \cdot \tau_i$ und den konstanten Abstand c_i . Diese Vorstellung ist die Grundlage für die weiter oben angesprochenen Sicherheitsabstände als reine Zeitlücken, die dort stets größer angenommen wurden als die menschliche Reaktionszeit.

Gerade bei Fahrzeugen, die mit automatischen Fahrbeeinflussungssystemen ausgerüstet sind, wäre es denkbar, daß ein Fahrzeug ständig die aktuellen Bewegungsgrößen des Vorderfahrzeugs zur Verfügung hat: x_{i-1} , v_{i-1} und b_{i-1} . Dann müßte bei der Berechnung des sicheren Abstands nicht die maximal mögliche Verzögerung des Vorausfahrenden angesetzt werden. Es würde vielmehr genügen, den aktuellen Beschleunigungswert zu verwenden. Dies führt zur dritten Definition des sicheren Abstands:

$$\Delta x_{bed} = v_i \cdot \tau_i - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_i^2}{b_{i \min}} - \frac{v_{i-1}^2}{b_{i-1 \text{ ist}}} \right) + c_i \quad (2-7)$$

Dieser Ansatz wird bei SCHNITTGER (1991) als **bedingt relativ sicherer Abstand** bezeichnet. Zu beachten ist aber, daß der momentane Wert der Beschleunigung des Führungsfahrzeugs negativ, positiv oder gleich null sein kann. Die Formel (2-7) kann nur für den Fall angewandt werden, daß das Vorderfahrzeug bremst, $b_{i-1 \text{ ist}}$ negativ ist. Dies liegt daran, daß die Formeln den Bremsweg der Fahrzeuge bis zum Stillstand beschreiben. Bei momentanen Beschleunigungswerten größer oder gleich null kommt das Führungsfahrzeug nicht zum Stehen, es kann daher kein Bremsweg errechnet

werden. Ist b_{i-1} größer oder gleich null, muß daher ein anderer Ansatz gewählt werden, z.B. die Summe aus Reaktionsabstand $v_i \cdot \tau_i$ und konstantem Stillstandsabstand c_i . Dies entspricht dann allerdings dem relativ sicheren Abstand unter der Voraussetzung, daß beide Fahrzeuge annähernd gleiche Bremsvermögen besitzen.

Die zweite errechenbare Größe ist der Wert notwendiger Verzögerung. Bei Annäherung an ein langsames Vorderfahrzeug errechnet sich die notwendige Verzögerung aus den Bewegungsgleichungen der beiden Fahrzeuge:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i_0} + v_{i_0} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot b_i \cdot t^2 & v_i &= v_{i_0} + b_i \cdot t \\ x_{i-1} &= x_{i-1_0} + v_{i-1_0} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot b_{i-1} \cdot t^2 & v_{i-1} &= v_{i-1_0} + b_{i-1} \cdot t \end{aligned}$$

Hieraus können die Gleichungen der Relativbewegung bestimmt werden, mit dem anzustrebenden Abstand $\Delta x_{\text{sicher}} = x_{i-1} - x_i$. Die Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v = v_{i-1} - v_i$ soll gegen null streben. Der aktuelle Abstand Δx_0 ist dabei noch größer als der Sicherheitsabstand Δx_{sicher} .

$$\Delta x_{\text{sicher}} = \Delta x_0 + \Delta v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot (b_{i-1} - b_i) \cdot t^2 \quad t = \frac{-\Delta v_0}{b_{i-1} - b_i}$$

Daraus folgt:

$$\Delta x_{\text{sicher}} = \Delta x_0 + \frac{\Delta v_0^2}{2 \cdot (b_{i-1} - b_i)} \quad (2-8)$$

Die notwendige Beschleunigung errechnet sich daraus zu:

$$b_i = b_{i-1} + \frac{\Delta v_0^2}{2 \cdot (\Delta x_{\text{sicher}} - \Delta x_0)} \quad (2-9)$$

2.1.2 Geschwindigkeitskontrolle

Das System Geschwindigkeitskontrolle reguliert wie die Abstandswarnung das Fahrverhalten in Längsrichtung. Auch hier sind die Ziele der Einführung eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit, eine Verkürzung der Reisezeiten sowie eine Erhöhung der Sicherheit. Aus diesen sich teilweise entgegenstehenden Zielen müssen optimale Werte der Geschwindigkeit bestimmt werden. Die Optimierungskriterien können sich sowohl auf einen Fahrstreifen als auch auf Regulierung der Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrstreifen beziehen.

Eine erhoffte Auswirkung der Anzeige einer optimalen Geschwindigkeit ist eine

Harmonisierung des Geschwindigkeitsverhaltens. Innerhalb eines Fahrstreifens soll die Streubreite der Geschwindigkeiten reduziert werden, auf den verschiedenen Fahrstreifen sollen unterschiedliche Geschwindigkeitsniveaus realisiert werden. Dies hätte wiederum zur Folge, daß es zu weniger Unregelmäßigkeiten kommt, der Verkehrsfluß insbesondere im Bereich der Leistungsfähigkeit würde stabiler. Außerdem werden durch ein geordnetes System der Geschwindigkeiten auf den verschiedenen Fahrstreifen die Anzahl unnötiger und gefährlicher Fahrstreifenwechsel reduziert, sinnvolle Fahrstreifenwechsel werden weniger riskant.

Aus diesen Vorüberlegungen lassen sich verschiedene Strategien zur Berechnung einer optimalen Geschwindigkeit entwickeln:

- **Sichere Folgegeschwindigkeit**

Sicherheit in Folgevorgängen kann neben der Empfehlung eines sicheren Abstands durch Empfehlung einer sicheren Geschwindigkeit erreicht werden. Da, wie oben gezeigt, in die Berechnung des sicheren Abstands die Geschwindigkeit unmittelbar eingeht, besteht hier ein enger Zusammenhang zwischen Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle⁵. Eine sichere Folgegeschwindigkeit errechnet sich aus der Geschwindigkeit des unmittelbar Vorausfahrenden und aus dessen Geschwindigkeitsänderungen. Diese wiederum können durch die Bewegung von Vorderfahrzeugen dieses Fahrzeugs bedingt sein. Ein heftiges Bremsmanöver des dem Vorderfahrzeug vorausfahrenden Fahrzeugs zum Beispiel wird eine Verzögerung auch des letzteren zur Folge haben. Zur Erhöhung der Sicherheit könnte die Situation vor dem Vorderfahrzeug in die Berechnung der sicheren Geschwindigkeit miteinbezogen werden, z.B. durch Mittelwerte der Geschwindigkeit mehrerer Vorderfahrzeuge oder durch Parameter wie die Verkehrsdichte vor dem Vorderfahrzeug.

- **Optimierung der Leistungsfähigkeit**

Eine Möglichkeit der Optimierung besteht darin, Fahrer mit zu hohen Abständen bei dichtem Verkehr durch Anzeige einer etwas höheren Geschwindigkeit dazu zu bewegen, näher an das Vorderfahrzeug aufzuschließen.

Eine andere Möglichkeit ist die Errechnung einer Geschwindigkeit, die zu einer optimalen Ausnutzung der Leistungsfähigkeit führt. Diese optimale Geschwindigkeit hängt vom Verkehrszustand ab, von der Verkehrszusammensetzung und von anderen Einflußgrößen wie der Straßengeometrie.

- **Einhaltung von Geschwindigkeitsbeschränkungen**

Durch Anzeige der gerade gültigen Geschwindigkeitsbeschränkungen im Fahrzeug kann der Befolgungsgrad erhöht werden, da ein Übersehen nur noch schwer möglich ist. Dies würde eine Erhöhung der Verkehrssicherheit bedeuten.

⁵ SCHNITTGER (1991) verwendet direkt eine Definition sicheren Abstands zur Berechnung einer sicheren Folgegeschwindigkeit: Er löst die Gleichung des relativ sicheren Abstands nach der Eigengeschwindigkeit v_i auf.

- **Optimierung der Geschwindigkeitsaufteilung zwischen den Fahrstreifen**
Die Unterschiede der Geschwindigkeiten auf den verschiedenen Fahrstreifen sollten nicht zu groß sein, da Fahrstreifenwechsel dadurch schwierig oder gefährlich werden. Sie sollten aber auch nicht zu klein sein, da die Fahrer sonst keinen großen Vorteil durch Fahrstreifenwechsel zu erwarten hätten, sondern die Behinderung durch langsamere Fahrzeuge kaum vermeiden könnten.
- **Harmonisierung der Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb der Fahrstreifen**
Nebeneffekt aller oben angesprochenen Strategien ist die Harmonisierung der Geschwindigkeitsverteilung durch Angabe einer optimalen Geschwindigkeit. Explizit kann dieses Ziel erreicht werden, indem die optimale Geschwindigkeit als Mittelwert der gefahrenen Geschwindigkeiten innerhalb eines Abschnitts des Fahrstreifens berechnet wird.

2.1.3 Fahrstreifenwechselhilfe

Dieses System soll den Fahrer bei der Entscheidung und Durchführung von Fahrstreifenwechseln unterstützen. Dabei sind die folgenden Ziele der Beeinflussung zu unterscheiden:

1. Erhöhung der Sicherheit von Fahrstreifenwechselmanövern
2. Erkennen von individuellen Vorteilen durch einen Fahrstreifenwechsel
3. Erkennen von globalen Vorteilen durch einen Fahrstreifenwechsel

Die Sicherheit eines Fahrstreifenwechselmanövers kann durch Erfassung der Situation auf dem angestrebten Nachbarfahrstreifen bewertet werden. Es muß überprüft werden, ob die Abstände zu dem auf dem Nachbarfahrstreifen vorausfahrenden und zu dem nachfolgenden Fahrzeug ausreichend sind. Durch Vergleich der eigenen Geschwindigkeit mit denjenigen der Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen muß ermittelt werden, ob das nachfolgende Fahrzeug durch den Fahrstreifenwechsellvorgang zu einer Verzögerung gezwungen wird, und wenn ja, wie hoch der Wert der Verzögerung ist. Dies muß auch für die eigene Bewegung in bezug auf den Vorausfahrenden auf dem Nachbarfahrstreifen berechnet werden. In beiden Fällen dürfen die zugemuteten Verzögerungen festzulegende Höchstwerte nicht überschreiten.

Auf der freien Strecke kann ein Fahrstreifenwechsel für das Fahrzeug individuell als vorteilhaft eingeschätzt werden, wenn es auf dem augenblicklichen Fahrstreifen durch ein Fahrzeug behindert wird, das langsamer fährt als die eigene Wunschgeschwindigkeit, und wenn der Grad der Behinderung auf dem Nachbarfahrstreifen wesentlich geringer ist. Hieraus folgt, daß in der Regel nur Wechsel zu schnelleren Fahrstreifen (auf dem europäischen Kontinent: nach links, wenn das "Rechtsüberholen" nicht erlaubt ist) als individuell vorteilhaft bewertet werden.

Ein Fahrstreifenwechsel kann für den Verkehrsfluß insgesamt als vorteilhaft eingeschätzt werden, wenn dadurch die Behinderung anderer Fahrzeuge reduziert

wird und/oder wenn dadurch eine bessere Fahrstreifenaufteilung erreicht wird und als Folge davon die über allen Fahrstreifen gemittelte Geschwindigkeit erhöht wird. Die Fahrstreifenwechselhilfe sollte die allgemeine Fahrstreifenpräferenz der Fahrer beeinflussen, um so eine optimale Fahrstreifenaufteilung zu bekommen: geringe Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb der einzelnen Fahrstreifen, Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen, die nicht zu groß und nicht zu klein sind (siehe 2.1.2). Bei der Empfehlung zum Wechsel zu einem langsameren Fahrstreifen sollte eingeschätzt werden, ob das Fahrzeug mit der augenblicklichen Geschwindigkeit ein Mindestzeitintervall auf dem langsameren Fahrstreifen verbleiben kann, bevor es erneut behindert wird und den Fahrstreifen wieder wechseln muß. Für die Empfehlung zum Wechseln zu einem schnelleren Fahrstreifen kann zusätzlich noch eine "Überholgeschwindigkeit" angegeben werden, mit der auf dem schnelleren Fahrstreifen gefahren werden soll, um dort die Behinderung anderer Fahrzeuge gering zu halten.

2.2 Formen der Beeinflussung des Fahrverhaltens

Eingangs wurde bereits vorgestellt, welche prinzipiellen Formen der Fahrbeeinflussung bereits in den sechziger Jahren denkbar waren. BREUNING nannte diese die verschiedenen Stufen der Fahrautomatisierung. Für die hier vorgestellten Systeme ist die erste dieser Stufen, die Verständigung des Fahrers über äußere Bedingungen, praktisch nicht von Bedeutung⁶. Die angesprochenen Systeme berücksichtigen im wesentlichen nur die unmittelbar umgebende Verkehrssituation. Die beiden anderen Stufen bleiben auch heute noch relevant. Keines der angesprochenen Beeinflussungssysteme ist im heutigen Verkehr im Einsatz. Entwickelnde Firmen halten sich sowohl bezüglich der Funktion der Systeme als auch bezüglich der Form der Beeinflussung bedeckt.

Zwei verschiedene Grundformen der Beeinflussung bleiben denkbar und müssen untersucht werden:

1. Unterstütztes Fahren

Das Beeinflussungssystem erfaßt automatisch Verkehrszustände in der unmittelbaren Umgebung des Fahrzeugs, wertet diese aus und versorgt den Fahrer mit entsprechenden Informationen. Diese Informationen stünden dem Fahrer ansonsten nicht, nicht so schnell oder nicht so präzise zur Verfügung. Sie bestehen aus Warnungen, Empfehlungen oder anderen Signalen. Der Fahrer kann die Informationen bei eigenen Fahrentscheidungen berücksichtigen. Er kann sein Fahrverhalten den Empfehlungen anpassen.
(Stufe 2 bei BREUNING)

⁶ Einzige Ausnahme ist die potentielle Berücksichtigung der aktuell gültigen Geschwindigkeitsbeschränkungen bei der Bestimmung einer optimalen Geschwindigkeit für das System Geschwindigkeitskontrolle.

2. Kontrolliertes oder automatisches Fahren

Das Beeinflussungssystem nutzt die erfaßten und ausgewerteten Informationen nun selbst und greift direkt in den Bewegungsablauf ein. Die Kontrolle des Fahrers über die Bewegungen seines Fahrzeugs wird eingeschränkt. Das Beeinflussungssystem kontrolliert entweder die gesamte Fahrzeugbewegung oder nur Teile davon. So könnte z.B. der Fahrer die Kontrolle über die Lenkung behalten, während das Beeinflussungssystem die Beschleunigung in Längsrichtung regelt.

(Stufe 3 bei BREUNING)

Neben diesen Grundformen sind Mischformen der Beeinflussung denkbar. Eine Form könnte beispielsweise so definiert sein, daß der Fahrer zunächst die volle Kontrolle über die Bewegungen seines Fahrzeugs innehat. Er wird von der Ausrüstung informiert und gewarnt, solange er sich in einem sicheren Fahrzustand befindet. Ignoriert er allerdings die Warnungen und überschreitet definierte Schwellen der Sicherheit, so wird zur Kollisionsvermeidung in das automatische Fahren umgeschaltet und vom System kann dann wenn nötig eine Notbremsung eingeleitet werden.

Die beiden Grundformen werden in den folgenden Kapiteln weiterbehandelt. Die Veränderung des Fahrverhaltens bei beiden Formen wird modelliert und in ein Verkehrsflußmodell integriert. Bei der Untersuchung der Auswirkungen auf den Verkehrsfluß wird nach diesen beiden Formen unterschieden.

3. Modelle des Verkehrsflusses

Als Werkzeug der Untersuchung soll die Simulation dienen. In diesem Kapitel wird daher zunächst erläutert, wodurch Simulationsmodelle charakterisiert sind. Es werden die verschiedenen Abstraktionsgrade bei den Modellansätzen zur Repräsentation des Straßenverkehrs vorgestellt und es wird erläutert, warum nur der mikroskopische Ansatz in Frage kommt. Die Entwicklung mikroskopischer Modelle wird daraufhin ausführlicher erläutert. Ergebnis des Kapitels wird die Auswahl eines für diese Untersuchung zu verwendenden Modells sein.

3.1 Übersicht

In einer Vielzahl technischer und wissenschaftlicher Disziplinen werden Modelle entwickelt, die Ausschnitte der Realität in geeigneter Weise nachbilden sollen. Modelliert werden dabei Objekte der Realität und Prozesse, die den Zustand des Gesamtsystems verändern. Werden diese Prozesse, die die Zustandsänderungen hervorrufen, durch ein abstraktes mathematisches Modell nachgebildet, so spricht man von einem Simulationsmodell. Eine spezielle Eigenschaft der Simulation ist, daß auch stochastische Prozesse und Zufallsgrößen modellierbar sind, die durch ein rein analytisches Modell nicht beschrieben werden können. Simulationsmodelle, werden dann eingesetzt, wenn eine entsprechende Untersuchung in der Realität entweder nicht möglich, zu gefährlich oder zu aufwendig ist oder wenn die interessierenden Größen nicht meßbar sind.

Zur Nachbildung des Straßenverkehrsflusses wurden Modellansätze auf verschiedenen Abstraktionsstufen entwickelt. Auf der obersten Abstraktionsebene stehen dabei solche Modelle, die den Verkehr als sich aus Einzelfahrzeugen zusammensetzenden Fahrzeugstrom betrachten und Verkehr nur mit den Begriffen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit beschreiben. Einzelne Fahrzeuge und deren Bewegungen werden nicht abgebildet. Verkehr wird in Analogie zu kontinuierlich fließenden Medien betrachtet und modelliert. Derartige Modelle werden **makroskopische** Verkehrsflußmodelle genannt. Beispiele hierfür sind das Autobahnsimulationsprogramm SIMONE von CREMER (1979), ein Modell zur Erklärung von Instabilitäten im Verkehrsfluß auf Autobahnen von KÜHNE (1991), sowie das Modell MAUS von VORTISCH (1992), das auf dem Modell TRANSYT aufbaut.

Die detaillierteste Form der Abbildung des Straßenverkehrsflusses besteht in der Beschreibung der Bewegungen einzelner Fahrzeuge. Es wurden verschiedene Modellansätze entwickelt, die die Bewegung einzelner Fahrzeuge in Abhängigkeit von Fahrer, Fahrzeug und Fahrzeugumfeld beschreiben. Das Fahrzeugumfeld besteht dabei im wesentlichen aus der Straße und aus anderen Verkehrsteilnehmern, die das Fahrverhalten direkt beeinflussen. Diese Modelle der fahrzeugfeinen Beschreibung des Verkehrs werden **mikroskopische** Verkehrsflußmodelle genannt. Wegen ihrer Bedeutung für diese Arbeit wird auf die mikroskopischen Modelle im folgenden

Abschnitt genauer eingegangen.

Neben den rein makroskopischen oder rein mikroskopischen Modellen wurden noch vereinzelt solche Modelle entwickelt, die keiner der beiden Gruppen eindeutig zugeordnet werden können. Sie besitzen Eigenschaften sowohl des makroskopischen als auch des mikroskopischen Ansatzes und können daher als **mesoskopische** Verkehrsflußmodelle bezeichnet werden. Ein Beispiel für diesen Ansatz ist das Modell DYNEMO von SCHWERTFEGER (1987).

Alle angesprochenen Formen der Modellierung haben ihre Berechtigung. Der Detaillierungsgrad des einzusetzenden Modells sollte immer von der Fragestellung der Untersuchung abhängen. Gegen eine zu detaillierte Modellierung spricht in der Regel der unnötig hohe Aufwand beim Modellentwurf, beim Verwenden des Modells und bei der Menge der zu erhebenden empirischen Daten. Gegen eine zu abstrakte Modellierung spricht hingegen, daß die untersuchten Prozesse nicht realistisch genug abgebildet werden, um wissenschaftliche Schlüsse daraus ziehen zu können. Allgemein kann gefordert werden, daß ein Modell um einen Grad detaillierter sein sollte als der Untersuchungsgegenstand. Wird diese Forderung nicht eingehalten, liefert das Modell keine wesentlich neuen Erkenntnisse, da nur solche Informationen gewonnen werden können, die zuvor in das Modell eingebracht wurden. Wodurch sich nun der geforderte zusätzliche Detaillierungsgrad eines Modells auszeichnet, ist im Einzelfall zu entscheiden.

Mikroskopische Modelle stellen die aufwendigste Form der Modellierung dar. In aller Regel können mit diesen Modellen nur noch kleinere Netzausschnitte repräsentiert werden, wobei dieser Nachteil mit steigender Leistung der zur Verfügung stehenden Rechenanlagen zunehmend an Bedeutung verliert. Mikroskopische Modelle werden immer dann eingesetzt, wenn die Bewegung der Einzelfahrzeuge von Interesse ist, z.B. Änderungen des Fahrverhaltens. Diese können in der Regel nicht durch Variierung einer stochastischen Größe oder Verteilung in makroskopischen Bewegungsmodellen nachgebildet werden.

Da in der vorliegenden Arbeit der Einfluß von Fahrbeeinflussungssystemen auf das individuelle Fahrverhalten einzelner Fahrer oder Fahrzeuge und dessen Auswirkungen auf den Verkehrsfluß untersucht werden sollen, muß ein mikroskopisches Modell zugrunde gelegt werden. Im folgenden Abschnitt wird daher auf die Entwicklung mikroskopischer Verkehrsflußmodelle genauer eingegangen. Es werden die verschiedenen existierenden Modellansätze beschrieben sowie neuere Entwicklungen kurz vorgestellt. Abschließend wird die Auswahl eines Modells für diese Untersuchung begründet.

3.2 Mikroskopische Modelle des Verkehrsflusses

Die Entwicklung von Modellen zur fahrzeugfeinen Beschreibung des Verkehrsflusses begann historisch gesehen mit der Nachbildung des Verkehrs auf einstreifigen Streckenabschnitten. Der Grund für die Konzentration der Untersuchungen zunächst

auf diesen einfachen Fall war, daß der einstreifige Verkehrsablauf eine Grundlage für die sehr viel komplexeren Bewegungsvorgänge von Fahrzeugen auf mehrstreifigen Fahrbahnen darstellt. Es mußte zunächst gelingen, diesen einfachen Bewegungsablauf modelltechnisch zu beherrschen, um dann komplexere Situationen abbilden zu können, mit dem Ziel, schließlich den Verkehrsablauf auf allen Straßentypen zu modellieren.

Aus dieser historischen Modellentwicklung resultiert häufig auch bei heute noch benutzten und sogar bei heute noch entwickelten Modellen, daß der Bewegungsablauf in seine zwei wesentlichen Bestandteile zerlegt wird, in die Bewegung in Fahrtrichtung und in die Bewegung quer zur Fahrtrichtung. Die Bewegung in Fahrtrichtung, auch longitudinale Bewegung genannt, stellt das Fahrverhalten auf einem Fahrstreifen dar. Das Verhalten wird lediglich von Fahrzeugen auf diesem Fahrstreifen beeinflusst, insbesondere vom vorausfahrenden Fahrzeug. Modelle, die das longitudinale Fahrverhalten beschreiben, werden deswegen **Fahrzeugfolge-Modelle** genannt, da sie die Fahrzeugbewegung als Reaktion auf vorausfahrende Fahrzeuge beschreiben. Die Bewegung quer zur Fahrtrichtung umfaßt alle Arten von Fahrstreifenwechselvorgängen: Fahrstreifenwechsel auf einer Richtungsfahrbahn, Wechseln auf Gegenverkehrsfahrstreifen zum Überholen auf Zwei-Richtungsfahrbahnen, Fahrstreifenwechsel zwecks Richtungsänderung, Ver- oder Entflechten. Modelle, die die laterale Bewegung beschreiben, können daher allgemein als **Fahrstreifenwechsel-Modelle** bezeichnet werden.

Die Aufteilung des Bewegungsvorgangs in die zwei Grundbewegungen und die getrennte Modellierung beider Vorgänge führt zu Problemen bei der Abbildung des natürlichen Fahrverhaltens, da die beiden Teilbewegungen in der Realität nicht voneinander getrennt sind. Sie beeinflussen sich gegenseitig und sind Ergebnis eines komplexeren Fahrverhaltens. Diese gegenseitigen Abhängigkeiten müssen bei einer getrennten Modellierung der Einzelbewegungen explizit abgebildet werden. Dennoch werden in den beiden folgenden Abschnitten die Modellentwicklungen beider Teilbewegungen getrennt vorgestellt.

3.2.1 Modelle des Fahrzeugfolgeverhaltens

Der longitudinalen Bewegung eines Fahrzeugs liegt ein komplexer Entscheidungsprozess des Fahrers zugrunde, der von ganz unterschiedlichen Einflußfaktoren bestimmt wird. Neben den Eigenschaften der Straße, des Fahrzeugs, der Verkehrsordnung und anderer Umwelteinflüsse wird das Fahrverhalten ganz wesentlich durch das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein anderer Verkehrsteilnehmer beeinflusst, insbesondere durch das unmittelbar vorausfahrende Fahrzeug. In der Vergangenheit wurden eine Vielzahl von Modellansätzen entwickelt, die das Fahrverhalten als Reaktion auf ein oder mehrere vorausfahrende Fahrzeuge beschreiben. Diese existierenden Modelle können in zwei Arten unterteilt werden:

1. Modelle, die auf kontinuierlichen Fahrzeugfolgegleichungen aufbauen
2. Modelle mit verschiedenen zustandsabhängigen Bewegungsgleichungen

Hinzu kommen Modellentwicklungen in neuerer Zeit, die auf einem anderen Ansatz zur Modellierung menschlichen Fahrverhaltens aufbauen, der Fuzzy-Set-Theory. Da diese Modellentwicklungen noch nicht abgeschlossen sind, werden dessen Grundlagen hier nur kurz vorgestellt.

3.2.1.1 Kontinuierliche Fahrzeugfolgegleichungen

Bei dieser Art von Modellen wird das Fahrzeugfolgeverhalten im wesentlichen durch eine mathematische Gleichung definiert. Das Fahrverhalten wird dabei als Reaktion des Fahrers auf Änderungen der eigenen Bewegung oder der Bewegung vorausfahrender Fahrzeuge angenommen. Eine das Fahrverhalten des betrachteten Fahrzeugs beschreibende Größe wird ins Verhältnis zu anderen Bewegungsgrößen des Fahrzeugs und des vorausfahrenden Fahrzeugs gesetzt. Die Gleichungen haben die Form:

$$\text{Reaktion} = \text{Empfindlichkeit} \cdot \text{Reiz}$$

Dieser mathematische Zusammenhang gilt dann in allen Fahrzuständen, Geschwindigkeitsniveaus und Verkehrssituationen. Die Modelle haben weitgehend deterministischen Charakter.

Die Entwicklung von Modellen dieser Art reicht schon sehr weit zurück. Die zunächst sehr einfachen Modelle wurden ständig erweitert und führten zu immer komplexeren Darstellungen. In allen folgenden Formeln bezeichnet der Index n das betrachtete Fahrzeug, der Index $n-1$ das unmittelbar vorausfahrende.

Als erstes wurde von REUSCHEL (1950) ein Modell vorgestellt, bei dem die Modellierung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen in einer Kolonne auf einer sogenannten Folgegleichung beruhte. Modelliert wurde dabei die einfache Annahme, daß die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs proportional zum aktuellen Netto-Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ist. Stellgröße des Modells ist hier die Fahrzeuggeschwindigkeit: bei gegebenem Netto-Abstand wird ein aktueller Wert der Geschwindigkeit errechnet.

$$k \cdot v_n = x_{n-1}(t) - x_n(t) - L \quad (3-1)$$

L ist dabei die Länge des vorderen Fahrzeugs, k eine Konstante. Dieses Modell erwies sich jedoch als zu einfach, da es eher beschreibt, wie gefahren werden sollte, statt menschliches Folgeverhalten tatsächlich nachzubilden. Ein großer Nachteil war zudem, daß sich bei dieser Form der Modellierung die Geschwindigkeit fast beliebig stark ändern konnte, ohne kinematische, fahrzeugdynamische oder fahrerbezogene Einschränkungen zu berücksichtigen.

Nachfolgende Modelle versuchten daher statt der Geschwindigkeit die Beschleunigung als Reaktionsgröße anzusehen, da die Beschleunigung die Größe ist, die der Fahrer mit Gaspedal und Bremse direkt beeinflusst. WHITE (1957) stellte ein Modell

vor, in dem die Stellgröße Beschleunigung als proportional zum Abstand und zur eigenen Geschwindigkeit definiert wurde:

$$b_n(t) = \lambda (x_{n-1}(t) - x_n(t) - k \cdot v_n(t)) \quad (3-2)$$

Zusätzlich zur Konstanten k wird hier erstmals eine fahrspezifische Sensitivitätskonstante λ eingeführt, die es erlaubt unterschiedliches Verhalten von verschiedenen Fahrern zu beschreiben.

Eine Forschergruppe der Automobilfirma GENERAL MOTORS um Robert Herman untersuchte verschiedene Modelle ähnlicher Form. Die Modelle wurden mehrfach weiterentwickelt, erweitert und verfeinert. GAZIS, HERMAN und ROTHERY (1961) gaben schließlich eine allgemeine Form der Gleichung an, die bis heute als Grundlage deterministischer Fahrzeugfolgemodelle anerkannt ist:

$$b_n = \lambda \cdot (v_n(t + \Delta t))^m \cdot \frac{v_{n-1}(t) - v_n(t)}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^l} \quad (3-3)$$

Die Parameter m und l bestimmen den Einfluß der absoluten Geschwindigkeit und des Abstands. Verschiedene Forschergruppen erweiterten diese Modelle um den Einfluß von mehr als einem vorausfahrenden Fahrzeug. Versuche von HERMAN und ROTHERY (1963) zeigten aber, daß schon der Einfluß von Fahrzeug $n-2$ nicht mehr sehr bedeutend ist.

3.2.1.2 Wahrnehmungsbasierte Beschreibung

Nicht berücksichtigt wird bei den oben angeführten Modellen, daß der Mensch Geschwindigkeits- und Abstandsänderungen erst ab einer bestimmten Schwelle wahrnehmen kann. Der ganze Bewegungsablauf wird im wesentlichen durch eine mathematische Gleichung beschrieben, das erste Fahrzeug eines Pulks kann mit diesen Modellen nicht modelliert werden, da es kein Vorderfahrzeug gibt, dem es zu folgen hat.

Für die Entwicklung eines anderen Modellansatzes wurde zunächst untersucht, wann der Mensch seinen Fahrverlauf beeinflussende Bewegungsänderungen wahrzunehmen beginnt und dementsprechend reagiert. Die Untersuchungen gehen zurück auf TODOSIEV (1963), MICHAELS und COZAN (1963) und MICHAELS (1965).

TODOSIEV betrachtet die Beziehung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen als Trajektorien in sog. *Phase-Planes*, in denen eine vom System abhängige Variable durch die X-Achse repräsentiert wird, die zeitliche Ableitung derselben Variable hingegen durch die Y-Achse. In *Phase-Planes* erster Ordnung wird die

Variable Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gegen die zeitliche Ableitung Geschwindigkeitsdifferenz aufgetragen, entsprechend in *Phase-Planes* zweiter Ordnung die Geschwindigkeitsdifferenz gegen die Beschleunigungsdifferenz.

TODOSIEV stellte bei der Untersuchung von Folgevorgängen hinter einem mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Vorderfahrzeug fest, daß es Bereiche im Phasen-Plan 1. Ordnung gibt, in denen der Fahrer mit konstanter Beschleunigung fährt: er bremst oder beschleunigt nahezu konstant. Es gibt jedoch Punkte im Phasen-Plan, in denen der Fahrer sein Verhalten ändert: er wechselt von einer positiven Beschleunigung zu einer negativen und umgekehrt. Diese Punkte der Verhaltensänderung nannte er Entscheidungs-Punkte. Die Ursache hierfür sah er in der Form und den Grenzen menschlichen Wahrnehmungsvermögens von Bewegung. Er führte den Begriff "velocity threshold" ein, Schwellen der Wahrnehmung von Geschwindigkeitsunterschieden. Aufgrund älterer Untersuchungen der Bewegungswahrnehmung, eigener Messungen, sowie der theoretischen Analyse und Anwendung psychophysischer Gesetze bestimmte er Funktionen für die Schwellen positiver und negativer Geschwindigkeitsdifferenz, die den Mindestwert definieren, den die Geschwindigkeitsdifferenz überschreiten muß, damit der Fahrer sie wahrnimmt und darauf reagiert. Darauf aufbauend entwickelte TODOSIEV sein Modell der Aktionspunkte (The Action Point Model) für das Folgeverhalten bei kleinen Geschwindigkeitsunterschieden.

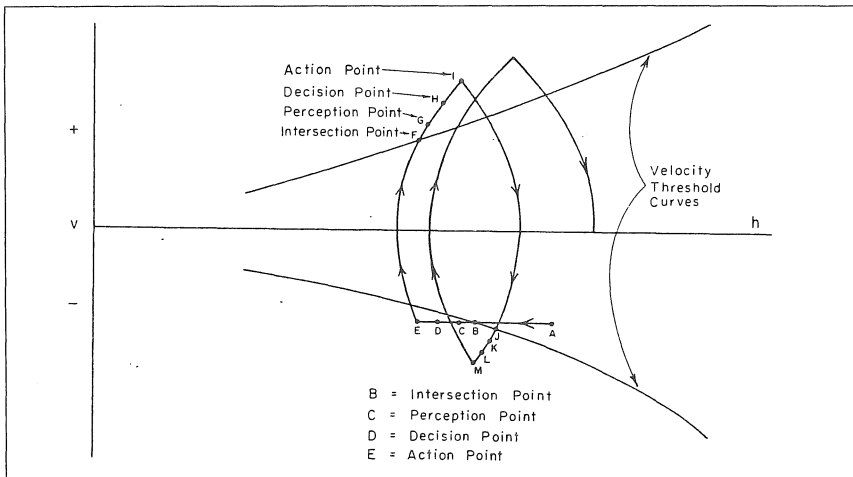


Abb. 3-1: Das Action-Point-Modell von TODOSIEV

Andere Arbeiten in dieser Zeit untersuchten die menschliche Wahrnehmung bei höheren Geschwindigkeitsunterschieden. Zunächst beobachteten MICHAELS und COZAN (1963) die Reaktion von Fahrern auf Objekte am Fahrbahnrand. Die Reaktion haben sie in Form der lateralen Ausweichbewegung der Fahrzeuge gemessen. Sie

stellten dabei fest, daß die laterale Bewegung abhängt von der Längsgeschwindigkeit der Fahrzeuge, von der Entfernung zum Objekt und von der Entfernung des Objekts zur Fahrbahn. Die Beobachtungen führten zu der Annahme, daß die Fahrerreaktion von der Änderung der gesehenen Größe des Objekts abhängt. Erst wenn die Änderung der gesehenen Größe einen bestimmten Schwellenwert übersteigt, wird das Hindernis wahrgenommen und mit einer lateralen Abweichung von der Hauptrichtung reagiert. Die gesehene Größe des Objekts läßt sich durch den Winkel beschreiben, dessen Schenkel die Objektaussenkannten tangieren. MICHAELS und COZAN bestimmten für die Geschwindigkeiten, mit der sich die gesehenen Winkel ändern, diejenigen Werte, bei denen die Testfahrer mit der lateralen Ausweichbewegung beginnen. Diese und andere empirische Ergebnisse benutzte MICHAELS (1965) zur Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens. Er unterschied drei Situationen: das Annähern an ein langsames Vorderfahrzeug, das Folgen bei annähernd gleicher Geschwindigkeit und die Reaktion auf ein beschleunigendes Vorderfahrzeug.

WIEDEMANN (1974) führte die Untersuchungen und Modellideen zusammen und erstellte das erste wahrnehmungsbasierte Modell, in dem das Fahrverhalten in allen Situationen bezüglich des Folgevorgangs modelliert wurde. Unterschieden wird im wesentlichen zwischen der Situation des freien Fahrens, bei der das Fahrverhalten nicht durch das Vorhandensein eines Vorderfahrzeugs beeinflußt wird, der Situation des Bremsens auf den Wunschabstand, bei der der Fahrer seine Geschwindigkeit an ein langsames Vorderfahrzeug anpaßt, und der Situation des Folgens, bei der der Fahrer einem etwa gleich schnellen Vorderfahrzeug in einem um einen Idealwert oszillierenden Abstand folgt. Den verschiedenen Situationen, die als Interaktionszustände bezüglich des Vorderfahrzeugs bezeichnet wurden, war jeweils ein eigenes Fahrverhalten zugeordnet. Kern des Modells war die Beobachtung, daß ein Fahrer eine Veränderung von Entfernung und Geschwindigkeit erst dann wahrnimmt, wenn der optische Reiz, den diese Veränderung auslöst, z.B. die Veränderung der gesehenen Größe des Vorderfahrzeugs, einen bestimmten Minimalwert überschreitet.

Modelliert wurde dies dadurch, daß die Interaktionsbereiche durch verschiedene Wahrnehmungsschwellen und charakteristische Abstände getrennt waren. Der Fahrer reagiert auf die Wahrnehmung einer Veränderung durch Anpassung seines Verhaltens an die neue Situation. Die Wahrnehmung einer Veränderung wurde durch das Überschreiten einer Schwelle im Modell repräsentiert.

Die Empfindlichkeit verschiedener Fahrer und die Form der Reaktion wurde mit Hilfe einer Reihe normalverteilter Zufallsgrößen beschrieben. Diese Größen dienten allgemein der Beschreibung der Streubreite in den Fähigkeiten und Eigenschaften der Fahrer und der Fahrzeuge.

Im Modell von WIEDEMANN werden Wahrnehmungs- und Reaktionsschwellen benutzt, die das Fahrverhalten bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen und Abständen begrenzen. Diesen liegen die Untersuchungen von TODOSIEV und die Messungen von HOEFS (1972) zugrunde. Außerdem sind Schwellen für das Fahren bei größeren Geschwindigkeitsdifferenzen definiert, die auf den Untersuchungen von MICHAELS und ebenfalls auf den Messungen von HOEFS aufbauen. Im Einzelnen

sind dies die folgenden Schwellen:

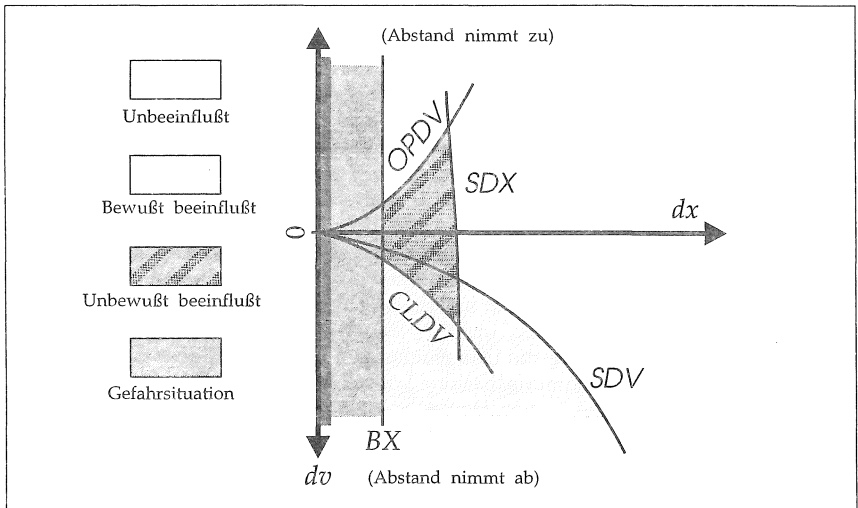


Abb. 3-2: Modell von Wahrnehmung und Entscheidung nach WIEDEMANN

AX ist der gewünschte Bruttoabstand beim Stillstand. Er setzt sich zusammen aus der Länge des Vorderfahrzeugs und einem zusätzlichen Abstand, der vom Sicherheitsbedürfnis des Fahrers abhängt.

BX ist der gewünschte minimale Folgeabstand bei etwa gleicher Geschwindigkeit. Dieser Abstand besteht aus dem Stillstandsabstand und einer von der absoluten Geschwindigkeit abhängigen Größe. Der Zusammenhang zwischen BX und der Geschwindigkeit ist allerdings nicht linear, sondern hat, wie aus Messungen ermittelt, parabolischen Charakter:

$$BX = AX + (k_1 + k_2 \cdot ZF1) \cdot \sqrt{v}$$

k_1 und k_2 sind kalibrierbare Konstanten, ZF1 ist die das Sicherheitsbedürfnis beschreibende Zufallsgröße.

SDX stellt eine obere Grenze für das Abtriften aus dem Folgevorgang dar. Sie liegt nach TODOSIEV und HOEFS zwischen dem 1.5-fachen und 2.5-fachen des Abstandes BX. Diese Schwelle unterscheidet sich nicht nur von Fahrer zu Fahrer, sondern schwankt auch für ein und denselben Fahrer.

CLDV ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen abnehmenden Abständen. Ihr Schwankungsbereich ist relativ sehr groß und nach TODOSIEV, HOEFS schief normalverteilt.

- OPDV** ist die entsprechende Schwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen zunehmenden Abständen. Ihr Schwankungsbereich ist größer als CLDV: der Betrag liegt zwischen dem 1-fachen und 3-fachen von CLDV.
- SDV** beschreibt die Wahrnehmung von Geschwindigkeitsdifferenzen bei großen Abständen. Nach MICHAELS liegt ihr Wert zwischen $25 \cdot \sqrt{dv}$ und $75 \cdot \sqrt{dv}$ und wird als vom Sicherheitsbedürfnis und vom Schätzvermögen abhängig modelliert.

Diese Schwellen teilen das $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm in verschiedene Bereiche ein, die jeweils einen Zustand der Interaktion bezüglich eines vorausfahrenden Fahrzeugs beschreiben. Jedem Zustandsbereich ist ein Fahrverhalten zugeordnet:

Unbeeinflusstes Fahren

Kein Vorderfahrzeug beeinflusst das Fahrverhalten direkt. Der Fahrer fährt mit seiner Wunschgeschwindigkeit oder er versucht diese durch Beschleunigung zu erreichen. Wichtig bei der Modellierung sind hier zwei Größen: die betragsmäßig minimale positive und negative Beschleunigung, die die Fahrer nicht unterschreiten können, sowie die maximale Beschleunigung.

Bewußt beeinflusstes Fahren

Der Fahrer hat die Annäherung an ein langsamer fahrendes Vorderfahrzeug bewußt wahrgenommen und reagiert nach einer Reaktionszeit durch Verzögerung. Er versucht, seine eigene Geschwindigkeit auf diejenige des Vorderfahrzeugs zu reduzieren und dabei den von ihm gewünschten Mindestabstand einzuhalten.

Unbewußt beeinflusstes Fahren

Der Fahrer folgt einem Vorderfahrzeug mit geringer Geschwindigkeitsdifferenz und niedrigem Abstand. Er versucht, die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs einzuhalten. Da der Fahrer seine Beschleunigung nicht genau bei Null halten kann, fährt er entweder mit kleiner Beschleunigung oder mit kleiner Verzögerung hinter dem Vorderfahrzeug hinterher, bis er eine den Folgevorgang begrenzende Schwelle überschreitet. Dann erkennt er die Veränderung und kehrt das Vorzeichen der Beschleunigung um. Dies führt zu einem Fahren mit oszillierendem Folgeabstand.

Abwenden einer Gefahrensituation

Der aktuelle Abstand ist niedriger als der gewünschte minimale Folgeabstand. Der Fahrer reagiert nun heftiger, um durch Verzögerung auch unter die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs eine Kollision zu vermeiden. Die Reaktion ist umso heftiger, je weiter der Mindestabstand unterschritten ist.

3.2.1.3 Neuere Entwicklungen

Neuere Modellansätze versuchen, menschliches Fahrverhalten unter Zuhilfenahme der **Fuzzy-Logik** nachzubilden. Nun liegt die Motivation für diesen Versuch sicher nicht nur in der augenblicklichen Beliebtheit der Fuzzy-Logik, deren Einsatz kann

vielmehr durch spezielle Eigenschaften des menschlichen Fahrverhaltens begründet werden. Zunächst einmal ist die Regelung der Fahrzeugbewegung durch den Menschen ein komplexer Vorgang: es gibt eine Vielzahl von Einflußfaktoren, die auf einen vielschichtigen Entscheidungsprozess beim Menschen einwirken. Außerdem wird es mit Sicherheit sowohl bei den Einflußfaktoren als auch bei den Entscheidungsprozessen des Menschen immer Komponenten geben, die nicht bekannt oder zumindest nicht meßbar sind. Hinzu kommt, daß ein Modellierer oft genug vor dem Problem steht, nicht so genau zu wissen, was er eigentlich darstellen will, welche der unzähligen Einflußfaktoren er berücksichtigen sollte, wieviel verschiedene Teilentscheidungsprozesse er erforschen muß.

Genau diese drei Unsicherheiten rechtfertigen nach ZIMMERMANN (1993) aber gerade den Einsatz der Fuzzy-Logik. Prozesse und Vorgänge, die mit diesen Formen von Unsicherheiten versehen sind, lassen sich umgangssprachlich häufig noch leicht beschreiben, die Abbildung auf klassische mathematische Modelle bereitet jedoch Schwierigkeiten. Letztere bauen auf einer präzisen, zweiwertigen Beschreibung auf, verwenden exakte Zahlen und mathematische Beziehungen zwischen den Zahlen. Unsicherheiten werden durch die Verwendung von Zufallsgrößen in der exakten mathematischen Beschreibung repräsentiert.

Grundlage der Fuzzy-Logik sind unscharfe Mengen und linguistische Variablen. Unscharfe Mengen stellen eine Verallgemeinerung des klassischen Mengenbegriffs dar. Die Zugehörigkeit eines Elements zu einer unscharfen Menge wird nicht mehr zweiwertig mit ja oder nein (bzw. 0 oder 1) entschieden, sondern kann einen beliebigen Wert zwischen 0 und 1 annehmen, mit dem beschrieben wird, zu welchem Grad das Element der Menge angehört. Linguistische Variablen haben als Wertebereiche nicht Zahlen, sondern Terme einer natürlichen Sprache. Jeder Term wird durch eine unscharfe Menge über einer präzisen Basis-Variablen repräsentiert. Mit unscharfen Mengen und linguistischen Variablen können umgangssprachliche Aussagen formalisiert werden, wie: "Der Wert von x ist groß, der Wert von y ist klein".

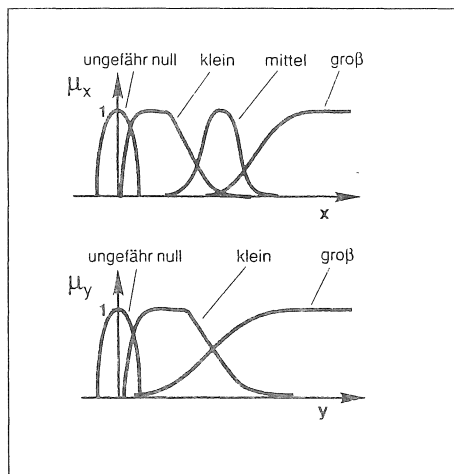


Abb. 3-3: Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Variablen x und y zu unscharfen Mengen

Bei der Anwendung der Fuzzy-Logik zur Modellierung von Prozessen werden diese Prozesse mit einem Satz von Regeln in der Form "WENN Bedingung DANN Aktion" beschrieben, die linguistische Variablen als Eingangs- und Ausgangsparameter

verwenden. Dies erlaubt eine Repräsentation von Unsicherheiten bei den Eingangsbedingungen, den Einflußfaktoren, sowie bei den Aktionen als Ergebnis eines modellierten menschlichen Entscheidungsprozesses. Diese Regel-Menge ist das Kernstück des Modells. Die Eingangsgrößen sind gemessene Größen, wie z.B. Parameter, die die Fahrzeugbewegung oder das Fahrzeugumfeld beschreiben (Geschwindigkeiten, Abstände), Ausgangsgrößen sind Stellgrößen, die den Prozeß, z.B. die Längsbewegung eines Fahrzeugs, regeln (Beschleunigung). Die exakten Eingangsgrößen müssen zunächst in linguistische Form gebracht werden (Fuzzifizierung), hierauf werden die Regeln angewendet, die Ergebnisse müssen wieder in eine exakte Form umgewandelt werden, um als Stellgrößen dienen zu können (Defuzzifizierung). Eine Anwendung auf die Modellierung des Fahrverhaltens haben JÜRGENSEN und RAUPACH (1992) entwickelt. Sie modellieren die Längsregeltätigkeit des Fahrers.

Allgemein ist bei diesem Vorgehen das Kernproblem die Aufstellung und Auswahl der Regeln und die Zuordnung von Werten zu den linguistischen Variablen. Auch bei der Verwendung der Fuzzy-Logik muß die Menge der eingesetzten Regeln begrenzt werden, obwohl der Formalismus sogar die Repräsentation auch nur umgangssprachlich definierbaren Wissens erlaubt. Es muß eine Auswahl getroffen werden, um überhaupt noch überblicken zu können, welche Regel welche Auswirkungen im Modell hat. Die Regeln und Zuordnungen zu linguistischen Variablen müssen bei einer wissenschaftlichen Modellierung genauso auf empirischem Wissen basieren, wie entsprechende Modellkomponenten klassischer Systeme. Daß der Einsatz der Fuzzy-Logik bei der Modellierung menschlichen Fahrverhaltens Vorteile einbringt, muß erst noch erwiesen werden (siehe z.B. REKERSBRINK 1994).

3.2.2 Modelle des Fahrstreifenwechselverhaltens

Im Gegensatz zum Längsverhalten von Fahrzeugen wurde das Querverhalten in der Vergangenheit sehr viel weniger stark untersucht. Dies hat zwei Gründe. Zum einen ist eine Querbewegung ein sehr viel seltenerer Vorgang. Eine Querbewegung, wie sie hier gemeint sein soll, ist im weitesten Sinne immer ein Fahrstreifenwechsel. Querbewegungen innerhalb eines Fahrstreifens sind für diese Art von Untersuchung nicht von Interesse. Fahrstreifenwechsel finden aber nur relativ selten statt, entweder um mindestens ein Fahrzeug zu überholen, oder um mindestens ein Fahrzeug überholen zu lassen, oder weil ein allgemeineres Fahrtziel davon betroffen ist, wie z.B. der Wunsch an der nächsten Ausfahrt die Fahrbahn zu verlassen, abzubiegen, bzw. auf eine Fahrbahn aufzufahren. Üblicherweise liegen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrstreifenwechseln mehrere Sekunden, schon beim kürzesten Manöver, dem Überholen nur eines Fahrzeugs, selten weniger als 10 bis 15 Sekunden. Das Längsverhalten oder auch Fahrzeugfolgeverhalten ist hingegen ein kontinuierlicher Prozess, dessen Modellierung daher viel größere Bedeutung zukommt.

Ein anderer Grund für die weniger umfangreiche Auseinandersetzung mit dem Fahrstreifenwechselverhalten ist, daß diese Fahrvorgänge meßtechnisch sehr viel schwieriger zu erfassen sind. Der Fahrer berücksichtigt bei der Entscheidung, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen, in der Regel mehrere Fahrzeuge auf dem

aktuellen und dem zukünftigen Fahrstreifen, sowie eine Vielzahl von generellen Verkehrsregeln (Rechtsfahrgebot), Vorlieben (bevorzugter Fahrstreifen) und Fahrtzielen (Verlassen der Autobahn an der nächsten Ausfahrt). Aussagekräftige Messungen von Fahrstreifenwechselverhalten lassen sich daher nur im fahrenden Fahrzeug vornehmen, wobei eine Vielzahl von Einflußfaktoren gemessen werden muß: Abstände zu umgebenden Fahrzeugen, Geschwindigkeitsdifferenzen u.v.a.m.

MEINEFELD (1976) beschreibt neben empirischen Untersuchungen verschiedene Modelle des Verkehrsablaufs auf mehrspurigen Richtungsfahrbahnen. Dies sind jedoch durchweg makroskopische Modelle, in denen berechnet wird, wieviel Fahrzeuge innerhalb eines gegebenen Weg-Zeit-Ausschnitts einen Fahrstreifenwechsel durchführen, bzw. wie hoch die Wahrscheinlichkeit für ein einzelnes Fahrzeug ist, den Fahrstreifen zu wechseln. Die Fahrstreifenwechsel sind dabei eine Funktion verschiedener makroskopischer Parameter, wie der Dichte auf den einzelnen Fahrstreifen.

WILLMANN (1978) entwickelte ein theoretisches Modell, das die menschlichen Entscheidungsprozesse beim Fahrstreifenwechsel repräsentieren sollte, das daher als mikroskopisch bezeichnet werden kann. Sein Ansatz gründet auf der Vermutung, daß Fahrzeugfolgeverhalten und Fahrstreifenwechselverhalten dieselbe Basis haben, nämlich die menschliche Wahrnehmung von Entfernung und Bewegung umgebender Fahrzeuge. Den Entscheidungsprozeß, der zu einem Fahrstreifenwechsel führt, beschreibt WILLMANN mittels Entscheidungsbäumen. Zur Einschätzung von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz verwendet er dieselben Schwellen und Interaktionszustände wie im Fahrzeugfolgemodell von WIEDEMANN (1974). Er geht jedoch davon aus, daß bei der Entscheidung zum Fahrstreifenwechsel nicht nur die momentane Verkehrssituation berücksichtigt wird, sondern auch, *"wie sich die momentane Konstellation in naher Zukunft ändern könnte"*. Im Modell repräsentiert er diese Berücksichtigung künftiger Änderungen durch einen Zustand **potentielle Beeinflussung**, der jene Situationen umfaßt, in denen ein Fahrer vermuten könnte, in den Einflußbereich eines Vorderfahrzeugs zu gelangen. Zur Abgrenzung des potentiellen Einflußbereichs werden Vielfache der Schwellen des Fahrzeugfolgemo-

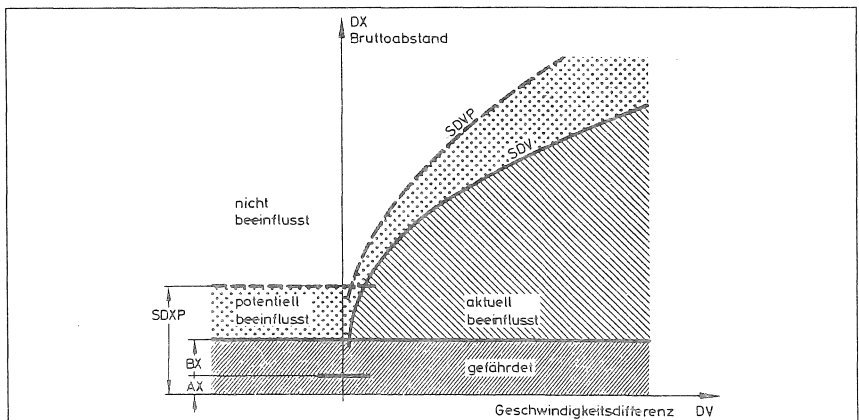


Abb. 3-4: Aktuelle und potentielle Beeinflussung nach WILLMANN

dells **BX** und **SDV** verwendet.

SPARMANN (1978) führt umfangreiche Messungen auf einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn durch und verfeinert damit das theoretische Modell des Fahrstreifenwechselverhaltens. Der menschliche Entscheidungsprozess wird in drei Teilscheidungen zerlegt, die nacheinander abgearbeitet werden. Zunächst prüft der Fahrer, ob er den Fahrstreifen verlassen will, auf dem er sich gerade bewegt. Dann versucht er zu beurteilen, ob ihm die Situation auf einem benachbarten Fahrstreifen Vorteile bringt. Schließlich muß er noch abwägen, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, ohne sich oder andere Verkehrsteilnehmer damit zu gefährden. Zu unterscheiden sind bei der Modellierung von Autobahnen die Fahrstreifenwechsel nach links bzw. nach rechts, da die Wahl des Fahrstreifens durch Vorschriften wie das Rechtsfahrgebot eingeschränkt ist.

Ein Fahrstreifenwechselwunsch zum linken Fahrstreifen entsteht dann, wenn eine Behinderung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug auf dem augenblicklich befahrenen Fahrstreifen vorliegt. Ob eine Behinderung vorliegt, wird mit den Interaktionszuständen des Fahrzeugfolgmodells nach WIEDEMANN bewertet. Dies ist nur dann nicht der Fall, wenn der Fahrer sich im Zustand unbeeinflussten Fahrens befindet. Auch SPARMANN verwendet zusätzlich den Zustand der **potentiellen Beeinflussung**. Ein Fahrstreifenwechselwunsch nach rechts resultiert im wesentlichen aus dem allgemeinen Rechtsfahrgebot. Ist ein Fahrer auf dem momentanen Fahrstreifen nicht behindert und gilt dies ebenso auf dem rechten Fahrstreifen, so wünscht er den Fahrstreifenwechsel nach rechts. Ein Wunsch den linken Fahrstreifen zu verlassen entsteht außerdem, wenn ein schnelleres Folgefahrzeug drängt (Fahrzeug mit deutlich höherer Wunschgeschwindigkeit), die eigene Fahrt aber höchstens potentiell beeinflusst ist.

Ein Fahrstreifenwechsel ist dann sinnvoll, wenn der eigenen Fahrt oder anderen Fahrzeugen daraus ein Vorteil entsteht. Ein Fahrstreifenwechsel nach links wird als sinnvoll bewertet, wenn die Behinderung dort nicht größer ist. Überschreitet die Behinderung auf dem momentanen Fahrstreifen einen vorgegebenen Schwellenwert, wird ein Fahrstreifenwechsel nach links auch dann noch als sinnvoll erkannt, wenn dort kein sofortiger Vorteil entsteht. Besteht ein Fahrstreifenwechselwunsch nach rechts, wird dieser Fahrstreifenwechsel dann als sinnvoll bewertet, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit nur unwesentlich unter der eigenen Wunschgeschwindigkeit liegt.

Fahrstreifenwechsel sind immer dann möglich, wenn die nötigen Sicherheitsabstände eingehalten werden, und wenn keinem neuen Folgefahrzeug eine zu hohe Bremsbeschleunigung zugemutet wird. Hierfür wird ein Schwellenwert bestimmt, der sich in Abhängigkeit von der Dauer eines Fahrstreifenwechselwunschs geringfügig verändert: Wartet ein Fahrer schon länger auf die Möglichkeit nach links zu wechseln, erhöht sich die Behinderung, die er einem Folgefahrzeug zumutet. Ein Fahrstreifenwechsel nach rechts ist immer dann möglich, wenn die Sicherheitsabstände eingehalten werden und wenn das neue Folgefahrzeug höchstens potentiell beeinflusst ist.

YOUNG et al. (1989) modellieren den menschlichen Entscheidungsprozess über Fahrstreifenwechsel auf Stadtstraßen in grundsätzlich ähnlicher Weise. Die Entscheidung zum Fahrstreifenwechsel wird als Ergebnis von drei Teilentscheidungen repräsentiert: Ist ein Fahrstreifenwechsel möglich? Ist ein Fahrstreifenwechsel nötig? Besteht ein Wunsch zum Fahrstreifenwechsel?

3.3 Zusammenfassung und Modellauswahl

Verschiedene Modelle zur Repräsentation des Verkehrsflusses sind bisher entwickelt worden. Zur Modellierung der Veränderungen im individuellen Fahrverhalten, so wie sie durch die Einführung von fahrzeugseitigen Fahrbeeinflussungssystemen hervorgerufen werden, eignen sich einzig mikroskopische Modelle, da nur hier das Fahrverhalten detailliert genug, also fahrzeugfein, abgebildet wird.

Von den existierenden mikroskopischen Modellansätzen sind die wahrnehmungs-basierten, stochastischen am besten geeignet, da sie im Gegensatz zu den deterministischen Modellen, die auf einer einzigen Fahrzeugfolgegleichung aufbauen, eine gute Repräsentation des natürlichen Fahrverhaltens in verschiedenen Fahrsituationen erlauben. Außerdem wird hier das Fahrverhalten als Reaktion auf natürliche Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse des Fahrers dargestellt. Dies erlaubt eine explizite Integration von Systemen, die dem Fahrer zusätzliche Informationen liefern, in das Fahrverhaltensmodell.

Bei den deterministischen Modellen kontinuierlicher Fahrzeugfolgegleichungen könnte der Einfluß von Fahrbeeinflussungssystemen auf das Fahrverhalten zwar auch dargestellt werden, aber nicht explizit, sondern nur durch Veränderung der Fahrzeugfolgegleichung. Die einzige wissenschaftliche Methode, die Fahrzeugfolgegleichung an diese neue Situation anzupassen, besteht in umfangreichen empirischen Untersuchungen mit ausgerüsteten Fahrzeugen oder mit Hilfe von komplexen Fahrsimulatoren, die genug Datenmaterial liefern, um die wenigen Parameter der Fahrzeugfolgegleichung zu kalibrieren. Abgesehen von den Schwierigkeiten bei der Datenerfassung und -aufbereitung, kann ganz allgemein bezweifelt werden, ob es überhaupt möglich ist, mit diesen sehr einfachen Modellen, derart komplexe Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse zu repräsentieren.

Die neueren Modellentwicklungen, namentlich die auf der Fuzzy-Set-Theorie aufbauenden, scheinen vielversprechend. Daß sie allerdings Vorteile gegenüber der herkömmlichen Modellierung haben, muß erst noch erwiesen werden. Jedenfalls ist noch keines dieser Modelle anwendungsreif.

Für die weitere Untersuchung wird als Grundlage daher ein wahrnehmungsbasiertes Modell verwendet, das auf den Modellen von WIEDEMANN (1974) für das Fahrzeugfolgeverhalten und SPARMANN (1978) für das Fahrstreifenwechselverhalten aufbaut.

4. Empirische Grundlagen der Modellierung

Eine grundlegende Voraussetzung bei der Modellierung beliebiger Umweltprozesse ist es, genügend Wissen über die zu modellierenden Prozesse und den Teil der Umwelt zu erwerben, der diese Prozesse beeinflusst. Empirische Daten werden in allen wesentlichen Stufen der Modellentwicklung benötigt: im Entwurf, in der Kalibrierung und in der Validierung eines Modells. So war die Erstellung von Modellen des Verkehrsflusses, wie sie im vorangegangenen Kapitel beschrieben ist, in der Regel von Messungen begleitet, auf denen die Modellannahmen aufbauten.

In diesem Kapitel werden die wesentlichen empirischen Untersuchungen beschrieben, die die verschiedenen Stufen der Modellierung beeinflussen. Dazu werden zunächst die Meßverfahren und Ergebnisse vorgestellt, die Grundlage der in Kapitel 3 aufgeführten Modelle waren. Anschließend werden die Messungen beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, um das ausgewählte mikroskopische Modell den aktuellen Verkehrsbedingungen anzupassen. Auf die Möglichkeiten der Verwendung empirischer Daten zur Kalibrierung und Validierung wird dann erst im nächsten Kapitel eingegangen. Vorangestellt wird den Beschreibungen eine kurze Übersicht darüber, welche Möglichkeiten es gibt, den Verkehrsfluß zu messen.

4.1 Mögliche Meßverfahren

Die Verfahren zur Messung des Verkehrsflusses können zunächst in zwei Hauptgruppen unterteilt werden: in ortsfeste Meßverfahren und in bewegte Meßverfahren. Ortsfeste Meßverfahren werden dadurch charakterisiert, daß das betrachtete Wegintervall während einer gesamten Messung unverändert bleibt. Das Zeitintervall, über dem gemessen wird, ist hingegen frei wählbar. Bei bewegten Meßverfahren ist im Unterschied dazu das beobachtete Wegintervall nicht fest. Zwar bleibt dessen Ausdehnung in der Regel gleich, nicht aber die Position. Das Zeitintervall ist hier wiederum frei wählbar, die maximale Meßdauer wird aber durch die Länge der Fahrt zusätzlich eingeschränkt.

4.1.1 Ortsfeste Meßverfahren

Die ortsfesten Meßverfahren können noch weiter unterteilt werden: Es gibt Messungen über einen längerem Zeitintervall an einem oder an mehreren Querschnitten (üblicherweise zwei aufeinanderfolgende Querschnitte), Messungen eines größeren Wegintervalls zu einem festen Zeitpunkt, zu mehreren Zeitpunkten oder quasi kontinuierlich mit Hilfe von Video- oder Filmaufzeichnungen. In EDIE (1963) und COERS (1970) wird beschrieben, wie aus empirischen Daten über einzelne Fahrzeuge, die mittels beliebiger ortsfester Verfahren erhoben wurden, die makroskopischen Kenngrößen Verkehrsstärke Q , Verkehrsdichte K und mittlere Geschwindigkeit V im betrachteten Weg-Zeit-Ausschnitt ermittelt werden können. Alle ortsfesten Verfahren können als Spezialfall der allgemeinen räumlich-zeitlichen

Messung angesehen werden. Zur Berechnung werden jeweils die Zeiten t_i , die die einzelnen gemessenen Fahrzeuge i zum Durchfahren des Wegintervalls X benötigen, sowie die Wege x_i , die die Fahrzeuge im X - T -Ausschnitt zurücklegen, benötigt. Das Wegintervall X ist im Beispiel der Messung an zwei Querschnitten der Abstand der beiden Meßstellen (siehe Abb. 4-1). Q , K und V berechnen sich wie folgt:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{X \cdot T} \quad K = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{X \cdot T} \quad \bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (4-1)$$

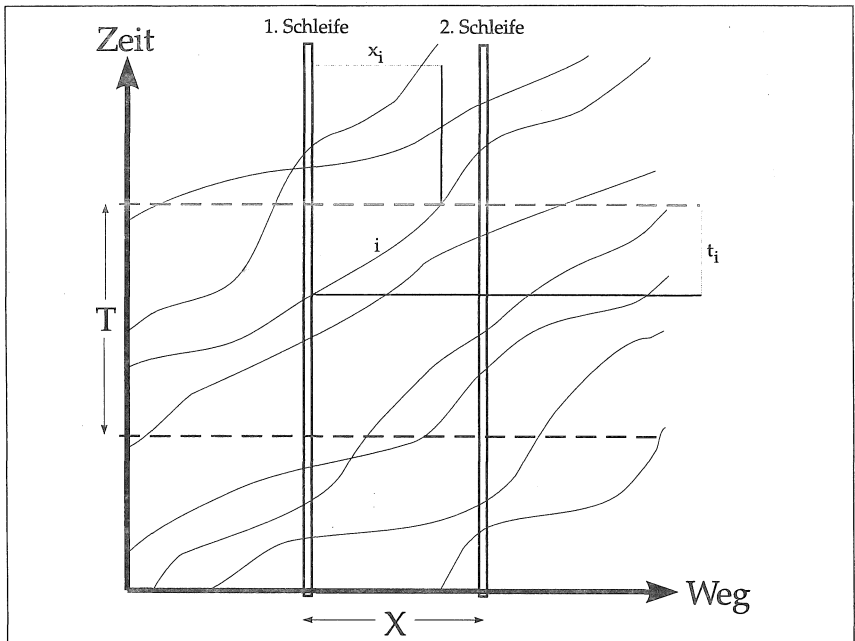


Abb. 4-1: Fahrlinien im Zeit-Weg-Diagramm mit Doppelschleifenmessung

4.1.2 Bewegte Meßverfahren

Bewegte Meßverfahren können danach unterschieden werden, mit welcher Geschwindigkeit sich der Beobachter und damit die Position des beobachtbaren Wegintervalls bewegt: Entweder bewegt sich der Beobachter im beobachteten Verkehrsstrom mit, seine Geschwindigkeit wird vom Verkehr selbst beeinflusst, oder

die Geschwindigkeit des Beobachters ist unabhängig vom beobachteten Verkehr, er bewegt sich außerhalb des eigentlichen Straßenraums. Im ersten Fall handelt es sich um ein mit Meßinstrumenten ausgerüstetes Straßenfahrzeug, das im Verkehr "mitschwimmt". Klassisch ist die Moving Observer Methode (MOM), bei der die untersuchte Strecke einmal in Fahrtrichtung des beobachteten Verkehrsstromes und einmal in entgegengesetzter Richtung befahren wird. Diese Methode ist beschrieben in CHARLESWORTH und WARDROP (1954) und BLEHER (1987). Bei der Moving Observer Methode besteht das beobachtete Wegintervall lediglich aus einem bewegten Querschnitt. Es werden nur die Fahrzeuge gezählt, die auf einem anderen Fahrstreifen das messende Fahrzeug passieren. Mit diesen Meßdaten können nur makroskopische Kenngrößen des Verkehrs ermittelt werden.

Sollen mikroskopische Größen bestimmt werden, muß der bewegte Beobachter mehr Informationen aufnehmen. Das Meßfahrzeug kann mit Instrumenten ausgestattet werden, die die Messung über einem größeren (bewegten) Wegintervall erlauben. Hiermit können detailliertere Daten über umgebende Fahrzeuge aufgenommen und protokolliert werden, z.B. die Abstände zu umgebenden Fahrzeugen, die Geschwindigkeiten anderer Fahrzeuge relativ zur eigenen, die Relativbeschleunigungen umgebender Fahrzeuge. Dies erlaubt eine Untersuchung des Fahrverhaltens einzelner Fahrer, entweder im messenden Fahrzeug oder in umgebenden Fahrzeugen.

Bei den bewegten Meßverfahren, bei denen die Bewegung des Beobachters unabhängig vom beobachteten Verkehr ist, sind verschiedene Geschwindigkeiten denkbar. Ein Beispiel ist die Beobachtung vom Flugzeug aus, z.B. in BECKER (1989).

Zu erwähnen sind an dieser Stelle noch solche Meßverfahren, die zwar das Fahrverhalten zum Ziel haben, die aber nicht direkt im Verkehr durchgeführt werden. Gemeint sind Messungen mit Fahrsimulatoren, von denen ganz unterschiedliche Typen entwickelt worden sind. Gemeinsam ist ihnen allen, daß dem Testfahrer durch mehr oder weniger aufwendige Verfahren eine Umgebung vorgespielt wird, die eine Abstraktion von Verkehrssituationen darstellt. Vorteile dieser Meßverfahren sind die leichte Reproduzierbarkeit gleicher Verkehrszustände, z.B. für verschiedene Testfahrer, und die leichte Integration zusätzlicher fahrzeug- und straßenseitiger Systeme, die im realen Verkehr noch nicht existieren, z.B. Systeme der Fahrdynamik oder Fahrbeeinflussungssysteme. Wesentlicher Nachteil von Simulatormessungen ist in jedem Fall die künstliche Fahrumgebung, die auch bei aufwendiger Umweltrepräsentation immer das Risikoakzeptanzverhalten der Testfahrer beeinflusst und damit nur eingeschränkt zu natürlichem Fahrverhalten führen wird.

4.2 Empirische Untersuchungen anderer Forschergruppen

4.2.1 Messungen des Fahrzeugfolgeverhaltens

Die in Kapitel 3 beschriebenen Modellentwicklungen waren in der Regel von umfangreichen empirischen Untersuchungen begleitet.

Die Forschergruppe bei GENERAL MOTORS konstruierte einen **Car-Follower**, bei dem zwei Fahrzeuge durch einen über eine Spule gespannten Draht miteinander verbunden waren. Das Auf- und Abwickeln des Drahts konnte gemessen werden, wodurch der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen und die Geschwindigkeitsdifferenz protokolliert werden konnte. Außerdem wurde die eigene Geschwindigkeit und die eigene Beschleunigung gemessen. Es wurden verschiedene Meßfahrten mit Testfahrern durchgeführt. Diese mikroskopischen Daten wurden verwendet, um die Modellparameter der Fahrzeugfolgegleichungen zu bestimmen (Modellkalibrierung). Gleichzeitig durchgeführte ortsfeste Messungen wurden makroskopisch ausgewertet und dienten der Modellvalidierung.

TODOSIEV (1963) entwickelte einen Simulator, bei dem den Testfahrern auf einem Fernsehbildschirm ein Fahrzeug angezeigt wurde. Es konnten Veränderungen in der Relativgeschwindigkeit zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem vom Testfahrer "gefahrenen" Fahrzeug widergespiegelt werden. TODOSIEV untersuchte mit diesen Simulatorversuchen die menschliche Wahrnehmung von Veränderungen der Relativgeschwindigkeit im Fahrzeugfolgeprozess bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten. Er bestimmte die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die Testfahrer positive und negative Geschwindigkeitsunterschiede zum vorausfahrenden Fahrzeug wahrnehmen, und zwar abhängig vom Abstand und von der Präsentationsdauer. Diese Wahrscheinlichkeiten nutzte er, um die Wahrnehmungsschwellen (velocity thresholds) zu definieren, die in seinem Modell der Aktionspunkte verwendet wurden.

MICHAELS und COZAN (1963) untersuchten die Reaktion auf am Fahrbahnrand stehende Objekte. Sie erkannten die Geschwindigkeit der Veränderung des gesehenen Winkels, der in diesem Fall durch die Außenkanten des lateralen Objekts beschrieben wird, als Auslöser für die lateralen Ausweichbewegung. Sie erkannten Winkelgeschwindigkeiten von 3 bis $10 \cdot 10^{-4}$ rad/s als Schwellenwerte, bei denen die Reaktion beginnt.

HOEFS (1972) führte Messungen im bewegten Fahrzeug durch, um sowohl die auf deterministischen Fahrzeugfolgegleichungen aufbauenden und in 3.2.1.1 beschriebenen Modelle, als auch die psychophysischen Ansätze von MICHAELS und TODOSIEV empirisch für europäische Verhältnisse zu überprüfen. Er verwendete dazu einen VW-Transporter, der u.a. mit einer Registrierkamera ausgerüstet war. Mit der dicht hinter der Hecktür angebrachten und für nachfolgende Fahrer nicht erkennbaren Kamera wurden in Abständen von 0,5 Sekunden Bilder vom jeweils nachfolgenden Fahrzeug aufgenommen.

Mit diesem Meßfahrzeug wurden auf zwei Meßstrecken zwei unterschiedliche Typen von Messungen durchgeführt. Auf der ersten Meßstrecke sollten längere Folgevorgänge beobachtet werden. Hier fuhr der Meßwagen zunächst "normal" im Fahrzeugstrom mit. Während der eigentlichen Messung wurde das Fahrverhalten ohne festes Programm geändert, wobei darauf geachtet wurde, daß die künstlich erzeugten Störungen von nachfolgenden Fahrzeugen als der Verkehrssituation angemessen empfunden wurden, genügend Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge

gemessen wurden und ungefähr gleiche Verzögerungen durch Motorbremse und durch hydraulische Bremse erreicht wurden.

Auf der zweiten Meßstrecke fuhr der Meßwagen zunächst hinter einer LKW-Kolonne. Sobald beide Fahrstreifen hinter ihm auf einer Länge von etwa 1 km nicht belegt waren, wechselte er auf den linken Fahrstreifen. Näherte sich ein schnelleres Fahrzeug von hinten, fuhr der Meßwagen mit konstanter Geschwindigkeit an der LKW-Kolonne vorbei, und zwar so schnell, daß der Meßwagen am Ende des Annäherungsvorgangs ungefähr auf gleicher Höhe mit dem zweiten LKW war.

Die Fahrten auf der zweiten Meßstrecke wurden zur Überprüfung der Wahrnehmungsschwellen im Annäherungsverhalten verwendet (MICHAELS (1963), WIEDEMANN (1968)). Für die 22 Annäherungsvorgänge wurden die Aktionspunkte, in denen sich das Fahrverhalten ändert, in ein $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm eingetragen und mit den Schwellen von MICHAELS und WIEDEMANN verglichen (siehe Abb. 4-2). HOEFS stellte dabei fest, daß seine Messungen nur bedingt mit den Modellvorstellungen vergleichbar sind, da durch die Form der Messungen ein aggressives Fahrverhalten der sich annähernden Fahrzeuge provoziert wurde.

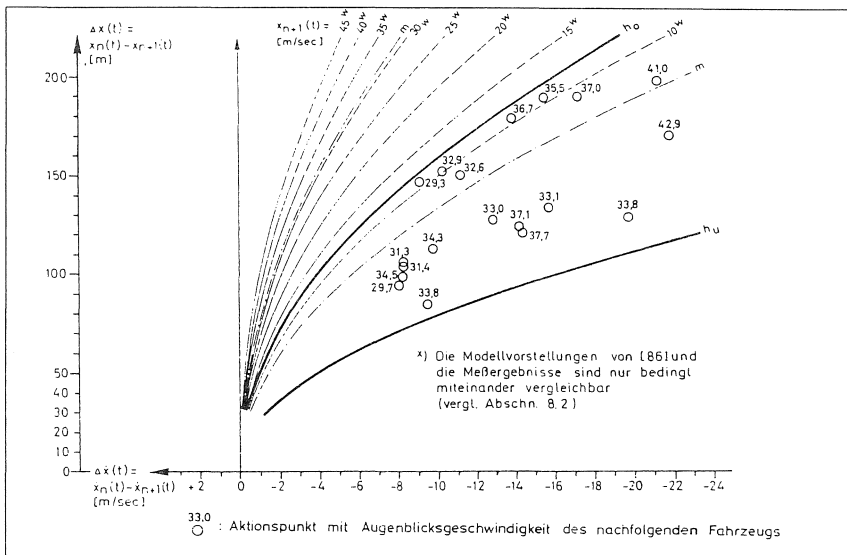


Abb. 4-2: Untersuchung des Annäherungsverhaltens bei HOEFS

Außerdem untersuchte HOEFS das sich an den Annäherungsvorgang anschließende Folgeverhalten sowie das Folgeverhalten aus den Kolonnenfahrten auf der ersten Meßstrecke. Er nutzte diese Messungen, um mittlere Folgeabstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs darzustellen (s. Abb. 4-3).

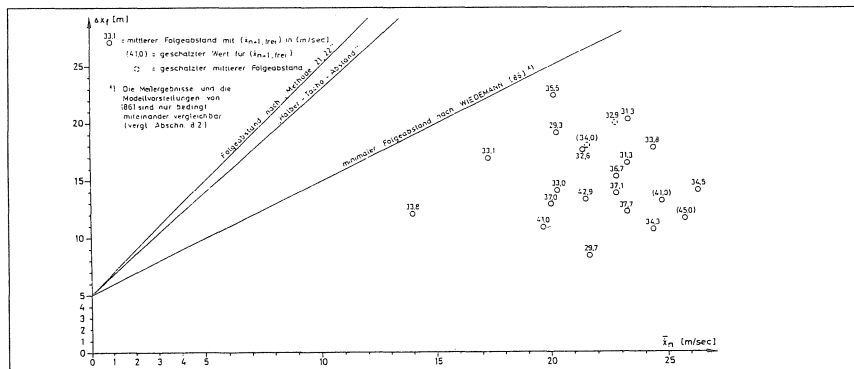


Abb. 4-3: Untersuchung des Folgeverhaltens bei HOEFS

4.2.2 Messungen des Fahrstreifenwechselverhaltens

MEINEFELD (1976) führte Messungen an dreistreifigen Bundesautobahnen durch. Gemessen wurde mit zwei bzw. drei Videokameras, mit denen eine Streckenlänge von 1,4 km aufgenommen werden konnte und mit Induktionsschleifen. Hauptuntersuchungsziel war das Fahrverhalten vor Ausfahrten mit Spursubtraktion. Als Vergleich führte er auch Messungen an einem ungestörten dreistreifigen Streckenabschnitt durch. Er wertete die Aufnahmen aber nur makroskopisch aus. Er stellte die Parameter Spurbelegung und Spurwechselhäufigkeit SW_{ij} (Zahl der Spurwechsel von Spur i nach Spur j pro 100 m und 1 min bezogen auf die Anzahl Fahrzeuge in Spur i) in Abhängigkeit von Verkehrsstärke und LKW-Anteil dar.

WILLMANN (1978) führte ortsfeste Messungen an einer zweistreifigen BAB durch, auf der die Fahrzeuge über einer Streckenlänge von 1 km an 11 Querschnitten erfaßt wurden. Er konnte durch manuelle Auswertung der Meßstreifen die Anzahl der Fahrstreifenwechsel auf der Meßstrecke ermitteln. Er nutzte die Messungen zum Vergleich von Simulationsdaten zu Meßdaten (Modellvalidierung), wobei er sich auf die makroskopische Betrachtungsweise beschränken mußte.

SPARMANN (1978) führte Messungen an derselben Meßstrecke durch, wobei er die Induktionsschleifenerfassung durch 2 Beobachter ergänzte, die Beginn und Ende von Fahrstreifenwechsellvorgängen mittels Kontaktgebern festhalten konnten. Durch die Kombination beider Formen von Meßdaten war es ihm möglich, die exakten Zeitpunkte der Fahrstreifenwechsel und die Zeitlücken zu umgebenden Fahrzeugen zu erfassen. Die von den Beobachtern einzusehende Strecke wurde auf 350 m begrenzt. Diese Beobachtungen wurden zur mikroskopischen Auswertung verwendet. SPARMANN nutzte die mikroskopischen Auswertungen der Messungen zur Bestimmung der Wahrnehmungs- und Aktionsschwellen seines Modells. Dazu teilte

er die Fahrstreifenwechselvorgänge in Klassen ein, untersuchte Abstände und Zeitlücken zu umgebenden Fahrzeugen, Dauer der Fahrstreifenwechsel und Geschwindigkeitsverteilungen zu Beginn der Fahrstreifenwechselvorgänge. Die makroskopische Betrachtung diente lediglich dem Vergleich von empirischen Daten mit simulierten Daten (Modellvalidierung).

BUSCH (1984) führte an derselben Meßstrecke nach Umbau zur dreistreifigen Richtungsfahrbahn Messungen durch. Es wurden wieder die Meßimpulse von den in 100 m Abständen liegenden Induktionsschleifen verwendet. Zusätzlich wurde der Verkehr mit zwei S8-Kameras aufgenommen, die mit einer Bildfolgezeit von 0,5 s arbeiteten. Die Auswertung der Meßdaten erfolgte ausschließlich makroskopisch. BUSCH stellte die Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke dar, sowie den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit aller Fahrstreifenwechsel und der Gesamtverkehrsstärke. Außerdem analysierte er die Häufigkeit von Fahrstreifenwechseln zwischen bestimmten Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf diesen Fahrstreifen. Bezogen auf die Verkehrsdichte untersuchte er nur den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit aller Fahrstreifenwechsel und der Gesamtdichte. Schließlich stellte er noch die Fahrstreifenwechselhäufigkeit in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsunterschied zwischen den betroffenen Fahrstreifen dar.

4.3 Eigene Messungen

Zur Kalibrierung und Validierung des ausgewählten mikroskopischen Modells mußten im Rahmen dieser Arbeit neue Messungen durchgeführt werden. Wie weiter oben beschrieben, stützten sich zwar alle Phasen der Modellentwicklung auf umfangreiche empirische Untersuchungen, jedoch waren die letzten Messungen, die mikroskopische Daten für das Modell geliefert hatten, diejenigen von Hoefs (1972) für das Fahrzeugfolgenmodell und von Sparmann (1978) für das Fahrstreifenwechselmodell. Seitdem wurden regelmäßig Meßdaten auf Richtungsfahrbahnen erhoben, die zur Validierung des Modells genutzt werden konnten. Allerdings konnten diese Meßdaten nicht zur eigentlichen Modellkalibrierung verwendet werden, da sie durchweg makroskopischer Natur waren, bzw. mit ortsfesten Meßverfahren erhoben worden waren. Gemessen wurden dabei makroskopische Parameter, wie Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, mittlere lokale Geschwindigkeit und Fahrstreifenaufteilung, sowie die Verteilungen verschiedener lokal gemessener Größen: Geschwindigkeit, Wunschgeschwindigkeit, Zeitlücken, Abstände. Diese Verteilungen können zwar nicht als makroskopisch bezeichnet werden, sie sind aber ebenfalls nicht mikroskopisch, also fahrzeugfein, da sie nur eine lokale Momentaufnahme der betreffenden Parameter darstellen. Auch diese quasi-mikroskopischen Meßergebnisse können bestenfalls zur Validierung des mikroskopischen Modells herangezogen werden. In Kapitel 5 wird ausführlicher motiviert, warum diese Form von Meßdaten zur Modellkalibrierung ungeeignet ist.

Um das mikroskopische Modell an die aktuellen Verkehrsverhältnisse anzupassen, wurde daher ein Verfahren gewählt, das echte fahrzeugfeine Daten lieferte: ein

bewegtes Meßverfahren. Dieses Verfahren wird im folgenden vorgestellt. Aus meßtechnischen Gründen konnte dabei nur der Fahrzeugfolgevorgang untersucht werden. Für das Modell des Fahrstreifenwechselverhaltens mußte auf die Ergebnisse von ortsfesten Messungen aus dem Jahre 1991 zurückgegriffen werden (QUEREJETA, REITER 1991).

4.3.1 Beschreibung der Messungen

Für eigene Messungen stand ein Meßwagen von der Firma BOSCH in Ettlingen zur Verfügung, mit dem insgesamt drei Meßserien durchgeführt wurden. Während der Messungen der ersten Meßserie war das Fahrzeug mit nach vorne gerichtetem Infrarot-Sensor ausgerüstet, bei der zweiten Meßreihe kam ein Radar-Sensor hinzu. Mit beiden Sensoren konnte der Abstand zu Objekten vor dem messenden Fahrzeug und die Geschwindigkeitsdifferenz zu diesen ermittelt werden. Die Sensoren hatten eine Reichweite von etwa 150 Metern. Neben diesen Parametern der Relativbewegung wurden noch Parameter der eigenen Bewegung aufgenommen, der zurückgelegte Weg, die eigene Geschwindigkeit und die Beschleunigung. Alle Parameter wurden mit einer Frequenz von 10 Hz in einer Datei eines mitgeführten PC protokolliert. Die Genauigkeit, mit der die Meßdaten auf dem PC abgelegt wurden, war:

Zeit [1/100 sec], Weg [0.05 m], Geschwindigkeit [1/256 m/s], Beschleunigung [0.125 m/s²], Abstand [1/256 m], Geschwindigkeitsdifferenz [1/256 m/s].

In der dritten Meßserie wurde ein Radar-Sensor am Fahrzeugheck installiert, mit dem Objekte hinter dem Meßfahrzeug erfaßt werden konnten. Auch hier wurden wieder die genannten Parameter der eigenen Bewegung aufgenommen und protokolliert. Die aufgenommenen Parameter der Relativbewegung bezogen sich nun auf dem Meßfahrzeug nachfolgende Fahrzeuge.

Eine ausführlichere Beschreibung der Messungen, der Meßauswertungen und der Meßergebnisse findet sich in REITER et al. (1994).

Die ersten beiden Meßserien

In den ersten beiden Meßreihen wurden Messungen mit insgesamt 14 Fahrern durchgeführt. Untersuchungsziel war das Fahrzeugfolgeverhalten der Testfahrer. Die Testfahrer waren Mitarbeiter der Firma BOSCH Ettlingen und des Instituts für Verkehrswesen. Die Testfahrer gehörten verschiedenen Altersgruppen zwischen 20 und 50 Jahren an, waren alle männlichen Geschlechts, hatten unterschiedliche Fahrpraxis und verschiedene Hauptbeschäftigungen (wissenschaftliche und nicht-wissenschaftliche Angestellte sowie Studenten). Alle Testfahrer hatten mit den Untersuchungen oder mit der Modellierung von Fahrzeugfolgevorgängen nichts zu tun. Das eigentliche Untersuchungsziel wurde ihnen nicht genannt.

Mit allen Fahrern wurde jeweils eine Fahrt von 40 bis 60 Minuten durchgeführt. Die eigentlichen Messungen fanden nur auf Richtungsfahrbahnen statt: innerstädtische

er die Fahrstreifenwechselvorgänge in Klassen ein, untersuchte Abstände und Zeitlücken zu umgebenden Fahrzeugen, Dauer der Fahrstreifenwechsel und Geschwindigkeitsverteilungen zu Beginn der Fahrstreifenwechselvorgänge. Die makroskopische Betrachtung diente lediglich dem Vergleich von empirischen Daten mit simulierten Daten (Modellvalidierung).

BUSCH (1984) führte an derselben Meßstrecke nach Umbau zur dreistreifigen Richtungsfahrbahn Messungen durch. Es wurden wieder die Meßimpulse von den in 100 m Abständen liegenden Induktionsschleifen verwendet. Zusätzlich wurde der Verkehr mit zwei S8-Kameras aufgenommen, die mit einer Bildfolgezeit von 0,5 s arbeiteten. Die Auswertung der Meßdaten erfolgte ausschließlich makroskopisch. BUSCH stellte die Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke dar, sowie den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit aller Fahrstreifenwechsel und der Gesamtverkehrsstärke. Außerdem analysierte er die Häufigkeit von Fahrstreifenwechseln zwischen bestimmten Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf diesen Fahrstreifen. Bezogen auf die Verkehrsdichte untersuchte er nur den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit aller Fahrstreifenwechsel und der Gesamtdichte. Schließlich stellte er noch die Fahrstreifenwechselhäufigkeit in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsunterschied zwischen den betroffenen Fahrstreifen dar.

4.3 Eigene Messungen

Zur Kalibrierung und Validierung des ausgewählten mikroskopischen Modells mußten im Rahmen dieser Arbeit neue Messungen durchgeführt werden. Wie weiter oben beschrieben, stützten sich zwar alle Phasen der Modellentwicklung auf umfangreiche empirische Untersuchungen, jedoch waren die letzten Messungen, die mikroskopische Daten für das Modell geliefert hatten, diejenigen von Hoefs (1972) für das Fahrzeugfolgenmodell und von Sparmann (1978) für das Fahrstreifenwechselmodell. Seitdem wurden regelmäßig Meßdaten auf Richtungsfahrbahnen erhoben, die zur Validierung des Modells genutzt werden konnten. Allerdings konnten diese Meßdaten nicht zur eigentlichen Modellkalibrierung verwendet werden, da sie durchweg makroskopischer Natur waren, bzw. mit ortsfesten Meßverfahren erhoben worden waren. Gemessen wurden dabei makroskopische Parameter, wie Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, mittlere lokale Geschwindigkeit und Fahrstreifenaufteilung, sowie die Verteilungen verschiedener lokal gemessener Größen: Geschwindigkeit, Wunschgeschwindigkeit, Zeitlücken, Abstände. Diese Verteilungen können zwar nicht als makroskopisch bezeichnet werden, sie sind aber ebenfalls nicht mikroskopisch, also fahrzeugfein, da sie nur eine lokale Momentaufnahme der betreffenden Parameter darstellen. Auch diese quasi-mikroskopischen Meßergebnisse können bestenfalls zur Validierung des mikroskopischen Modells herangezogen werden. In Kapitel 5 wird ausführlicher motiviert, warum diese Form von Meßdaten zur Modellkalibrierung ungeeignet ist.

Um das mikroskopische Modell an die aktuellen Verkehrsverhältnisse anzupassen, wurde daher ein Verfahren gewählt, das echte fahrzeugfeine Daten lieferte: ein

bewegtes Meßverfahren. Dieses Verfahren wird im folgenden vorgestellt. Aus meßtechnischen Gründen konnte dabei nur der Fahrzeugfolgevorgang untersucht werden. Für das Modell des Fahrstreifenwechselverhaltens mußte auf die Ergebnisse von ortsfesten Messungen aus dem Jahre 1991 zurückgegriffen werden (QUEREJETA, REITER 1991).

4.3.1 Beschreibung der Messungen

Für eigene Messungen stand ein Meßwagen von der Firma BOSCH in Ettlingen zur Verfügung, mit dem insgesamt drei Meßserien durchgeführt wurden. Während der Messungen der ersten Meßserie war das Fahrzeug mit nach vorne gerichtetem Infrarot-Sensor ausgerüstet, bei der zweiten Meßreihe kam ein Radar-Sensor hinzu. Mit beiden Sensoren konnte der Abstand zu Objekten vor dem messenden Fahrzeug und die Geschwindigkeitsdifferenz zu diesen ermittelt werden. Die Sensoren hatten eine Reichweite von etwa 150 Metern. Neben diesen Parametern der Relativbewegung wurden noch Parameter der eigenen Bewegung aufgenommen, der zurückgelegte Weg, die eigene Geschwindigkeit und die Beschleunigung. Alle Parameter wurden mit einer Frequenz von 10 Hz in einer Datei eines mitgeführten PC protokolliert. Die Genauigkeit, mit der die Meßdaten auf dem PC abgelegt wurden, war:

Zeit [1/100 sec], Weg [0.05 m], Geschwindigkeit [1/256 m/s], Beschleunigung [0.125 m/s²], Abstand [1/256 m], Geschwindigkeitsdifferenz [1/256 m/s].

In der dritten Meßserie wurde ein Radar-Sensor am Fahrzeugheck installiert, mit dem Objekte hinter dem Meßfahrzeug erfaßt werden konnten. Auch hier wurden wieder die genannten Parameter der eigenen Bewegung aufgenommen und protokolliert. Die aufgenommenen Parameter der Relativbewegung bezogen sich nun auf dem Meßfahrzeug nachfolgende Fahrzeuge.

Eine ausführlichere Beschreibung der Messungen, der Meßauswertungen und der Meßergebnisse findet sich in REITER et al. (1994).

Die ersten beiden Meßserien

In den ersten beiden Meßreihen wurden Messungen mit insgesamt 14 Fahrern durchgeführt. Untersuchungsziel war das Fahrzeugfolgeverhalten der Testfahrer. Die Testfahrer waren Mitarbeiter der Firma BOSCH Ettlingen und des Instituts für Verkehrswesen. Die Testfahrer gehörten verschiedenen Altersgruppen zwischen 20 und 50 Jahren an, waren alle männlichen Geschlechts, hatten unterschiedliche Fahrpraxis und verschiedene Hauptbeschäftigungen (wissenschaftliche und nicht - wissenschaftliche Angestellte sowie Studenten). Alle Testfahrer hatten mit den Untersuchungen oder mit der Modellierung von Fahrzeugfolgevorgängen nichts zu tun. Das eigentliche Untersuchungsziel wurde ihnen nicht genannt.

Mit allen Fahrern wurde jeweils eine Fahrt von 40 bis 60 Minuten durchgeführt. Die eigentlichen Messungen fanden nur auf Richtungsfahrbahnen statt: innerstädtische

Schnellstraße, BAB mit Tempolimit und BAB ohne Tempolimit. Die Fahrt bis zur eigentlichen Meßstrecke wurde jeweils als Eingewöhnungsphase für den Testfahrer betrachtet. Während der Fahrt wurde den Fahrern nahegelegt, sich so natürlich wie möglich zu verhalten. Hin und wieder wurde ihnen jedoch die Anweisung gegeben, auf dem rechten Fahrstreifen zu bleiben bzw. dorthin zu wechseln. Der Grund für diese Anweisung, nämlich die Erfassung eines Annäherungsvorgangs an ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug, wurde ihnen jedoch nicht genannt.

Zu den Bedingungen, unter denen die Messungen der ersten beiden Serien stattfanden, zunächst noch ein paar Bemerkungen:

- (1) Gemessen wurde nicht ein modelltechnisch idealisiertes Folgeverhalten, sondern das natürliche Fahrverhalten der Testfahrer, das geprägt ist von häufigen Fahrstreifenwechseln, wann immer eine Behinderung auf dem augenblicklichen Fahrstreifen vorliegt und ein Fahrstreifenwechsel möglich ist.
- (2) Hin und wieder wurde den Testfahrern die Anweisung gegeben, auf einem Fahrstreifen zu bleiben. Häufig war dies der Fall, wenn ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug, z.B. ein LKW, auf dem Fahrstreifen fuhr. Damit sollten Annäherungsvorgänge erzwungen werden, die aber nicht dem natürlichen Fahrverhalten entsprechen, da sie eine Reaktion auf die Fahr-anweisung darstellten.
- (3) Vorausfahrende Fahrzeuge fuhren in der Regel nicht mit konstanter Geschwindigkeit, sondern hatten mindestens geringfügige Schwankungen, die aus der Unfähigkeit der Fahrer resultiert, eine Beschleunigung gleich null einzuhalten. Oft konnten aber auch starke Verzögerungs- oder Beschleunigungsmanöver beim Vorausfahrenden festgestellt werden.

Diese Meßbedingungen hatten verschiedene Auswirkungen auf die Form der Meßergebnisse und auf die Möglichkeiten der Meßauswertung.

- So konnten insgesamt nur sehr wenig echte (ideale) Annäherungsvorgänge beobachtet werden, weil die Testfahrer bei einer potentiellen Behinderung schon frühzeitig versuchten, den Fahrstreifen zu wechseln (Vorbemerkung (1)).
- Hinzu kommt, daß die Testfahrer, wenn sie, wie in Bemerkung (2) beschrieben, eine Fahr-anweisung bekamen, z.B. nach rechts zu wechseln oder den rechten Fahrstreifen nicht zu verlassen, häufig sofort bei Erhalt dieser Fahr-anweisung durch Verzögern auf das langsamere Vorderfahrzeug reagierten. Dies kann entweder daran liegen, daß sie unter normalen Umständen schon auf den jetzt Vorausfahrenden reagiert hätten, daß also der Abstand bei Erhalt der Anweisung schon geringer war als ihre "Aktionsschwelle" für das Reagieren auf langsamere Vorderfahrzeuge. Ein anderer Grund für die sofortige Reaktion kann sein, daß durch die Fahr-anweisung die Aufmerksamkeit für das vorausfahrende Fahrzeug erhöht und damit die natürliche Aktionsschwelle verändert wurde. In jedem Fall waren Zeitpunkt und Form der Reaktion von der Fahr-anweisung beeinflußt.

Demzufolge müssen diese erzwungenen "Annäherungsvorgänge" mit Vorsicht betrachtet werden. Beispiele für die beschriebene sofortige Reaktion finden sich im Anhang.

- Außerdem waren aufgezeichnete Annäherungsvorgänge oftmals dadurch geprägt, daß der Vorausfahrende verzögerte, z.T. sogar stark. Dies bedeutet, daß die Testfahrer zwar auf ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug reagierten, daß es sich aber um keine, im Sinne des Modells, ideale Annäherung an ein konstant fahrendes Fahrzeug handelt (Vorbemerkung (3)). Die Aktionspunkte können demzufolge nicht als Knick in der Fahrlinie des $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm identifiziert werden. Dennoch sollten die Reaktionen bei diesen Annäherungen zur Bestimmung der Aktionspunkte des Annäherungsverhaltens im Modell genutzt werden.
- Auch die beobachteten Folgevorgänge wurden durch die in den Vorbemerkungen beschriebenen Meßbedingungen beeinflusst. So konnten wegen der Möglichkeit zum Fahrstreifenwechsel (Bemerkung (1)) natürliche Folgevorgänge nicht in allen Geschwindigkeitsbereichen gemessen werden. Echte Folgevorgänge finden sich nur auf den hochbelasteten Streckenabschnitten, die im Untersuchungsfall mit den zweistreifigen Streckenabschnitten übereinstimmen, auf denen jeweils Geschwindigkeitsbeschränkung galten. Resultat hiervon ist, daß im niedrigen Geschwindigkeitsbereich sehr viele Folgevorgänge gemessen werden konnten, bei höheren Geschwindigkeiten dagegen sehr viel weniger.
- Auch bei den Folgevorgängen konnten z.T. sehr starke Geschwindigkeitsänderungen des Vorausfahrenden festgestellt werden, was auch hier zu modelltechnisch nicht idealen Bedingungen führt.

Die Erfahrungen bei der Auswertung der Messungen der ersten beiden Serien zeigten, daß weitere Messungen sinnvoll wären, bei denen die aus den Meßbedingungen resultierenden Einschränkungen vermieden werden können. Dies führte zu der Meßanordnung in der dritten Meßserie.

Die dritte Meßserie

Das Meßfahrzeug wurde nun zusätzlich mit einem am Fahrzeugheck angebrachten Radar-Sensor ausgerüstet. Dieser nach hinten gerichtete Sensor wurde durch eine getönte Scheibe abgedeckt, so daß er für nachfolgende Fahrer nicht wahrnehmbar war. Damit wurde es möglich, das Fahrverhalten nachfolgender Fahrzeuge aufzuzeichnen und für die Kalibrierung des Fahrzeugfolgeverhaltens zu nutzen. Durch geschickte Wahl der Meßstrecke muß allerdings sichergestellt werden, daß für die Kalibrierung typische Situationen erfaßt werden. Vorteile dieser Meßanordnung sind:

- Es können beliebig viele Fahrer in nachfolgenden Fahrzeugen beobachtet werden, und nicht nur die statistisch nicht sehr repräsentative Auswahl Testfahrer.
- Die erfaßten Fahrer befinden sich in natürlicher Umgebung: sie fahren in ihrem eigenen Fahrzeug, haben kein Meßpersonal an Bord und erhalten keine Fahr-

anweisungen. Sie nehmen nicht wahr, daß ihr Fahrverhalten aufgezeichnet wird und verhalten sich demnach natürlich.

- Die Bewegung des vorausfahrenden Fahrzeugs kann kontrolliert werden. Der Fahrer des Meßfahrzeugs wird versuchen, eine konstante Geschwindigkeit einzuhalten.

Es sollten auch bei dieser Serie sowohl Annäherungs- als auch Folgevorgänge gemessen werden. Für die Aufnahme von Annäherungsvorgängen wurde eine wenig belastete zweistreifige Bundesautobahn benötigt. Die Meßstrecke sollte zweistreifig sein, um Annäherungsvorgänge erzwingen zu können, sie sollte wenig belastet sein, damit die Reichweite des Sensors bei der Aufzeichnung dieser Vorgänge möglichst ausgenutzt werden konnte. Auch für die Messung von Folgevorgängen wurde eine zweistreifige Meßstrecke benötigt, die Bedingung niedriger Belastung war hier allerdings nicht nötig. Eine zweistreifige Meßstrecke erlaubt die Aufzeichnung von Folgevorgängen, denen sich die Folgefahrzeuge nicht entziehen können, wenn das Meßfahrzeug auf dem linken Fahrstreifen fährt und der rechte Fahrstreifen ebenfalls belegt ist.

Ausgewählt wurde die BAB A5 zwischen den Anschlußstellen Baden-Baden und Offenburg, die zur Zeit der Messungen zweistreifig ausgebaut war, nördlich von Baden-Baden in beiden Richtungen jedoch schon dreistreifig. Es wurden insgesamt 95 Vorgänge aufgezeichnet, darunter viele Folgevorgänge sowie einige Annäherungsvorgänge.

Zur Aufnahme von Annäherungsvorgängen wurde die weniger belastete Fahrtrichtung ausgewählt und wie folgt vorgegangen: Der Meßwagen fuhr auf dem rechten Fahrstreifen hinter einem langsameren Fahrzeug, bis sich von weiter hinten ein schnelleres Fahrzeug näherte. Dann wechselte der Meßwagen auf den linken Fahrstreifen und überholte das langsamere Fahrzeug. Die Geschwindigkeit während des Überholvorgangs wurde so gewählt, daß der Annäherungsvorgang des schnelleren Folgefahrzeugs abgeschlossen war, bevor das oder die Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen überholt waren. Der gesamte Annäherungsvorgang wurde aufgezeichnet, zusätzlich der sich anschließende Folgevorgang.

Zur Erfassung von weiteren Folgevorgängen wurden Messungen auf der stärker belasteten Fahrtrichtung der A5 durchgeführt. Dabei wurden Folgevorgänge ausschließlich auf dem linken Fahrstreifen aufgezeichnet, wo nachfolgende Fahrzeuge keine Möglichkeit zum Überholen hatten.

4.3.2 Auswertung der Messungen

Aus den Messungen wurden diejenigen Bereiche ausgewählt, die für eine Kalibrierung des Modells verwendet werden können: Annäherungsvorgänge und Folgevorgänge. Die Auswertung der beiden Arten von Fahrvorgängen war unterschiedlich:

a) Annäherungsverhalten

Bei der Analyse der Annäherungsvorgänge interessieren zwei Aspekte des Fahrverhaltens: Wann ändert der sich annähernde Fahrer sein Verhalten und welchen Zielabstand stellt er am Ende des Annäherungsmanövers ein? Beides sind Größen, die im Modell direkt verwendet werden und die bei der Kalibrierung bestimmt werden müssen.

Für das Annäherungsverhalten ist im Modell die Schwelle SDV definiert, die das Erkennen von und das Reagieren auf langsamere Vorderfahrzeuge nachbildet. Überschreitet ein Fahrer die Schwelle SDV, wird ein Verzögerungsvorgang auf die langsamere Geschwindigkeit des Vorausfahrenden eingeleitet. Die Schwelle repräsentiert die sog. Aktionspunkte, die bei der Auswertung der gemessenen Annäherungsvorgänge bestimmt werden müssen.

Wie oben erläutert, können die Aktionspunkte nicht direkt als Knick im Phasendiagramm abgelesen werden. Stattdessen wurden die Verhaltensänderungen im Meßprofil der absoluten Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs identifiziert. Zu einem solchen Aktionspunkt wurde jeweils im Abstandsprofil der dazugehörige Abstand bestimmt. Damit konnte die Situation im Fahrprofil der Relativbewegung lokalisiert und dem Aktionspunkt ein Wertepaar im $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm zugeordnet werden.

b) Folgevorgänge

Auch bei der Analyse der Folgevorgänge interessieren die Aktionspunkte, in denen die Fahrer ihr Verhalten ändern, sowie die Abstände, die die Fahrer während der Folgevorgänge einhalten, insbesondere die minimalen Folgeabstände.

Die Aktionspunkte konnten hier nicht mit derselben Genauigkeit wie im Annäherungsverhalten bestimmt werden. Wegen der Vielzahl Verhaltensänderungen im Folgeverhalten und den z.T. sehr langen Folgevorgängen wurden die Aktionspunkte nicht wie diejenigen der Annäherungsvorgänge aus den im Geschwindigkeitsprofil erkennbaren Verhaltensänderungen ermittelt, sondern direkt aus den Profilen der Relativbewegung im $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm gewonnen. Der Nachteil ist, daß sich bei dieser Form der Auswertung geringfügige Fehler einschleichen können, weil sich in der Relativbewegung Verhaltensänderungen sowohl des Folgefahrzeugs als auch des Vorausfahrenden widerspiegeln. Diese Fehler resultieren aus Geschwindigkeitsänderungen des Vorausfahrenden. Da die Geschwindigkeitsdifferenzen im Folgeverhalten jedoch gering sind, wurde hier in Anbetracht der Vielzahl Aktionspunkte diese einfachere Form der Auswertung gewählt. Obwohl mit dieser Methode viele Aktionspunkte bestimmt werden konnten, gab es dennoch Situationen, in denen eine eindeutige Lokalisierung unmöglich war. Hier wurde anstatt des genauen Punktes jeweils der Bereich angegeben, in dem die Fahrer ihr Verhalten änderten.

4.3.3 Meßergebnisse

Aus der oben beschriebenen Analyse sowohl der Annäherungs- als auch der Folgevorgänge konnten die folgenden Ergebnisse gewonnen werden: Aktionspunkte im Annäherungsverhalten, Umkehrpunkte im Folgeverhalten, minimale Folgeabstände sowie eine Betrachtung des Beschleunigungsverhaltens. Die Meßergebnisse werden im einzelnen in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

4.3.3.1 Aktionspunkte im Annäherungsverhalten

Die ermittelten Aktionspunkte aller Meßserien sind in $\Delta x/\Delta v$ -Diagrammen in den Abbildungen 4-4 und 4-5 dargestellt. Außerdem ist dort jeweils der Bereich der im Modell realisierten Schwelle SDV dargestellt. Die Wahrnehmungsschwelle SDV ist bisher als normalverteilter Bereich definiert, der in den Abbildungen durch drei Kurven repräsentiert wird: der mittlere Verlauf wird als SDV-50 bezeichnet, die Begrenzungen nach oben und nach unten mit SDV-25 bzw. SDV-75. Diesen entsprechen jeweils verschiedene Ausprägungen des Parameters CX in der Formel für SDV:

$$SDV = -\left(\frac{\Delta X - AX}{CX}\right)^2 \quad (4-2)$$

mit AX dem Stillstandsabstand und CX einem dimensionslosen zwischen 25 und 75 normalverteilten Zufallsparameter (Mittelwert bei 50).

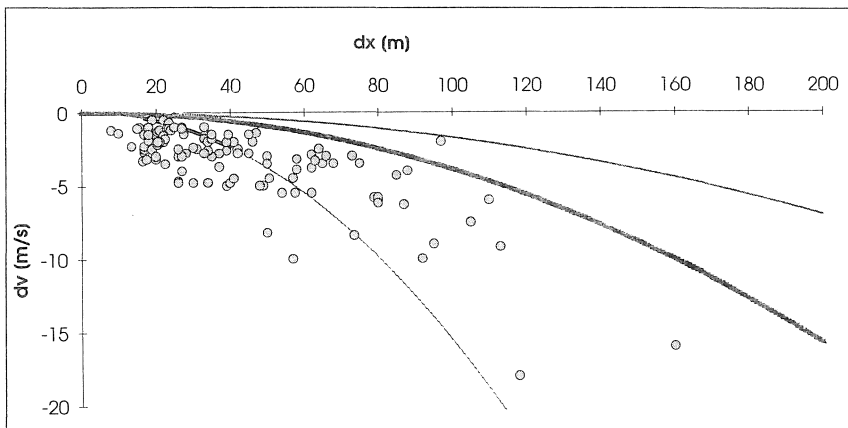


Abb. 4-4: Aktionspunkte im Annäherungsverhalten der ersten beiden Serien und Modellschwellen nach WIEDEMANN (1974)

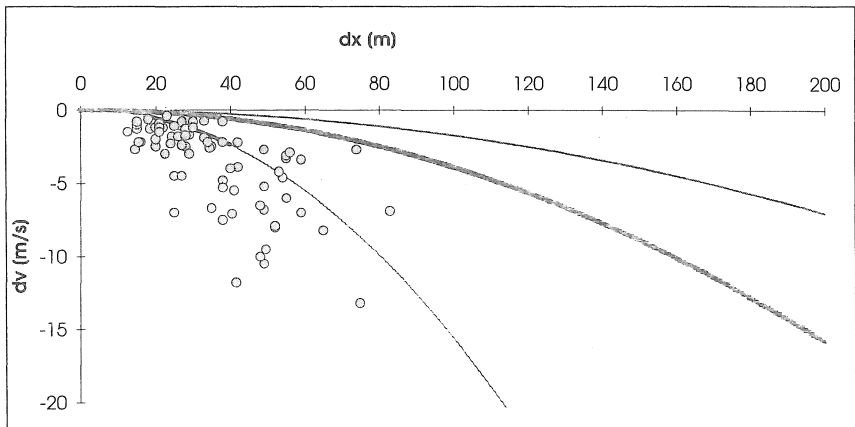


Abb. 4-5: Aktionenpunkte im Annäherungsverhalten der dritten Serie und Modellschwellen nach WIEDEMANN (1974)

Bemerkenswert ist, daß die Verhaltensänderungen in der dritten Serie z.T. bei niedrigeren Abständen stattfanden als diejenigen der ersten beiden Serien. Der Grund dafür ist, daß die Annäherungsvorgänge in der dritten Serie alle durch einen Fahrstreifenwechsel des Meßfahrzeugs künstlich erzwungen wurden. Dieser Fahrstreifenwechsel fand aber oft erst recht spät statt, wenn sich das schnellere Folgefahrzeug schon weit angenähert hatte, weil größere Lücken selten waren (so ideale Bedingungen wie 1972 bei HOEFS sind heutzutage schwerer zu finden). Außerdem wurde das Folgefahrzeug wegen der begrenzten Reichweite des rückwärtigen Sensors erst erfaßt, wenn es sich auf weniger als 80 Meter angenähert hatte. Die Reichweite des Sensors wurde durch die getönte Abdeckung noch zusätzlich reduziert. Aus diesen Gründen wurden die Verhaltensänderungen in den Meßprotokollen oftmals schon wenige Sekunden nach Erfassung des Folgefahrzeugs festgestellt. Dies muß bei der Bewertung der mit diesen Messungen ermittelten Aktionenpunkte berücksichtigt werden: z.T. sind die Abstände niedriger, als dies bei nicht erzwungenen Annäherungsvorgängen der Fall wäre.

4.3.3.2 Aktionenpunkte im Folgeverhalten

Die Verhaltensänderung im Folgeverhalten besteht in der Umkehrung des Betrages der Beschleunigung, weswegen die Aktionenpunkte hier auch Umkehrpunkte genannt werden. Die für das Folgeverhalten in den drei Meßserien ermittelten Umkehrpunkte sind in den $\Delta x / \Delta v$ -Diagrammen der Abbildungen 4-6 und 4-7 eingetragen. Außerdem sind hier jetzt die Aktionsschwellen des Folgeverhaltens dargestellt, so wie sie bisher im Modell definiert sind: OPDV für das Erkennen öffnender Vorgänge, CLDV für das Erkennen schließender Vorgänge.

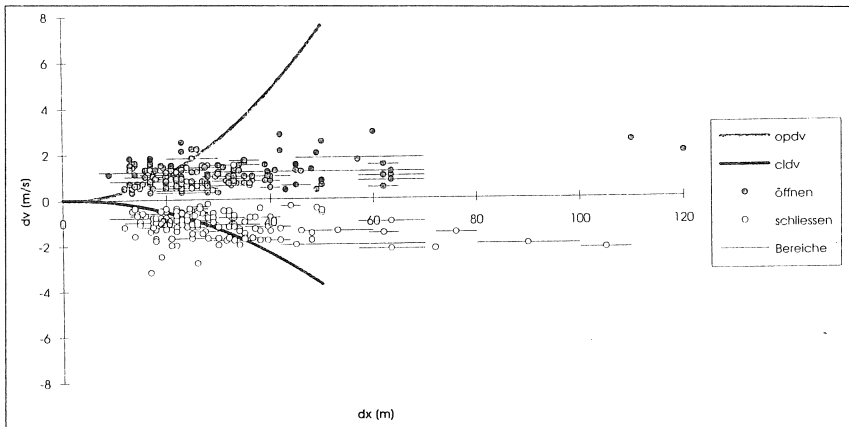


Abb. 4-6: Umkehrpunkte im Folgeverhalten der ersten beiden Serien und Modellschwellen des Folgeverhaltens nach WIEDEMANN (1974)

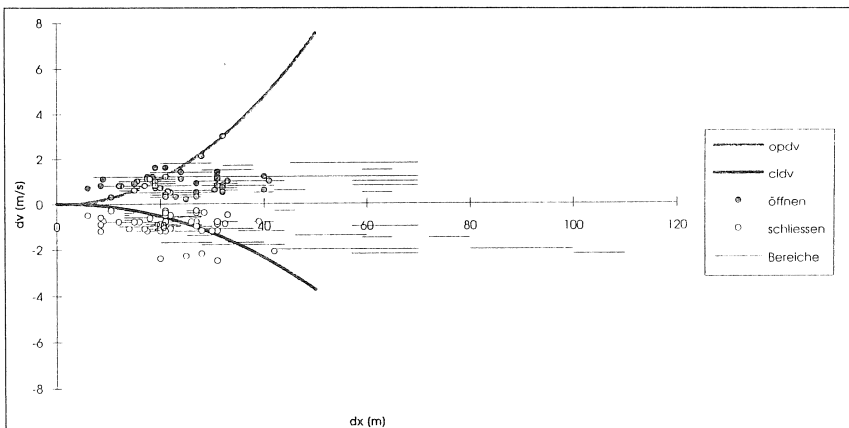


Abb. 4-7: Umkehrpunkte im Folgeverhalten der dritten Serie und Modellschwellen des Folgeverhaltens nach WIEDEMANN (1974)

4.3.3.3 Minimale Folgeabstände

Sowohl bei der Analyse der Annäherungsvorgänge als auch des Folgeverhaltens wurden die minimalen Abstandswerte ermittelt, die die Fahrer jeweils nicht zu unterschreiten wünschen. Als minimale Folgeabstände wurden bei den Annäherungs-

vorgängen die am Ende der Annäherung eingestellten Zielabstände verwendet, beim Folgeverhalten die minimalen Abstandswerte ganzer Folgevorgänge.

Genauso wie bei der Berechnung objektiv sicherer Fahrzeugabstände stellt auch der Mensch subjektiv sichere Abstände ein, die von der absoluten gefahrenen Geschwindigkeit abhängen. WIEDEMANN (1974) hat einen parabolischen Zusammenhang zwischen minimalem Folgeabstand und Geschwindigkeit festgestellt, der zum Ausdruck bringt, daß die eingehaltenen Abstände bei niedrigen Geschwindigkeiten eher zu hoch, bei hohen Geschwindigkeiten eher zu niedrig eingestellt werden, bezogen auf einen objektiven Sicherheitsmaßstab. In Abbildung 4-8 sind die ermittelten Werte minimalen Abstandes in Abhängigkeit von der dabei gefahrenen Geschwindigkeit dargestellt. Ebenso ist der von WIEDEMANN (1974) erkannte Zusammenhang eingetragen, der in dieser Form auch im Modell realisiert ist. Es handelt sich wieder um einen normalverteilten Bereich, für den die Mittelwert- sowie die obere und untere Grenz-Kurve angegeben sind.

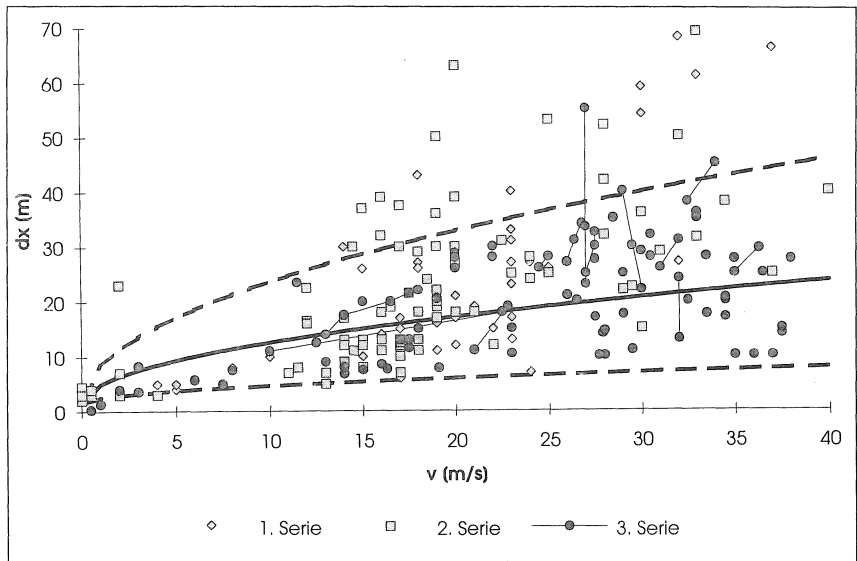


Abb. 4-8: Gemessene minimale Folgeabstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Bereich nach WIEDEMANN (1974)

Verschiedentlich konnte beobachtet werden, daß Fahrer von sich annähernden schnelleren Folgefahrzeugen nicht gleich auf den minimalen Abstand hinbremsen, sondern zunächst einen höheren Abstand bei Geschwindigkeitsdifferenz nahe null einstellen, den sie dann noch mehrfach nach unten korrigieren. Für Annäherungsvorgänge der dritten Serie ist dieses Herantasten an den minimalen Abstand in der

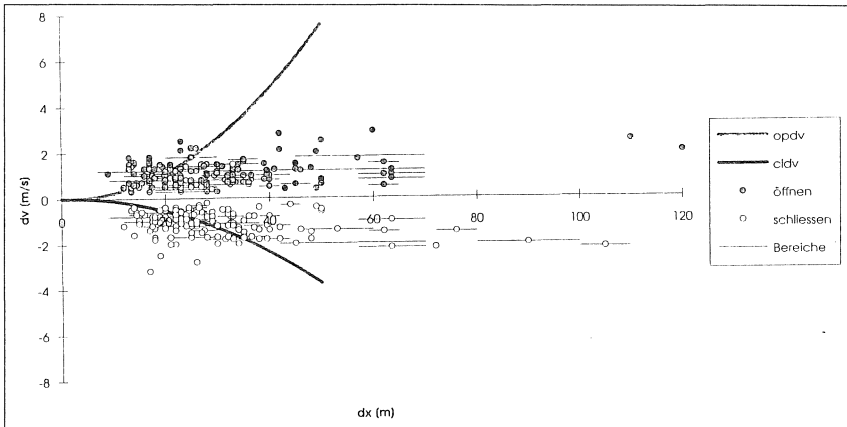


Abb. 4-6: Umkehrpunkte im Folgeverhalten der ersten beiden Serien und Modellschwellen des Folgeverhaltens nach WIEDEMANN (1974)

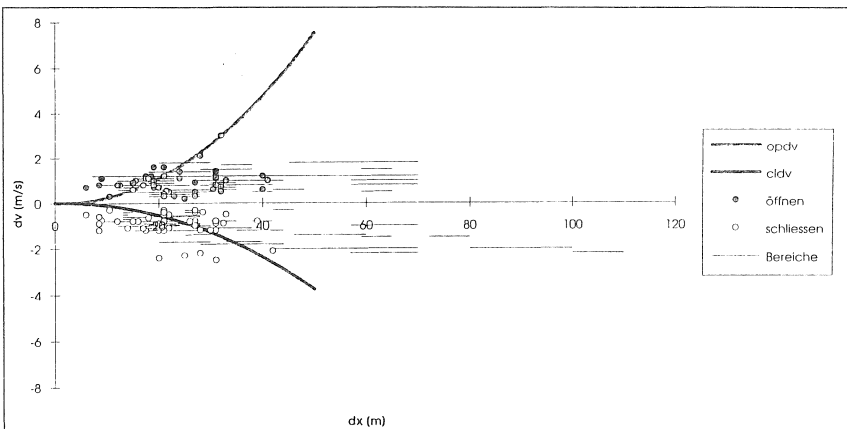


Abb. 4-7: Umkehrpunkte im Folgeverhalten der dritten Serie und Modellschwellen des Folgeverhaltens nach WIEDEMANN (1974)

4.3.3.3 Minimale Folgeabstände

Sowohl bei der Analyse der Annäherungsvorgänge als auch des Folgeverhaltens wurden die minimalen Abstandswerte ermittelt, die die Fahrer jeweils nicht zu unterschreiten wünschen. Als minimale Folgeabstände wurden bei den Annäherungs-

vorgängen die am Ende der Annäherung eingestellten Zielabstände verwendet, beim Folgeverhalten die minimalen Abstandswerte ganzer Folgevorgänge.

Genauso wie bei der Berechnung objektiv sicherer Fahrzeugabstände stellt auch der Mensch subjektiv sichere Abstände ein, die von der absoluten gefahrenen Geschwindigkeit abhängen. WIEDEMANN (1974) hat einen parabolischen Zusammenhang zwischen minimalem Folgeabstand und Geschwindigkeit festgestellt, der zum Ausdruck bringt, daß die eingehaltenen Abstände bei niedrigen Geschwindigkeiten eher zu hoch, bei hohen Geschwindigkeiten eher zu niedrig eingestellt werden, bezogen auf einen objektiven Sicherheitsmaßstab. In Abbildung 4-8 sind die ermittelten Werte minimalen Abstandes in Abhängigkeit von der dabei gefahrenen Geschwindigkeit dargestellt. Ebenso ist der von WIEDEMANN (1974) erkannte Zusammenhang eingetragen, der in dieser Form auch im Modell realisiert ist. Es handelt sich wieder um einen normalverteilten Bereich, für den die Mittelwert- sowie die obere und untere Grenz-Kurve angegeben sind.

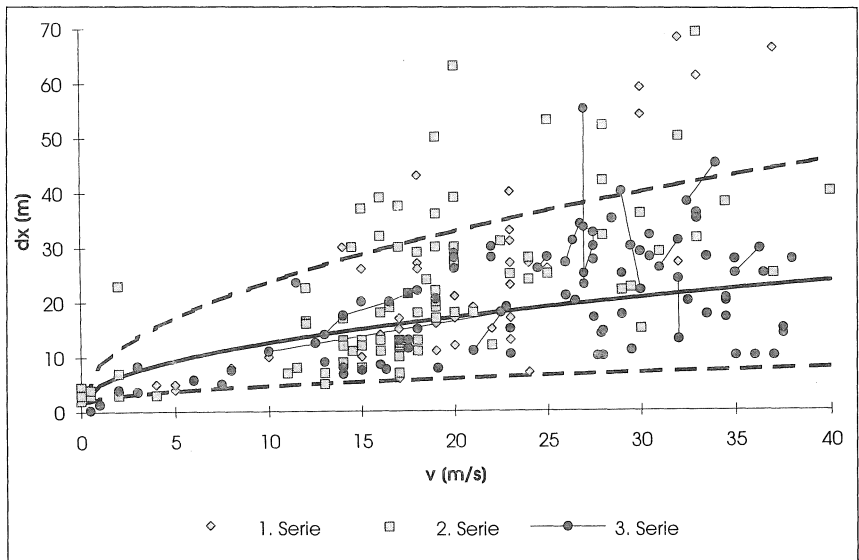


Abb. 4-8: Gemessene minimale Folgeabstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Bereich nach WIEDEMANN (1974)

Verschiedentlich konnte beobachtet werden, daß Fahrer von sich annähernden schnelleren Folgefahrzeugen nicht gleich auf den minimalen Abstand hinbremsen, sondern zunächst einen höheren Abstand bei Geschwindigkeitsdifferenz nahe null einstellen, den sie dann noch mehrfach nach unten korrigieren. Für Annäherungsvorgänge der dritten Serie ist dieses Herantasten an den minimalen Abstand in der

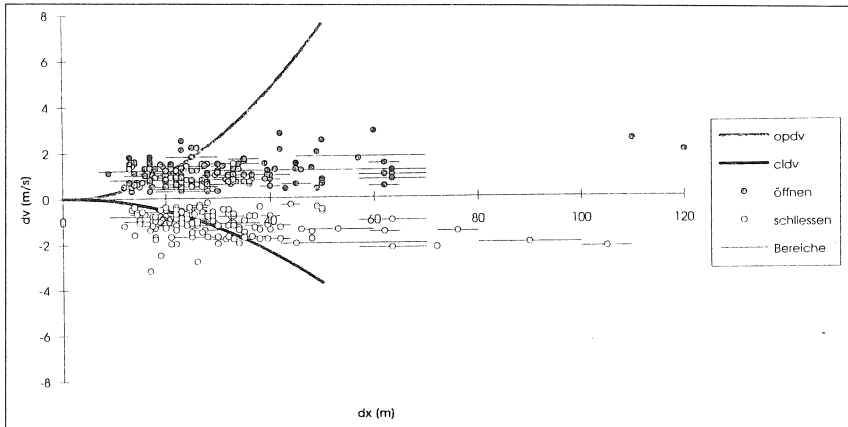


Abb. 4-6: Umkehrpunkte im Folgeverhalten der ersten beiden Serien und Modellschwellen des Folgeverhaltens nach WIEDEMANN (1974)

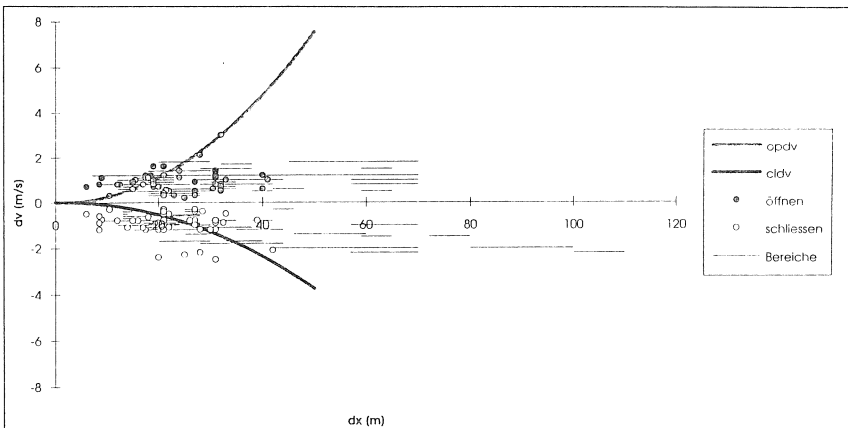


Abb. 4-7: Umkehrpunkte im Folgeverhalten der dritten Serie und Modellschwellen des Folgeverhaltens nach WIEDEMANN (1974)

4.3.3.3 Minimale Folgeabstände

Sowohl bei der Analyse der Annäherungsvorgänge als auch des Folgeverhaltens wurden die minimalen Abstandswerte ermittelt, die die Fahrer jeweils nicht zu unterschreiten wünschen. Als minimale Folgeabstände wurden bei den Annäherungs-

vorgängen die am Ende der Annäherung eingestellten Zielabstände verwendet, beim Folgeverhalten die minimalen Abstandswerte ganzer Folgevorgänge.

Genauso wie bei der Berechnung objektiv sicherer Fahrzeugabstände stellt auch der Mensch subjektiv sichere Abstände ein, die von der absoluten gefahrenen Geschwindigkeit abhängen. WIEDEMANN (1974) hat einen parabolischen Zusammenhang zwischen minimalem Folgeabstand und Geschwindigkeit festgestellt, der zum Ausdruck bringt, daß die eingehaltenen Abstände bei niedrigen Geschwindigkeiten eher zu hoch, bei hohen Geschwindigkeiten eher zu niedrig eingestellt werden, bezogen auf einen objektiven Sicherheitsmaßstab. In Abbildung 4-8 sind die ermittelten Werte minimalen Abstandes in Abhängigkeit von der dabei gefahrenen Geschwindigkeit dargestellt. Ebenso ist der von WIEDEMANN (1974) erkannte Zusammenhang eingetragen, der in dieser Form auch im Modell realisiert ist. Es handelt sich wieder um einen normalverteilten Bereich, für den die Mittelwert- sowie die obere und untere Grenz-Kurve angegeben sind.

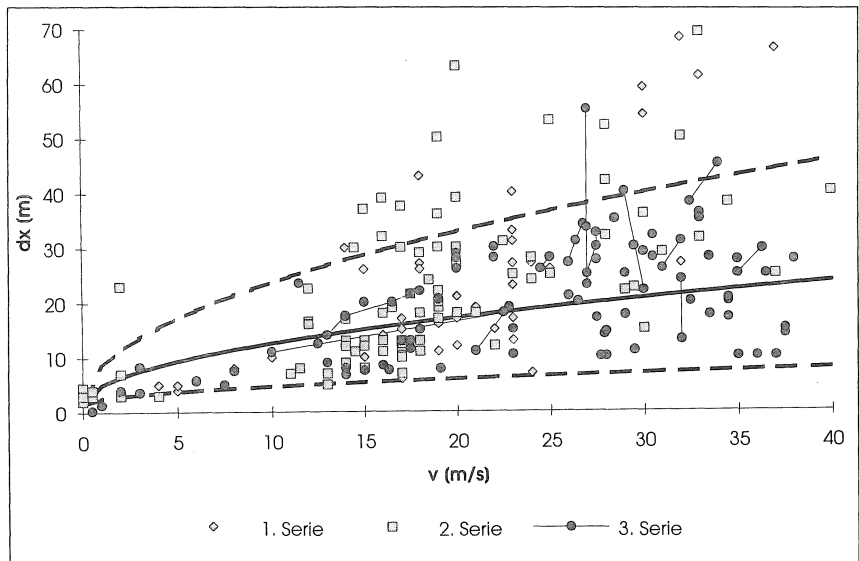


Abb. 4-8: Gemessene minimale Folgeabstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie Bereich nach WIEDEMANN (1974)

Verschiedentlich konnte beobachtet werden, daß Fahrer von sich annähernden schnelleren Folgefahrzeugen nicht gleich auf den minimalen Abstand hinbremsen, sondern zunächst einen höheren Abstand bei Geschwindigkeitsdifferenz nahe null einstellen, den sie dann noch mehrfach nach unten korrigieren. Für Annäherungsvorgänge der dritten Serie ist dieses Herantasten an den minimalen Abstand in der

Abbildung dargestellt: Die Punkte, die die eingestellten Abstandswerte eines Annäherungsvorgangs repräsentieren, sind miteinander verbunden.

4.3.3.4 Das Beschleunigungsverhalten

Ziele der Analyse des Beschleunigungsverhaltens waren die Bestimmung des untersten vom Menschen einstellbaren Werts der Beschleunigung, der im Modell **bnull** genannt ist, sowie die Größenordnung üblicher Beschleunigungs- und Verzögerungswerte.

Die Analyse mußte sich auf die Erfassung der eigenen Beschleunigung beschränken, da die erfaßten Werte des vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeugs zu starke Fehler und Streuungen aufweisen. Es konnten daher nur die Messungen der ersten beiden Serien untersucht werden. Es zeigte sich, daß schon bei der eigenen Beschleunigung sowohl die Messung als auch die Aufzeichnung dieses Parameters großen Ungenauigkeiten und Fehlern unterliegt. Zum einen streuen die aufgezeichneten Meßwerte sehr stark. Ein beispielhaftes Meßprofil findet sich im Anhang. Zum anderen ist die Genauigkeit der aufgezeichneten Werte recht gering: die Auflösung beträgt nur $1/8 \text{ m/s}^2$.

Durch Glättung der erfaßten Werte, z.B. durch gleitende Mittelwerte, konnten diese zwar in sehr viel deutlichere Profile umgewandelt werden. Allerdings gingen dann die extremen Ausprägungen der Meßgröße verloren. Eine Bestimmung von Schwellenwerten, wie z.B. des oben genannten **bnull**, war dann nicht mehr möglich.

Eine weniger detaillierte Form der Darstellung ist die der Häufigkeitsverteilung der Meßgröße. Hierfür finden sich Beispiele im Anhang. Da es sich dabei aber nicht um echte mikroskopische Darstellungen handelt, können diese Diagramme nicht zur Kalibrierung, sondern höchstens zur Validierung des Modells verwendet werden, also zum Vergleich von gemessenen mit simulierten Ausgabedaten. Die Klasseneinteilung von $1/8 \text{ m/s}^2$ ergibt sich direkt aus der Genauigkeit der Meßdatenaufzeichnung. Aus den Diagrammen wird deutlich, daß eine Bestimmung von z.B. obengenanntem **bnull** nicht möglich ist, da die Klassen zu breit sind.

5. Kalibrierung und Validierung des Grundmodells

Die Ergebnisse der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Messungen sollen nun verwendet werden, um das ausgewählte mikroskopische Modell zu kalibrieren bzw. zu validieren. Einleitend wird zunächst prinzipiell diskutiert, von welcher Form empirische Daten sein müssen, um Verkehrsflußmodelle erstellen, kalibrieren und validieren zu können. Anschließend wird die Verwendung der erhobenen Daten beschrieben und die Ergebnisse werden vorgestellt.

5.1 Nutzung empirischer Daten zur Erstellung, Kalibrierung und Validierung von Verkehrsflußmodellen

Erstellung, Kalibrierung und Validierung sind drei Teil-Prozesse bei der Entwicklung von Simulationsmodellen. Die Modellerstellung ist ein kreativer Prozess, in dem Wissen, Erfahrungen, Intuition und empirische Daten genutzt werden, um den betrachteten Ausschnitt der Wirklichkeit zu begreifen und in einem Modell zu abstrahieren. Nach WIEDEMANN (1992) ist Kalibrierung die angemessene mathematische Beschreibung der Zufallsverteilungen und Kenngrößen, die als Eingabegrößen für das entworfene System verwendet werden. Validierung ist ebenfalls nach WIEDEMANN (1992) der Nachweis, daß die empirischen und simulierten Ausgabegrößen des Systems aus denselben Grundgesamtheiten stammen.

Diese drei Teilprozesse werden in der Regel zunächst nacheinander durchgeführt, sollten aber dennoch nicht als streng aufeinanderfolgende Entwicklungsstufen bezeichnet werden, da sich im Entwicklungsprozess Zyklen ergeben können: Zunächst wird ein mathematisches Modell als Abstraktion der Wirklichkeit entworfen. Anschließend wird dieses Modell kalibriert. Beim Versuch, Werte für die kalibrierfähigen Eingabeparameter zu finden, kann sich herausstellen, daß beim Modellentwurf wesentliche Zusammenhänge übersehen wurden, oder daß dem Modell noch grundlegende Fehler anhaften. Dies hat zur Folge, daß der Modellentwurf noch einmal überarbeitet und ggf. verändert werden muß. Ist ein neu erstelltes Modell zufriedenstellend kalibriert worden, kann sich bei der anschließenden Validierung ergeben, daß entweder die Kalibrierung neu durchzuführen ist oder daß gar der Modellentwurf überarbeitet werden muß.

In jedem dieser drei Entwicklungsstufen werden empirische Daten benötigt, die dem Modellentwickler Wissen über den zu modellierenden Ausschnitt der Realität vermitteln. Bei der Modellerstellung benötigt der Modellierer zunächst so viel Informationen und so vielfältige Informationen wie möglich, um Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Umweltgrößen zu erkennen und um Prozesse, die Veränderungen bei den Umweltgrößen hervorrufen, beschreiben zu können. Bei der Kalibrierung werden empirische Daten benötigt, mit denen die im Entwurf als Eingabeparameter definierten Größen bestimmt werden können. Bei der Validierung

schließlich werden Daten benötigt, die mit den Ausgabegrößen des Simulationsmodells verglichen werden können.

Da der Entwurf der verwendeten Grundmodelle zunächst als abgeschlossen betrachtet werden kann und dessen empirische Grundlagen weiter oben schon beschrieben wurden, liegt das Hauptaugenmerk im folgenden auf Kalibrierung und Validierung.

In einem mathematischen Modell werden Zustände der Wirklichkeit, Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Objekten der Wirklichkeit, sowie Funktionen, die Prozesse der Wirklichkeit repräsentieren, unter Zuhilfenahme von mathematischen Größen beschrieben. Dies können einfache Zahlenwerte sein oder auch Zufallsverteilungen, die wiederum durch Zahlenwerte beschrieben werden, wie Stützstellen der Verteilung oder Mittelwert und Standardabweichung z.B. einer Normalverteilung. In jedem Fall repräsentieren diese verschiedenen Modellgrößen entsprechende Größen der Wirklichkeit.

Aufgabe der Kalibrierung ist es nun, für all diese Modellgrößen Werte, oder im Falle von Verteilungen Wertebereiche, aus der Wirklichkeit zu ermitteln. Der Detaillierungsgrad der dafür benötigten empirischen Daten hängt also unmittelbar vom Detaillierungsgrad der Modellierung ab. Die zur Kalibrierung verwendeten Meßgrößen müssen mindestens den Detaillierungsgrad der damit ermittelten Modellgrößen aufweisen. Die Messungen, die zur Ermittlung der modellierten Größen der Wirklichkeit verwendet werden, müssen die beeinflussenden Randbedingungen und Begleitumstände hinreichend erfassen.

Bei einem mikroskopischen Modell des Verkehrsflusses können die mikroskopischen Modellparameter nur aus mikroskopischen, also fahrzeugfeinen Messungen bestimmt werden. Mit diesen Messungen muß der modellierte Wirklichkeitsaspekt, die Fahrzeugbewegung, bezüglich der beeinflussenden Randbedingungen hinreichend erfaßt werden. Dies sind bei den beschriebenen Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens die Veränderungen der Relativbewegung bezüglich eines vorausfahrenden Fahrzeugs, bei Modellen des Fahrstreifenwechsels Veränderungen der Relativbewegung auch bezüglich der Fahrzeuge auf benachbarten Fahrstreifen. Daraus wird deutlich, daß die Messungen zur Kalibrierung dieser Modelle nicht nur fahrzeugfein sein müssen, sondern daß es zudem nötig ist, die genannten Veränderungen erfassen zu können. Dies kann mit ortsfesten Meßverfahren nur dann gewährleistet werden, wenn das einsehbare Wegintervall hinreichend groß ist, z.B. bei Filmaufnahmen aus großer Höhe. Mit querschnittsbezogenen Messungen können die beeinflussenden Veränderungen nicht gemessen werden. Diese Meßmethode eignet sich allerdings zur fahrzeugfeinen Validierung. Zur Kalibrierung der Modelle der Fahrzeugbewegung sollten eher bewegte Meßverfahren eingesetzt werden, und hierbei sind diejenigen besonders geeignet, bei denen sich der Beobachter im Verkehrsstrom mitbewegt und Veränderungen der Relativbewegungen bezüglich umgebender Fahrzeuge unmittelbar aufnehmen kann.

Anders verhält es sich bei der Validierung. Hier werden die simulierten Ausgabegrößen des Systems mit den entsprechenden empirischen Größen verglichen. Der Detaillierungsgrad der zum Vergleich herangezogenen Daten hängt jetzt also von den Ausgabegrößen ab und somit von den Untersuchungszielen, für die das Modell eingesetzt werden soll.

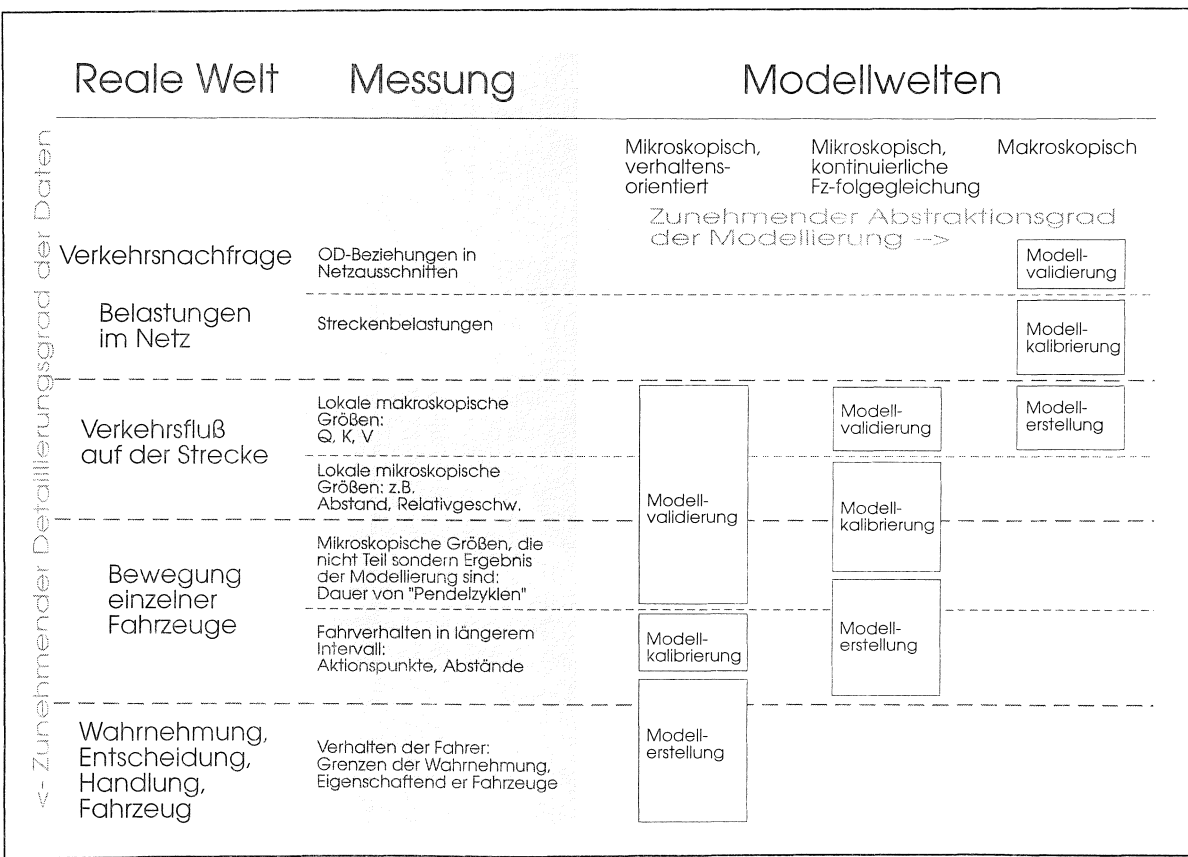
Generell sollten die Ausgabegrößen eines Simulationssystems auf einem höherem Abstraktionsniveau liegen als die die Grundstruktur des Modells bildenden Größen. Werden nämlich mit einem Modell bestimmte Objekte oder Zustände der Wirklichkeit durch verschiedene Modellgrößen repräsentiert, sowie die Prozesse, die Veränderungen an diesen Wirklichkeitsobjekten oder -zuständen hervorrufen, durch entsprechende Modellfunktionen oder -prozeduren nachgebildet, so kann eine Ausgabe eben dieser Modellgrößen zwei Resultate haben: entweder die Größen verhalten sich so, wie in der Realität gemessen, oder aber, die Ausgabe stimmt nicht mit den Veränderungen überein, die im Modell nachgebildet werden sollten. Im ersten Fall wird nichts ausgesagt, das Ergebnis war schon vor der Simulation bekannt; im zweiten Fall ist bei der Implementierung des Modells ein Fehler unterlaufen, da sich das System anders verhält, als vorgesehen. Eine Ausgabe der die Grundstruktur des Modells bildenden Größen kann nur zur Kontrolle der Modellstruktur verwendet werden, nicht aber um damit neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Dies soll an einem Beispiel erläutert werden. Wird in einem Fahrzeugfolgmodell eine Größe aufgrund von Meßdaten eingestellt, also kalibriert, die zur Grundstruktur des Modells gehört, wie z.B. der minimale Folgeabstand, so wird eine Analyse der bei einem Simulationslauf tatsächlich eingehaltenen Folgeabstände zum Ergebnis haben, daß die simulierten Fahrzeuge diesen minimalen Abstand nur in Ausnahmefällen unterschreiten. Andernfalls ist nicht die Kalibrierung der genannten Modellgröße, sondern sogar die Modellstruktur fehlerhaft. Doch selbst wenn die Wirklichkeit entsprechend dem empirischen Wissen korrekt modelliert wurde, kann mit diesem Modell dann naturgemäß keine neue Erkenntnis über eingehaltene Mindestabstände gewonnen werden. Allerdings können mit einem solchen Modell Aussagen über Veränderungen der Leistungsfähigkeit, der durchschnittlichen Geschwindigkeiten u.ä. getroffen werden, die jedoch alle auf einem höheren Abstraktionsniveau liegen, als die Modellgröße minimaler Folgeabstand.

Damit sind auch bereits für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit und die dabei verwendete Modellabstraktion Grenzen möglicher Auswertungen gesetzt. Dies wird im Kapitel 7 berücksichtigt und dort erläutert.

Die Modellausgaben sollen also auf einem höheren Abstraktionsniveau liegen als die Modellgrößen. Da in der Validierung diese Modellausgaben mit der Wirklichkeit verglichen werden, werden hierzu also weniger detaillierte Daten benötigt als in der Kalibrierung. Für mikroskopische Modelle des Verkehrsflusses sind solche abstrakteren Vergleichsgrößen beispielsweise makroskopische Größen und deren Zusammenhänge (Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit), oder lokal erhobene

Abb. 5-1: Zusammenhang zwischen Stufen der Modellentwicklung, Abstraktionsgrad des Modells und dafür benötigte empirische Daten



mikroskopische Größen, wie Geschwindigkeitsverteilung, Zeitlückenverteilung, Wunschgeschwindigkeiten und Fahrstreifenaufteilung an einem Querschnitt. Auch diese lokal erhobenen mikroskopischen Größen stellen bereits ein höheres Abstraktionsniveau dar, als die mikroskopischen Modellgrößen. Sie sind gewissermaßen Ergebnis der Simulation und gehören nicht der Grundstruktur an, mit der die Bewegung der Einzelfahrzeuge repräsentiert wird.

Nach dieser generellen Diskussion, die in Abb. 5-1 für verschiedene Modellwelten schematisiert ist, wird nun im folgenden die Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit erhobenen empirischen Daten zur Modellkalibrierung, sowie das Zurückgreifen auf weniger detaillierte Daten zur Modellvalidierung beschrieben.

5.2 Modellkalibrierung

Zur Kalibrierung können die Auswertungen derjenigen bei den mikroskopischen Messungen erhobenen Größen benutzt werden, die zur Grundstruktur des Bewegungsmodells gehören. Dies sind die Aktionspunkte im Annäherungsverhalten, mit denen die Aktionsschwelle für das Erkennen großer Geschwindigkeitsunterschiede *SDV* kalibriert werden kann. Außerdem sind dies die in den Folgevorgängen erfaßten Bereiche und Aktionspunkte, mit denen die den Folgevorgang im Modell begrenzenden Schwellen *OPDV*, *CLDV* und ggf. *SDX* bestimmt werden können. Schließlich können die Untersuchungen des minimalen Folgeabstands direkt zur Kalibrierung des entsprechenden Abstands im Modell verwendet werden: der Mindestabstand *BX*.

Die anderen Untersuchungen, insbesondere die Analyse des Beschleunigungsverhaltens, lieferten keine Information, die zur Kalibrierung verwendet werden könnte. Der unterste Schwellwert der Beschleunigung konnte wegen der Meßungenauigkeit von $1/8 \text{ m/s}^2$ und der zu großen Streuung des gemessenen Parameters nicht bestimmt werden. Darstellungen wie Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung bzw. Dauer der Pendelzyklen bei Folgevorgängen sind keine zur Grundstruktur gehörenden Parameter. Sie sind vielmehr wieder nur Ergebnis der modellierten Fahrzeugbewegung und können daher nur in der mikroskopischen Modellvalidierung berücksichtigt werden.

5.2.1 Kalibrierung der Schwelle des Annäherungsverhaltens

Die Menge der ermittelten Aktionspunkte reicht alleine nicht aus, um statistisch fundierte Aussagen z.B. über den funktionalen Verlauf der Schwelle im Annäherungsverhalten treffen zu können. Allerdings können die Meßergebnisse ähnlich wie bei früheren Messungen, z.B. bei HOEFS (1972)¹, dazu verwendet werden, die bisherige

¹ HOEFS konnte bei seinen ebenfalls umfangreichen Messungen sogar nur 19 Aktionspunkte im Annäherungsverhalten identifizieren

Modellvorstellung zu bestätigen oder zu verwerfen und ggf. zu korrigieren. In Abbildung 5-2 sind die ermittelten Aktionspunkte der drei Meßserien sowie der Bereich der Schwelle SDV dargestellt (untere und obere Begrenzung SDV25 und SDV75 sowie Mittelwert SDV50 beschreiben die in Kapitel 4 definierte Schwelle, wobei der Kalibrierungsparameter CX hierbei die Werte 25, 75 bzw. 50 annimmt).

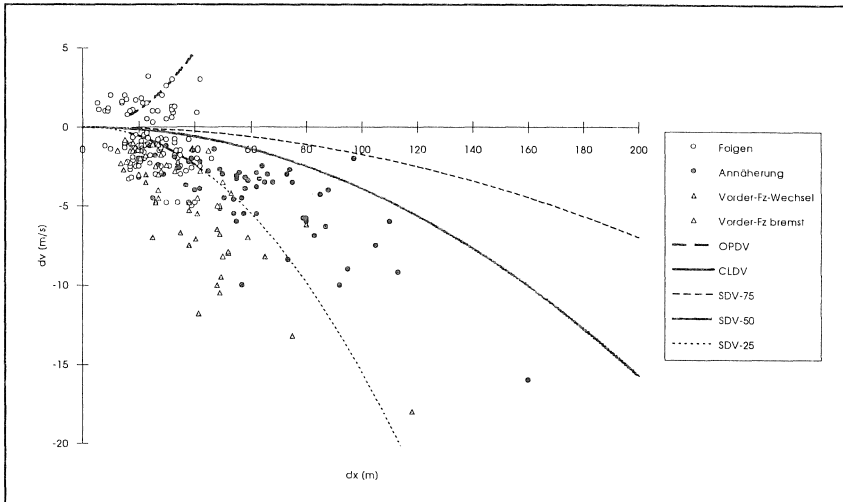


Abb. 5-2: Aktionspunkte im Annäherungs- und Folgeverhalten

In der Auswertung der Meßdaten wurden alle markanten Verhaltensänderungen als Aktionspunkte bezeichnet. Diese werden jetzt danach unterschieden, ob es sich hierbei um Verhaltensänderungen im Folgeprozeß handelte (Folgen), ob der zugehörige Annäherungsvorgang durch eine starke Verzögerung des Vorausfahrenden charakterisiert war (Vorder-Fz bremsst), ob der Annäherungsvorgang durch einen plötzlichen Wechsel des Vorausfahrenden ausgelöst wurde (Vorder-Fz-Wechsel) oder ob es sich um einen echten Annäherungsvorgang an ein mit etwa konstanter Geschwindigkeit fahrendes Vorderfahrzeug handelte (Annäherung).

Die innerhalb von Folgevorgängen ermittelten Aktionspunkte dürfen hier nicht berücksichtigt werden, da diese Verhaltensänderungen durch die Schwellen CLDV und OPDV repräsentiert werden. Auch bei den Annäherungsvorgängen, die der Gruppe mit stark verzögernden Vorderfahrzeugen zugeordnet wurden, handelt es sich eher um Situationen, die für Folgevorgänge typisch sind: kleine Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen Abständen.

Typisch für die bei den Messungen verwendete Methode ist, daß recht viele Annäherungsvorgänge mit einem Wechsel des vorausfahrenden Fahrzeugs beginnen, die eine

unmittelbare Reaktion beim Fahrer des Folgefahrzeugs auslösen. In den Meßprotokollen stellen sich entsprechende Veränderungen im Geschwindigkeitsprofil des Folgefahrzeugs unmittelbar nach Erfassung des vorausfahrenden Fahrzeugs ein. Die zeitliche Verzögerung der Reaktion von etwa einer Sekunde entspricht dabei der menschlichen Reaktionszeit. Der Beginn dieser Annäherungsvorgänge ergab sich bei den ersten beiden Meßserien aus der Fähranweisung an die Testfahrer, auf den rechten Fahrstreifen zu wechseln. Bei der dritten Meßserie resultierte er aus plötzlichen Wechseln des Meßfahrzeugs auf den linken Fahrstreifen. In beiden Fällen konnten die Fahrer erst reagieren, als sich die erzwungene Annäherungssituation eingestellt hatte. Der Beginn des Annäherungsvorgangs wurde dadurch künstlich verspätet. Unter natürlichen Umständen, wenn die Annäherung für den Fahrer schon früher erkennbar gewesen wäre, hätte eine Verhaltensänderung möglicherweise bereits eher eingeleitet werden können. Die Aktionspunkte dieser Gruppe können daher nicht direkt zur Bestimmung der Aktionsschwelle verwendet werden. Es kann nicht entschieden werden, ob sie tatsächlich eine Situation treffen, in der der Fahrer mit der Reaktion beginnt, oder ob der Fahrer unter natürlichen Umständen nicht schon früher reagiert hätte.

In Abbildung 5-3 sind daher nur die Aktionspunkte derjenigen Annäherungsvorgänge berücksichtigt, bei denen das Vorderfahrzeug mit etwa konstanter Geschwindigkeit fährt und die nicht durch die Meßmethode künstlich verkürzt wurden.

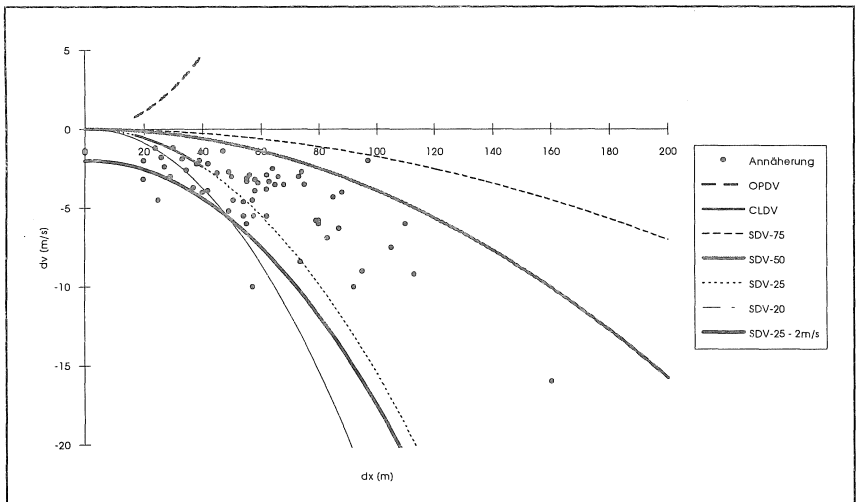


Abb. 5-3: Aktionspunkte im Annäherungsverhalten und Aktionsschwellen

Es wird deutlich, daß die erfaßten Aktionspunkte i.w. einen funktionalen Zusammenhang aufweisen, wie er im Modell durch die Schwelle SDV repräsentiert ist. Der Verlauf

der Schwelle kann aus diesen Meßergebnissen also prinzipiell bestätigt werden. Allerdings liegen die gemessenen Punkte fast ausschließlich im unteren Bereich, also zwischen SDV25 und SDV50. Ähnliches wurde bereits bei HOEFS (1972) festgestellt. Hoefs nahm seinerzeit jedoch an, daß diese Unterschiede zwischen seinen Meßergebnissen und anderen Untersuchungen auf die besondere, von ihm eingesetzte Meßmethodik zurückzuführen seien, die ein aggressiveres Fahrverhalten bei Fahrern nachfolgender Fahrzeuge provoziert haben könnte und daß die Ergebnisse daher nur bedingt mit den Modellvorstellungen vergleichbar wären.

Von den 60 erfaßten Aktionspunkten liegen 60 unterhalb der Kurve SDV75, immerhin noch 59 Punkte liegen unterhalb von SDV50. Damit scheint SDV50 als obere Grenze durchaus geeignet.

Nur 43 der 60 Punkte liegen oberhalb von SDV25. Die meisten der durch diese Schwelle nicht erfaßten Punkte liegen im Bereich niedriger Geschwindigkeitsunterschiede. Oberhalb einer Schwelle SDV20, bei der der Parameter CX auf 20 gesetzt wird, liegen immerhin schon 51 der 60 Punkte. Allerdings wird durch SDV20 eher der Bereich hoher Geschwindigkeitsunterschiede aufgeweitet, in dem nur wenige nicht erfaßte Punkte liegen, der Bereich niedriger Geschwindigkeitsunterschiede wird nur wenig vergrößert. Der tatsächlichen Lage der Meßpunkte würde eher eine Funktion entsprechen, deren Ursprung um -2m/s verschoben wird, bei der CX jedoch nicht unter 25 gesenkt wird: SDV25-2. Dies bewirkt eine Aufweitung des Bereichs niedriger Geschwindigkeitsunterschiede, im Bereich hoher Geschwindigkeitsunterschiede nähert sich die Kurve dem SDV25 wieder stärker an. Oberhalb einer solchen Schwelle lägen 57 der 60 Punkte.

Als Ergebnis der Messungen soll der Bereich von SDV als normalverteilt zwischen SDV50 und SDV25-2 angenommen werden. SDV wird daher wie folgt definiert:

$$SDV = - \left(\frac{\Delta X - AX}{CX} \right)^2 - 2 + CV$$

$$CX = 25 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot CV \right)$$

$$CV = ZF1 + ZF2$$

ZF1 und ZF2 seien zwischen 0 und 1 normalverteilte Zufallsgrößen, mit denen wie schon bei WIEDEMANN (1974) interpersonelle Unterschiede der Fahrer abgebildet werden: ZF1 repräsentiert dabei das Sicherheitsbedürfnis, ZF2 das Schätzvermögen des Fahrers. CV liegt damit normalverteilt zwischen 0 und 2 mit Mittelwert 1. CX ergibt sich als normalverteilt zwischen 25 und 50, SDV liegt wie gewünscht zwischen SDV50 und SDV25-2.

5.2.2. Kalibrierung der Schwellen des Folgeverhaltens

In Abbildung 5-4 sind die ermittelten Aktionspunkte des Folgeverhaltens im Verhältnis zu den Modellschwellen CLDV und OPDV dargestellt. Aktionspunkte sind hier die Umkehrpunkte im Folgeverhalten, bei denen der Fahrer den Betrag der Beschleunigung umdreht. Außerdem sind für die Situationen, in denen ein Umkehrpunkt nicht exakt angegeben werden konnte, die entsprechenden Bereiche dargestellt, in denen die Verhaltensänderung stattfand. OPDV und CLDV sind als dicke graue Linien gezeichnet.

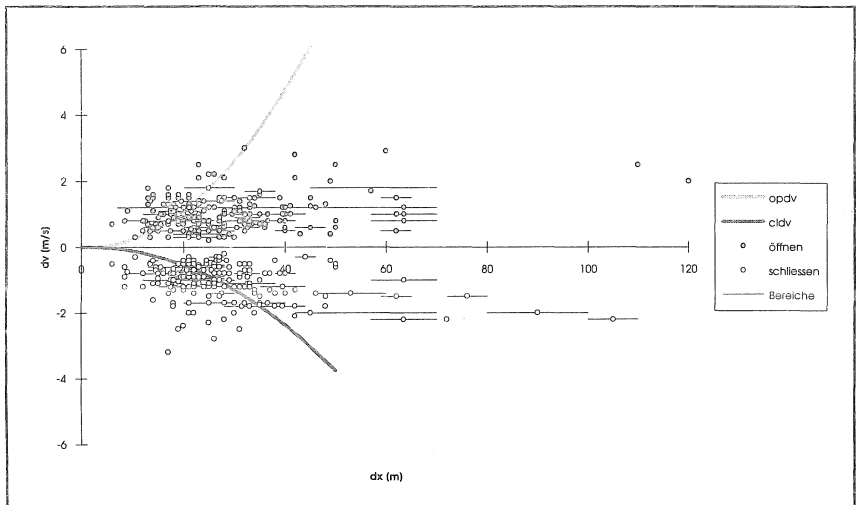


Abb. 5-4: Umkehrpunkte und Bereiche im Folgeverhalten

Es wird deutlich, daß die bisher definierten Schwellen das jetzt gemessene Fahrverhalten nur ungenügend repräsentieren. Es scheint vielmehr, daß die Umkehrpunkte bzw. die Grenzen der Folgebereiche von der Geschwindigkeitsdifferenz weitgehend unabhängig sind. Die bisherige Form der Schwellen CLDV und OPDV kann durch diese Messungen nicht bestätigt werden. Plausibler scheint es, einen linearen Zusammenhang anzunehmen. Es wurde daher für die Umkehrpunkte sowohl im Bereich positiver als auch im Bereich negativer Geschwindigkeitsdifferenz eine lineare Regression gerechnet. Diese beiden Geraden sind in Abbildung 5-5 dargestellt. Gestrichelt sind dort ebenfalls die Geraden eingetragen, die den durch die Standardabweichung definierten Streubereich der Meßpunkte repräsentieren (Regressionsgerade plus Standardabweichung bzw. minus Standardabweichung).

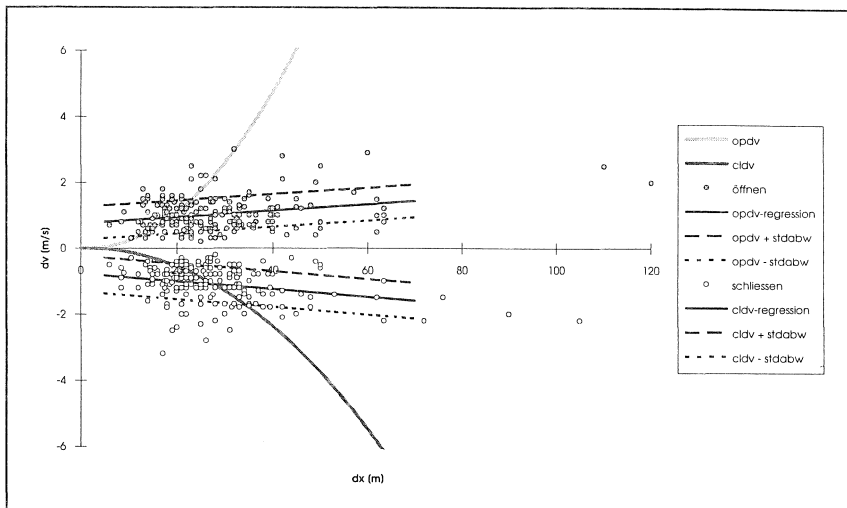


Abb. 5-5: Umkehrpunkte im Folgeverhalten und neue Aktionsschwellen

Diese Geraden werden als neue Reaktionsschwellen CLDV und OPDV im Modell verwendet. Es wird eine normalverteilte Streuung der Fahrerreaktion in den angegebenen Bereichen angenommen. Die Schwellen werden daher wie folgt definiert:

$$\text{CLDV} = -0,01 \cdot \Delta x - 0,25 - \text{NZF}$$

$$\text{OPDV} = 0,01 \cdot \Delta x + 0,25 + \text{NZF}$$

Die Steigung der Geraden ist in beiden Fällen sehr gering. Der Schnittpunkt mit der Y-Achse liegt bei -0,75 bzw. + 0,75. Die Streuung betrug in beiden Fällen ca. 0,5. NZF sei wie schon bei WIEDEMANN (1974) eine zwischen 0 und 1 normalverteilte Zufallsvariable, mit der intrapersonelle Verhaltensunterschiede repräsentiert werden. Somit definieren die Gleichungen jeweils einen normalverteilten Bereich mit Durchgang durch die Y-Achse zwischen -0,25 und -1,25 bzw. 0,25 und 1,25.

5.2.3. Kalibrierung des minimalen Folgeabstands

Die Abstände, die am Ende eines Annäherungsvorgangs angestrebt wurden, sowie die minimalen Abstände von Folgeprozessen sind in Abbildung 4-8 des 4. Kapitels in Abhängigkeit von der absoluten Geschwindigkeit des Vorausfahrenden schon dargestellt. Die Meßergebnisse zeigen, daß das minimale Abstandsverhalten recht gut von dem bisher im Modell realisierten Bereich des Folgeabstands BX repräsentiert wird.

Lediglich eine geringe Zahl Punkte liegt oberhalb der oberen Grenze des normalverteilten Bereichs. Dabei sind alle Punkte der dritten Serie mit niedriger liegenden Punkten verbunden. Bei diesen handelt es sich also nicht um echte Minimalwerte eines Annäherungsvorgangs. Dies könnte auch auf die Punkte der ersten beiden Serien zutreffen, bei denen diese genaue Untersuchung nicht durchgeführt wurde. Es scheint zumindest legitim, den bisher im Modell realisierten Bereich minimalen Abstandes beizubehalten.

5.3 Modellvalidierung

Wie einleitend motiviert, kann die Validierung von Simulationsmodellen nur anhand von Größen vorgenommen werden, die nicht zum Modellkern gehören, die gewissermaßen eine Abstraktion der beschreibenden Modellgrößen darstellen. Trotz dieser Einschränkung verbleiben noch unzählige Möglichkeiten, ein mikroskopisches Verkehrsflußmodell zu validieren. Dies kann sowohl auf mikroskopischer wie auch auf makroskopischer Ebene durch Vergleich von empirischen und simulierten Daten erfolgen.

So wären auf mikroskopischer Ebene z.B. die fahrzeugfeine Untersuchung folgender Größen denkbar:

- die Dauer von Pendelzyklen in Folgevorgängen
- Beschleunigungsprofile oder -verteilungen
- lokale Ausprägungen von Abständen und Geschwindigkeitsdifferenzen

Eine Validierung auf makroskopischer Ebene baut hingegen auf der Untersuchung von aggregierten Verkehrskenngrößen auf. Die fundamentalen makroskopischen Größen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit und die Darstellung der gegenseitigen Abhängigkeiten im Fundamentaldiagramm können zum Vergleich herangezogen werden.

In dieser Arbeit wird ausschließlich eine Modellvalidierung auf Grundlage der makroskopischen Kenngrößen vorgenommen. Dazu werden aggregierte empirische Meßdaten mit Ergebnissen der Verkehrssimulation verglichen. Wichtig ist, daß die Form der Kenngrößenbestimmung in Realität und Simulation übereinstimmen. Dies bezieht sich auf die zeitliche und räumliche Ausdehnung der Meßintervalle ebenso wie auf die konkrete Berechnung der Kenngrößen. Es wird ein zweistreifiger Streckenabschnitt von 3000m simuliert, da genügend empirische Daten von Meßstellen auf zweistreifigen Bundesautobahnen vorliegen. Der simulierte Verkehr wird auf einem 10 Meter langen Abschnitt ausgewertet, der 1500m nach Streckenbeginn liegt. Die räumliche Ausdehnung des Auswertebereichs ist daher mit in der Realität üblichen lokalen Meßverfahren an zwei Querschnitten vergleichbar. Die Auswertung der simulierten Messung erfolgt wie in der Realität: es werden lediglich die Überfahrzeitpunkte an den beiden Querschnitten verwendet um die interessierenden Kenngrößen zu bestimmen. Um eine in allen Verkehrszuständen korrekte Bestimmung der

Kenngrößen sicherzustellen, erfolgt die Berechnung nach der Methode von EDIE (1963) und COERS (1970) mittels der in (4-1) angegebenen Formeln. Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit im betrachteten Weg-Zeit-Ausschnitt werden mit Hilfe der von den erfaßten Fahrzeugen im Ausschnitt zurückgelegten Wege und der dafür benötigten Zeiten errechnet.

In der Simulation wird der Streckenabschnitt mit verschiedenen Zuflußverkehrsstärken zwischen 2000 und 4000 Fahrzeugen pro Stunde belastet. Die Auswertung von insgesamt 16 Simulationsstunden ist im folgenden Fundamentaldiagramm dargestellt (Abbildung 5-6). Die im 10 Meter langen Abschnitt gemessenen Daten wurden hier zu Ein-Minuten-Intervallen aggregiert, jedes Intervall wird durch einen Punkt im Diagramm repräsentiert. Aus der Abbildung geht hervor, daß in den Simulationsläufen alle Verkehrszustände enthalten sind: freier Verkehr, teilgebundener Verkehr und gebundener oder gestauter Verkehr. Situationen gestörten Verkehrs entstehen im Modell ohne Vorgabe eines physikalischen Engpasses durch ungünstige Fahrstreifenwechselmanöver und unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten. Dieses "Aufschaukeln" von kleinen Störungen bis zum Stau könnte im Modell durch eine andere Einstellung der Kalibrierungsgrößen vermieden werden.

Zum Vergleich mit realen Verkehrsabläufen sind in Abbildung 5-6 außerdem die Hüllfunktionen verschiedener zwischen 1978 und 1993 auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen gemessener Fundamentaldiagramme eingetragen. Es zeigt sich, daß das kalibrierte Modell ähnliche Ergebnisse liefert wie Meßauswertungen des realen Verkehrs. Die Form der Fundamentaldiagramme ist vergleichbar, ebenso die maximalen Ausprägungen der Ein-Minuten-Werte: Maximalwerte der Verkehrsstärke zwischen 3500 und 4000 Fahrzeugen/Stunde, maximale Verkehrsdichte bei niedriger Geschwindigkeit zwischen 160 und 200 Fahrzeugen/km. Simulation und Empirie stimmen gut überein.

Diese Gegenüberstellung genüge als Nachweis, daß empirische und simulierte Daten aus denselben Grundgesamtheiten stammen. Damit ist das Modell auf dieser makroskopischen Ebene validiert. Detailliertere Formen der Validierung aufgrund von mikroskopischen Daten sind wie eingangs diskutiert ebenfalls möglich, sollen aber an dieser Stelle nicht durchgeführt werden.

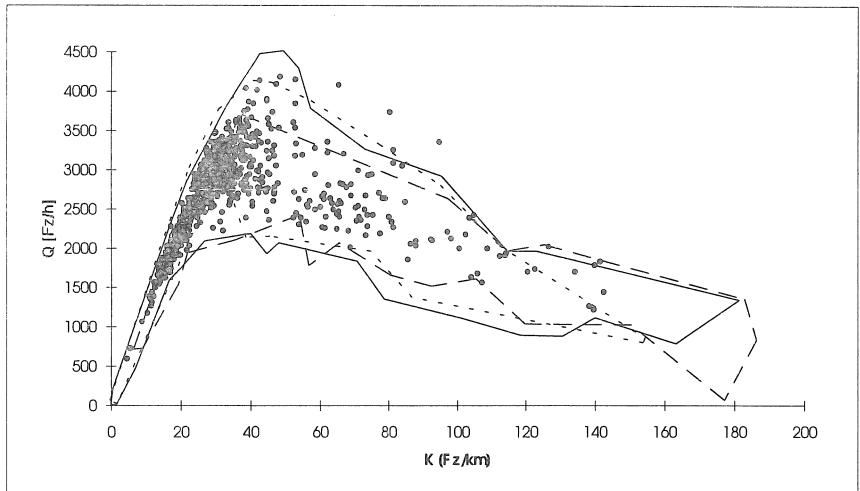


Abb. 5-6: Fundamentaldiagramme: Simulation und Empirie

6. Modellierung des Einflusses individueller Fahrbeeinflussungssysteme

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert wurde, welches Simulationsmodell zur Untersuchung der Fahrbeeinflussungssysteme verwendet werden soll, und vorgestellt wurde, welche aktuellen empirischen Daten die Grundlage dieses Modells bilden, kann nun in diesem Kapitel beschrieben werden, in welcher Form der Einfluß der angesprochenen Systeme auf das Fahrverhalten innerhalb des ausgewählten Modells nachgebildet wird.

Einleitend wird zunächst auf bisherige Arbeiten eingegangen. Felderproben von Fahrbeeinflussungssystemen wurden in der Vergangenheit durchgeführt. Über diejenigen, die veröffentlicht wurden, kann hier berichtet werden. Die dabei gemachten Erfahrungen mit dem Adaptationsverhalten der Fahrer an fahrzeugseitige Systeme werden beschrieben und durch theoretische Untersuchungen ergänzt. Anschließend wird kurz vorgestellt, welche Ansätze zur Modellierung von anderen Forschergruppen verfolgt wurden. Schließlich wird darauf aufbauend die eigene Modellentwicklung beschrieben, zunächst allgemein und anschließend speziell für die drei zu untersuchenden Systeme: Abstandswarnung, Geschwindigkeitskontrolle und Fahrstreifenwechselhilfe.

6.1 Bisherige Arbeiten

6.1.1 Felderproben von Fahrbeeinflussungssystemen

LEUTZBACH, STEIERWALD, ZACKOR und JAHNKE (1981) führten Versuchsfahrten mit autarken Abstandswarnsystemen durch. Ziele der Erprobung waren Akzeptanzuntersuchungen beim Fahrer, die Ermittlung der Umfeldeinflüsse auf die Warnungen sowie die Einschätzung des Einflusses der Warnsysteme auf den Verkehrsfluß. Die folgenden Erhebungen wurden dabei durchgeführt: Befragungen über Einstellungen zum System vor der Fahrt und Beurteilung des Systems nach der Fahrt, Messungen von Verkehrsstärke, Geschwindigkeiten und Zeitlücken auf bestimmten Versuchsstrecken, manuelle Aufzeichnung der Warnursachen bei den beaufsichtigten Fahrten und die Aufzeichnung von Istabstand, Mindestabstand, Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsdifferenz, Alarmgebung, Betätigung der Bremse u.a. während aller Fahrten.

Ergebnisse der Befragung waren zwar eine prinzipiell eher positive Einstellung zum System (57% der Befragten) und ein überwiegend als richtig empfundener angezeigter Sicherheitsabstand, aber dennoch beurteilte die Mehrheit die Abstandswarnung als nicht nützlich.

Die Untersuchung der Fahrerreaktion auf die Warnungen ergab, daß mit strategiebedingt zunehmendem Sicherheitsabstand die angezeigte Gefahr vom Fahrer geringer eingeschätzt wird und die Reaktion auf die Warnung entsprechend schwächer

ausfällt. Dagegen scheint die Dauer der Warnung Einfluß darauf zu haben, ob die Fahrer auf die angezeigte Gefahr reagieren.

LEUTZBACH und JAHNKE (1981) unternahmen Kolonnenfahrversuche mit Fahrzeugen, die alle mit autarken Abstandswarngeräten ausgestattet waren. Neben der Untersuchung sinnvoller Abstandswarnstrategien sollte die Akzeptanz beim Fahrer beobachtet werden. Während der Versuchsfahrten wurden die Eigengeschwindigkeit, die Geschwindigkeitsdifferenz, der Ist- und der Sollabstand, die Zeit und ggf. die Brems- und Alarmzeit mit einem Takt von 100 ms aufgezeichnet.

Auch sie stellten dabei fest, daß die Einhaltung des Sollabstands abhängig von der Strategie war: je höher der angezeigte Sollabstand, desto geringer die Befolungsrate (13% bis 49% Unterschreitung des Sollabstands). Unterschritten wurde der Abstand im wesentlichen nur bei Schließvorgängen, bedingt durch die Reaktionszeiten der Fahrer bei Verzögerungen des Führungsfahrzeugs. Untersuchungen der Geschwindigkeitsänderung in der Kolonne und des Beschleunigungsrauschens ergaben, daß bei konstanten Profilen der Führungsfahrzeuge ein Anwachsen der Geschwindigkeitsamplituden in der Kolonne zu verzeichnen war, bei nicht konstanten Profilen stabilisierte sich die Zunahme der Geschwindigkeitsvariation, wobei Störungen des Führungsfahrzeugs bei höheren Sollabständen am stärksten gedämpft wurden. Auch das Beschleunigungsrauschen nahm mit steigender Kolonnenposition zu.

6.1.2 Adaptationsverhalten der Fahrer an diese Systeme

Aus den oben vorgestellten Feldversuchen mit Fahrbeeinflussungssystemen können nur wenig konkrete Aussagen über das Fahreradaptationsverhalten gewonnen werden. Die Erfahrungen mit dem System Abstandswarnung zeigen, daß eine Einschätzung der Unterschiede im Fahrverhalten mit und ohne Unterstützung dieser Systeme schwer ist, da nicht entscheidbar ist, ob eine beobachtete Verhaltensänderung eines Fahrers unter sonst gleichen Umständen aber ohne die Warnung des Beeinflussungssystems nicht auch stattgefunden hätte. Eine Untersuchung der Unterschiede im Fahrverhalten mit und ohne Beeinflussungssysteme unter *ceteris-paribus*-Bedingungen ist nur im Fahrsimulator möglich. Entsprechende Versuche sind bisher nicht veröffentlicht und die Ergebnisse daher nicht zugänglich.

Bei den Feldversuchen konnte gemessen werden, ob die Fahrer während oder nach einem Alarm ihre Geschwindigkeit reduzierten. Diese Reaktion wurde von LEUTZBACH, STEIERWALD, ZACKOR und JAHNKE (1981) genutzt, um die Alarme in für den Fahrer relevante und nicht relevante Alarme einzuteilen. Der Anteil relevanter Alarme konnte dann quantifiziert werden. Je nachdem, wie die Relevanz eines Alarms definiert wurde und je nach Straßentyp¹ lag der Anteil relevanter Alarme zwischen 8% und 56%, für die strengeren Ansätze durchweg in der

¹ Die Versuche fanden auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen mit unterschiedlicher Trassierung statt

Größenordnung von 20%. Diese Werte können allerdings nicht dazu verwendet werden, den Anteil Fahrer zu bestimmen, die ihr Fahrverhalten an die Empfehlungen des Abstandswarngeräts anpassen, da es sich um Fehlalarme handeln kann oder, wie oben angesprochen, um Situationen, in denen der Fahrer auch ohne Warnung seine Geschwindigkeit reduziert hätte.

Allgemein wurde von LEUTZBACH und JAHNKE (1981) festgestellt, daß das Folgeverhalten mit Abstandswarngeräten zwar immer noch instabil ist, daß aber eine deutliche Verbesserung gegenüber dem nicht beeinflussten Fahren beobachtet werden kann, z.B. geringeres Beschleunigungsrauschen und kleinere Amplituden der Geschwindigkeitsänderung.

In OECD (1990) wurden verschiedene theoretische Überlegungen und Modelle der Verhaltensadaptation vorgestellt. Unterschieden wurde hier nach objektiver und subjektiver Sicherheit. Erstere läßt sich in der Regel physikalisch beschreiben, letztere ist das Sicherheitsempfinden des Fahrers, das ausschließlich auf dessen subjektiven Erfahrungen beruht. Es kann verschiedene Gründe geben, warum ein Fahrer ein objektives Risiko eingeht:

1. Bewußte Entscheidung, ein objektives Risiko einzugehen
2. Überschätzung der eigenen Fähigkeiten, Situationen mit objektivem Risiko zu meistern
3. Mangelhafte Wahrnehmung objektiver Risiken

Wird nun die objektive Sicherheit durch straßen- oder fahrzeugseitige Maßnahmen erhöht (z.B. Beleuchtung der Autobahnen bei Nacht, ABS im Fahrzeug) oder gelingt es, die Wahrnehmung des Fahrers oder seine Einstellung gegenüber objektiven Risiken zu verändern, hat dies damit Auswirkungen auch auf die subjektive Sicherheit des Fahrers. Dies führt nach einer Eingewöhnungsphase zu Verhaltensänderungen, die u.U. den Gewinn objektiver Sicherheit wieder zunichte machen.

Fahrbeeinflussungssysteme können die Gründe (2.) und (3.), objektive Risiken einzugehen, beeinflussen. Sie helfen dem Fahrer, objektive Risiken zu erkennen, und sie objektivieren die Einschätzung der eigenen Fähigkeiten, indem sie objektive Sicherheitsmaßstäbe verwenden, z.B. den benötigten Bremsweg zur Kollisionsvermeidung. Die Systeme können jedoch gemäß Grund (1.) kontraproduktiv wirken, da sie die Grenzen objektiver Sicherheit explizit anzeigen, und so dem Fahrer erlauben, das Risiko, das er einzugehen bereit ist, objektiv zu beurteilen.

Auch diese theoretischen Überlegungen führen nicht zu quantifizierbaren Aussagen über das potentielle Adaptationsverhalten der Fahrer.

6.1.3 Bisherige Modellentwicklungen

Ähnlich wie Feldversuche und die Untersuchungen des Adaptationsverhaltens befassen sich die bisher entwickelten Modelle ausschließlich mit dem System Abstandswarnung.

COSGRIFF, ENGLISH und ROECA (1966) betrachteten die Bewegung eines Fahrzeugs relativ zum vorausfahrenden Fahrzeug als Trajektorie in einem $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm. Sie teilten diese $\Delta x/\Delta v$ -Ebene mit verschiedenen Schwellen in 12 Bereiche ein (siehe Abb. 6-1). Sie stellten ein Modell für das automatische oder kontrollierte Fahren auf, indem den Bereichen jeweils eine generelle Form des Fahrverhaltens zugeordnet wurde. Die meisten dieser Bereiche wurden mit einem festen Wert der Beschleunigung versehen, mit dem das Fahrzeug in diesem Bereich seine Geschwindigkeit änderte, und zwar als Vielfaches von g (Werte zwischen $-0.5 \cdot g$ und $+0.1 \cdot g$). Für den Folgebereich nahe des gewünschten Abstands und bei geringer Geschwindigkeitsdifferenz definierten sie eine lineare Kontrollfunktion, um die asymptotische Stabilität² zu erhöhen und um die Fahrt durch geringere positive und negative Beschleunigungen komfortabler zu gestalten. In diesem Bereich wurde die Beschleunigung als proportional zur Relativgeschwindigkeit beschrieben:

$$b_i = k_i \cdot (v_{i-1} - v_i)$$

Damit wurde erreicht, daß sich das kontrollierte Fahrzeug mit kleiner werdender Beschleunigung der Relativgeschwindigkeit null annähert und ohne die sonst üblichen Pendelbewegungen dort verharret. In der Abbildung wird die Beschleunigung mit a statt wie sonst in dieser Arbeit mit b bezeichnet.

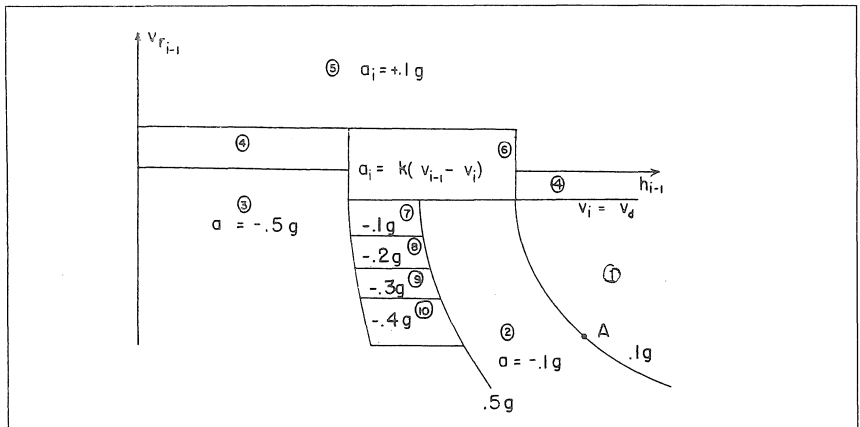


Abb. 6-1: Modell von COSGRIFF et al. (1966) für automatische Längsregelung

² Unter asymptotischer Stabilität wird die Stabilität von Fahrzeugkolonnen verstanden. Sie ist dann gegeben, wenn sich eine Störung in einer Kolonne zwar fortpflanzt, die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge jedoch nicht größer werden als die des Führungsfahrzeugs.

KÖHLER (1974) untersuchte die Stabilität von Fahrzeugkolonnen mit Hilfe der deterministischen Fahrzeugfolgegleichungen nach HERMAN et al. und entwickelte daraus Kriterien für die Konzeption von Abstandswarngeräten. Er simulierte daraufhin Verkehr mit und ohne Warngeräte, wobei er zwei Formen der Verhaltensveränderung aufgrund einer Warnung des Abstandswarngeräts annahm und diese modellierte, indem er damit die deterministischen Fahrzeugfolgegleichungen überlagerte:

1. Nach erfolgter Warnung wird der Aufmerksamkeitsgrad des Fahrers erhöht. Dies hat eine Reduktion der Reaktionszeit zur Folge, die je nach Verkehrssituation 0%, 10%, 20% oder 30% beträgt.
2. Außerdem wird der Fahrer versuchen, wieder in einen sicheren Abstandsbereich zu kommen, und dementsprechend seine Beschleunigung verändern. Modelliert wird dies durch additive Vergrößerung der negativen Beschleunigung oder durch eine prozentuale Abnahme der positiven Beschleunigung, die zuvor mit dem unveränderten Modell errechnet wurde.

LEUTZBACH, STEIERWALD, KÖHLER und ZACKOR (1975) erweiterten das wahrnehmungsbasierte Modell für einstreifigen Verkehr nach WIEDEMANN (1974), indem sie nach erfolgter Warnung ein anderes Fahrverhalten definierten:

- ist der errechnete Sicherheitsabstand um weniger als 20% unterschritten - dies entspricht einer ersten Warnstufe - wird die Beschleunigung auf einen zufälligen Wert zwischen $-0,5$ und $-1,5 \text{ m/s}^2$ gesetzt,
- ist der Abstand um mehr als 70 % unterschritten - hier setzt eine zweite Warnung ein - wird mit der maximalen möglichen Verzögerung gebremst,
- im Bereich dazwischen ist die Verzögerung desto größer, je weiter der Grenzabstand unterschritten ist.

LEUTZBACH und JAHNKE (1981) modellierten das Fahren mit autarken Abstandswarnsystemen wiederum mit den deterministischen Fahrzeugfolgegleichungen. Dabei wurden die mit ausgetesteten Fahrzeugen durchgeführten Fahrten dazu genutzt, die Fahrzeugfolgegleichung für das beeinflusste Fahren zu bestimmen. Die Parameter l , m , τ und λ wurden so lange variiert, bis die errechneten Beschleunigungswerte die geringste Abweichung von den tatsächlich gemessenen Werten auswiesen.

6.2 Eigene Vorgehensweise

Fahrbeeinflussungssysteme sind zur Zeit noch nicht im Einsatz. Es gibt daher noch keine endgültige Beschreibung ihrer Funktion oder der Form des Einflusses auf das Fahrverhalten. Auch über die Form der Verhaltensadaptation der Fahrer an Beeinflussungssysteme kann, wie oben dargestellt, noch keine endgültige Aussage getroffen werden. Menschliches Verhalten ist durch Lernprozesse geprägt, die kurz-, mittel- und langfristiger Natur sein können. Selbst Felderprobungen und Simulatorversuche können daher nur ansatzweise Aufschluß darüber geben, was sich schließlich für ein von Fahrbeeinflussungssystemen unterstütztes Fahrverhalten einstellen wird.

Es wurde daher zunächst ein generelles Modell entworfen, das geeignet ist, den Einfluß der Systeme auf das Fahrverhalten zu beschreiben. Dieses generelle Modell wird dann für die drei zu modellierenden Beeinflussungssysteme konkretisiert. Um das Modell flexibel zu halten und eine leichte Veränder- bzw. Erweiterbarkeit zu erreichen, wurde die Beeinflussung des Fahrverhaltens zerlegt in eine Hierarchie aufeinander aufbauender Teilschritte. Jeder einzelne Schritt kann separat modelliert werden. Dabei werden bei der Modellierung als Funktion der Systeme die im 2. Kapitel diskutierten Anforderungen eingesetzt. Es werden die dort vorgestellten Grundformen der Beeinflussung berücksichtigt. Da das menschliche Adaptationsverhalten noch nicht quantifizierbar ist, werden die Verhaltensänderungen nicht fest modelliert, wie dies z.T. bei bisherigen Modellentwicklungen anderer Forschergruppen der Fall war. Vielmehr wird ein Mechanismus entworfen, der es erlaubt, das ganze Spektrum der Fahrverhaltensadaptation zu repräsentieren.

Die Hauptaufgabe von Fahrbeeinflussungssystemen besteht darin, den Fahrer mit Informationen über sein Fahrumfeld zu versorgen. Zu unterscheiden sind dabei allerdings die beiden Grundformen der Beeinflussung: beim unterstützten Fahren ist der vom System informierte Fahrer der Mensch, beim kontrollierten oder automatischen Fahren ist es der automatische Regler. Der menschliche Fahrer wird die ihm zusätzlich angebotenen Informationen nutzen, um ggf. sein Fahrverhalten zu verändern und es den Empfehlungen und Warnungen anzupassen, der automatische Regler nutzt die Daten direkt und ausschließlich als Eingangsgrößen für die Regelprozeduren. Die Beeinflussung des Fahrverhaltens kann also dargestellt werden als Übermittlung von Umweltinformationen durch das Fahrbeeinflussungssystem an den Fahrer. Diese Informationsübermittlung wird im Modell in Teilschritte zerlegt, die jeweils aus einer Weiterverarbeitung der aus vorherigen Schritten bereits bekannten Informationen bestehen. Diese schrittweise Modellierung erlaubt eine saubere Trennung der verschiedenen Teilfunktionen der Beeinflussungssysteme und damit eine leichte Veränderbarkeit jeder dieser Teilfunktionen, z.B. wenn ein ganz konkretes System getestet werden soll.

Das Modell der Informationsübermittlung und -verarbeitung ist demnach eine Hierarchie, die in Abb. 6-2 dargestellt ist.

Die oberste Ebene dieser Hierarchie bildet die Umwelt. Der hier interessierende Umweltausschnitt umfaßt die Straßen und die sich darauf befindenden beweglichen und unbeweglichen Objekte. Dieser Umweltausschnitt besteht aus der Menge aller physikalisch meßbaren Größen, und wird daher als **physikalisch wahrnehmbare Welt** bezeichnet. Die Anzahl meßbarer Umweltgrößen ist unendlich, die natürlichen Wertebereiche dieser Größen sind kontinuierlich, die zeitliche Veränderung der einzelnen Größen ist ebenfalls kontinuierlich. Die Anzahl der meßbaren Größen ist im Modell nicht mehr unendlich, sondern ist vielmehr davon abhängig, wie genau die Umwelt abgebildet wurde. Die Wertebereiche sind ebenfalls nicht mehr kontinuierlich, sondern von der Genauigkeit der Maschine abhängig, auf der das Modell implementiert ist.

Der erste Schritt der Informationsverarbeitung besteht in der **Messung** inter-

essierender Größen durch das Fahrbeeinflussungssystem. Die Messung führt Elemente der physikalisch wahrnehmbaren Welt über in den **Muster-Raum** oder **Meß-Raum**. Dieser besteht aus der Menge aller in der Umwelt gemessenen Werte und beschreibt damit den Umweltausschnitt, der durch das Beeinflussungssystem wahrnehmbar ist. Die Wertebereiche der einzelnen Meßgrößen sind diskret, sie hängen ab von der Meßgenauigkeit der verwendeten Sensoren. Die zeitliche Veränderung der gemessenen Größen hängt vom Takt der Messungen ab, z.B. 100ms. Bei der Modellierung dieses Verarbeitungsschritts ist folgendes zu beachten:

- Meßfehler bei realen Messungen
Im Modell können Messungen mit beliebiger Genauigkeit durchgeführt werden, d.h. die Meßgrößen können so genau sein, wie die Repräsentation der Umweltgrößen im Modell. Reale Messungen werden aber in jedem Fall fehlerbehaftet sein. Diese Meßfehler müssen explizit modelliert werden. Form und Größe der Meßfehler sind abhängig von der eingesetzten Sensorik und

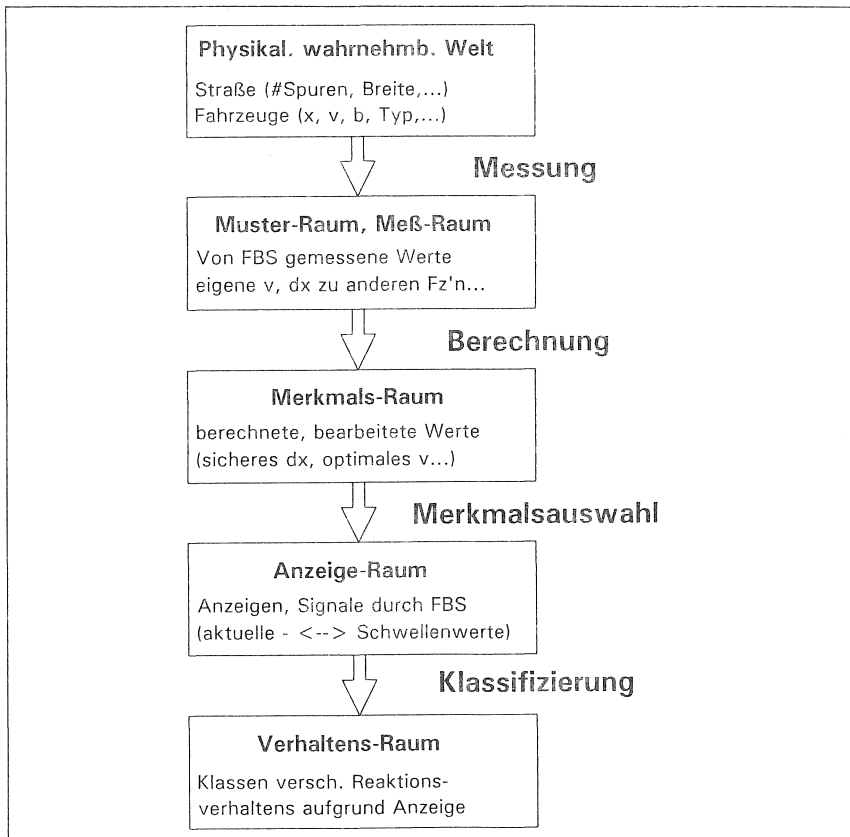


Abb. 6-2: Hierarchie der Übermittlung und Verarbeitung von Umweltinformationen an den Fahrer mittels Fahrbeeinflussungssysteme

von äußeren Einflüssen, wie z.B. Kurvigkeit der Straße oder Wetterbedingungen.

- Zeitliche Verzögerung der Messung
Die Meßdaten werden in der Realität nur zu diskreten Zeitpunkten erfaßt, liegen also erst nach einer zeitlichen Verzögerung zur weiteren Verarbeitung vor.
- Quantisierung der kontinuierlichen Meßgrößen
Die Quantisierung wird hervorgerufen durch die begrenzte Meßgenauigkeit der eingesetzten Sensoren und durch Begrenzungen bei der Übertragung und Speicherung der Meßdaten.

Zu messende Größen sind typischerweise Parameter, die die eigene Bewegung beschreiben, wie z.B. der zurückgelegte Weg und die Geschwindigkeit, außerdem Parameter, die die Bewegung relativ zu anderen Fahrzeugen insbesondere zum Vorfahrenden beschreiben, wie z.B. der Abstand, sowie Parameter, die die Beschaffenheit der Straßenoberfläche beschreiben.

Der nächste Schritt der Datenverarbeitung besteht in der **Berechnung** von Größen, die zwar für die Fahrerbeeinflussung von Bedeutung sind, die aber nicht direkt gemessen werden können, sondern die aus den gemessenen Größen berechnet werden müssen. Durch diese Vorverarbeitung werden die Elemente des Meß-Raums auf Elemente des **Merkmals-Raums** abgebildet. Dieser besteht dann aus allen gemessenen und berechneten Größen. In diesem Verarbeitungsschritt werden damit wesentliche Teile der Funktionsbeschreibung der Beeinflussungssysteme festgelegt. Zu berechnende Größen sind auf der einen Seite komplexere Größen der Bewegung und Relativbewegung, z.B. die eigene Beschleunigung, die Geschwindigkeitsdifferenz³ zu umgebenden Fahrzeugen und die Beschleunigungsdifferenz, auf der anderen Seite aber gerade auch solche Größen, die die Funktion des Systems beschreiben, z.B. der sichere Abstand, die benötigte Verzögerung, die optimale Geschwindigkeit. An dieser Stelle muß daher im Modell wie in der Realität definiert werden, wie die genannten Größen zu berechnen sind.

Der Merkmals-Raum besteht noch aus einer großen Anzahl unterschiedlicher Größen. Der nächste Schritt der Datenverarbeitung besteht darin, die Anzahl der Größen, die dem Fahrer angezeigt werden sollen, auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Dieser Schritt wird als **Merkmalsauswahl** bezeichnet. Um den Fahrer so wenig wie möglich von seiner sonstigen Wahrnehmung des Fahrumfelds abzulenken und um dem automatischen Regler eindeutige Signale zu geben, dürfen nur wenige Größen dargestellt werden. Die angebotenen Größen sollen das Fahrverhalten in der aktuellen Verkehrssituation aber hinreichend unterstützen. Die Merkmalsauswahl führt die

³ Wird z.B. mit Radarsensoren gearbeitet, kann die Relativgeschwindigkeit direkt gemessen werden und muß nicht erst aus zwei Abstandswerten errechnet werden. Dann gehört diese Größe schon in den Meß-Raum.

Elemente des Merkmals-Raums über in den **Anzeigen-Raum**. Dieser besteht aus der Menge aller Signale, Anzeigen und Warnungen. In der Realität wie dann auch im Modell ist zu entscheiden, welche der gemessenen und berechneten Größen zur Beeinflussung des Fahrverhaltens genutzt werden sollen und wie diese dem Fahrer in geeigneter Form dargestellt werden.

Für das unterstützte Fahrverhalten sollte die Informationsdarstellung für den Fahrer aussagekräftig, übersichtlich und schnell begreifbar gestaltet sein. Verschiedene Formen der Anzeige sind denkbar. In HEINTZ (1987) werden verschiedene Techniken optischer und akustischer Anzeigen vorgestellt: passive optoelektronische Anzeigen wie z.B. Flüssigkristallanzeigen (LCD), aktive optische Anzeigen wie z.B. Leuchtdioden (LED) oder Kathodenstrahlröhren, und akustische Darbietungstechniken, wobei sich dann für komplexere Informationen nur die synthetische Sprache eignet. Einfache akustische Signale können als Warnsignale eingesetzt werden. Die meist numerischen Größen des Merkmalsraums können absolut dargestellt werden, z.B. durch Anzeige des Zahlenwerts oder durch eine geeignete graphische Repräsentation. Sie können aber auch in Relation zu anderen Merkmalen oder vordefinierten Schwellenwerten gesetzt und dargestellt werden. Dies kann ebenfalls durch eine permanente graphische Anzeige geschehen oder durch die Ausgabe optischer und/oder akustischer Warnsignale bei Überschreiten eines Schwellenwertes. Für den Fall der Abstandswarnung wird es beispielsweise nur wenig Sinn haben, den Fahrer mit dem absoluten Zahlenwert des aktuellen Abstands zu konfrontieren. Das ändert sich auch nicht, wenn der Zahlenwert graphisch repräsentiert wird. Ebenso wird die ausschließliche Anzeige des absoluten Zahlenwertes eines errechneten sicheren Abstands dem Fahrer noch nicht viel nützen. Den größten Nutzen kann der Fahrer hier aus einer übersichtlichen Darstellung der Relation zwischen aktuellem gemessenen Abstand und errechneten sicheren Abstand ziehen, die es ihm erlaubt mit einem Blick festzustellen, ob der aktuelle Abstand ausreichend, kritisch oder zu kurz ist. Zusätzliche Warnsignale können die Wirkung noch erhöhen.

Beim automatischen Fahren werden die Signale natürlich nicht optisch oder akustisch angezeigt, sondern sie werden dem Regler direkt als elektronische Signale übergeben, die dort als Eingangsparameter für Entscheidungs- und Steuerprozeduren verwendet werden.

Im Modell muß wie in der Realität entschieden werden, welche Größen dargestellt werden, welche Größen zueinander in Relation gesetzt werden und ggf. müssen Schwellenwerte definiert werden, die eine Veränderung der Anzeige und Warnungen auslösen sollen.

Der letzte Schritt der Informationsverarbeitung wird vom Fahrer durchgeführt. Hier ist nun zu unterscheiden, ob der Mensch oder der automatische Regler die Fahrzeugbewegungen kontrolliert und demzufolge die angebotene Information verarbeitet. In beiden Fällen wird dieser letzte Schritt die **Klassifizierung** genannt und führt über in den **Verhaltens-Raum**.

Beim unterstützten Fahren besteht der Verhaltens-Raum aus verschiedenen Formen

der Reaktion des Fahrers auf ihm angebotene Signale des Beeinflussungssystems. Diese unterschiedlichen Verhaltensformen werden Klassen des Reaktionsverhaltens genannt. Die menschliche Klassifizierung beschreibt, wie die Informationen des Anzeige-Raum vom Fahrer genutzt wird. Es wird damit modelliert, wie der Fahrer sein Verhalten ändert und den zusätzlich angebotenen Informationen anpaßt. Der Fahrer verarbeitet die Information, in dem er diese mit seiner bisherigen Erfahrung über den Zusammenhang zwischen angebotener Information, verkehrlicher Situation und Auswirkungen bisherigen Reaktionsverhaltens in Beziehung setzt. Er klassifiziert die Anzeige aufgrund dieser Erfahrungen und entscheidet sich damit für eine Klasse der Reaktion. Zu beachten ist, daß verschiedene Fahrer dieselbe Information bei gleicher Verkehrssituation unterschiedlich bewerten werden. Sogar derselbe Fahrer wird nicht immer in gleicher Weise auf die gleiche Anzeige reagieren. Kurz-, mittel- und langfristige Lernprozesse im Umgang mit dem System kommen hier ins Spiel. Außerdem beeinflussen noch andere Faktoren das Entscheidungsverhalten: Stimmung, Laune, Zweck der Fahrt, Zeitbudget etc.

Im Modell wird der menschliche Verhaltens-Raum durch eine Menge vorgegebener Reaktionsklassen repräsentiert. Die einzelnen Klassen beschreiben die prinzipielle Form, mit der das Fahrverhalten an die Anzeige adaptiert wird. Innerhalb der Klassen kann das Reaktionsverhalten durch Zufallsgrößen noch weiter differenziert werden. Die Klassifizierung ordnet jedem Element des Anzeige-Raums eine Verteilung zu, mit der definiert wird, welcher Anteil Fahrer sich bei gegebener Anzeigesituation für welche Form der Reaktion entscheidet. Damit wird jedem Fahrer zu jedem Zeitpunkt und bei jeder Anzeige- und Verkehrssituation genau eine Reaktionsklasse zugeordnet. Interpersonelle Unterschiede der Reaktion, also Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrern, können direkt abgebildet werden, indem jedem Fahrer eine typische Reaktionsform zugeordnet wird. Intrapersonelle Reaktionsunterschiede, also Veränderungen des Reaktionsverhaltens einer Person, können durch dynamische Zuordnung der Fahrer zu Reaktionsklassen oder durch zusätzliche Zufallsgrößen modelliert werden, mit denen das Reaktionsverhalten weiter differenziert wird.

Beim automatischen Fahren besteht der Verhaltensraum aus verschiedenen Formen des Fahrverhaltens. Die Klassifizierung besteht hier aus einer eindeutigen Zuordnung genau einer Form der Fahrverhaltens zu einer jeden Signalsituation. Es werden hier nicht verschiedene Reaktionen zugelassen.

Im Modell werden nun der Mensch und das Fahrbeeinflussungssystem als parallele Prozesse dargestellt, die zunächst unabhängig voneinander arbeiten, die aber an verschiedenen Punkten miteinander verknüpft sind und die je nach definierter Form der Beeinflussung in eine der drei Formen beeinflussten Fahrens resultieren: das nicht unterstützte Fahren, bei dem keine Beeinflussung stattfindet, das unterstützte Fahren, bei dem der Fahrer vom Fahrbeeinflussungssystem Informationen erhält, an die er sein Fahrverhalten adaptiert, und das automatische Fahren, bei dem die Kontrolle über die Fahrzeugbewegung vom Fahrbeeinflussungssystem übernommen wird.

Dies veranschaulicht Abbildung 6-3. Der Mensch wird repräsentiert durch die

psycho-physischen Modelle, die in Kapitel 3 beschrieben wurden, und die sich aufteilen lassen in menschliche Wahrnehmung und menschliche Einschätzung (repräsentiert durch die beschriebenen Schwellen), in menschliche Entscheidung, die zur Auswahl eines Fahrverhaltens und schließlich zur Aktion führt. Analog dazu stellen sich die Stufen des Beeinflussungssystems dar: die Wahrnehmung wird hier als Messung bezeichnet, statt der Schätzung folgt hier die Berechnung von Schwellenwerten und anderen Größen, hinzu kommt die Signal- bzw. Parameterauswahl, die beim automatischen Fahren direkt zur Klassifizierung und daraus folgender Aktion führt, beim unterstützten Fahren jedoch werden zur Klassifizierung sowohl die Signale des Beeinflussungssystems, als auch die vom Fahrer direkt wahrgenommenen und geschätzten Größen berücksichtigt. Auch hier führt die Klassifizierung zur Entscheidung über eine Verhaltensform.

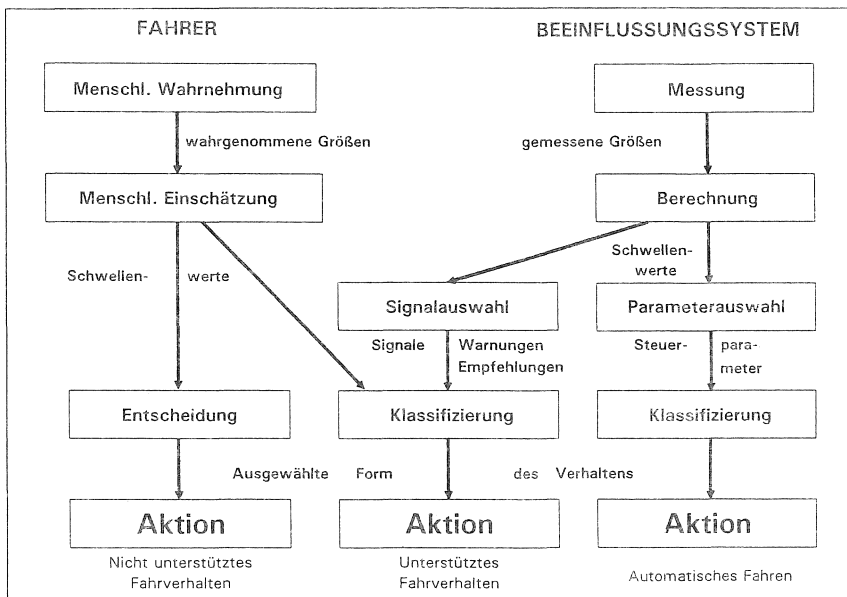


Abb. 6-3: Parallele Prozesse: Fahrer und Fahrbeeinflussungssysteme

In den folgenden Abschnitten wird nun dieses generelle Modell der Fahrbeeinflussung für die drei ausgewählten Systeme konkretisiert. Zur Modellierung werden dabei die in Kapitel 2 diskutierten Anforderungen an Funktion und Form des Einflusses berücksichtigt. Es wird also ganz bewußt von Systemen abstrahiert, die zur Zeit bei Herstellern der Elektronik- oder Automobilindustrie in Entwicklung oder Erprobung sind. Damit bleibt diese Untersuchung unabhängig von einer konkreten Realisierung, die Modellierung orientiert sich an möglichst objektiven und allgemeinen Anforderungen, wie z.B. Sicherheitsmaßstäbe, und erlaubt so eine Einschätzung der Auswirkungen auf den Verkehrsfluß, die durch die Einführung von

Beeinflussungssystemen der jeweils allgemeinen Art entstehen können. Die spätere Repräsentation zum Beispiel eines konkreten Abstandswarnsystems im Modell ist ohne großen Aufwand möglich.

6.2.1 Modell des Einflusses der Abstandswarnung

Im Folgenden werden die vier Stufen der Modellierung des beschriebenen generellen Modells umgesetzt.

Messung

Nur wenige Größen müssen gemessen werden, um die Funktion der Abstandswarnung zu realisieren. Dies sind Größen, die die eigene Bewegung beschreiben, Größen, die die Relativbewegung bezüglich des unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs beschreiben und ggf. Größen, die eine Einschätzung der Griffigkeit der Straßenoberfläche erlauben. Zur ersten Gruppe zählen die zeitabhängigen Bewegungsgrößen, der zurückgelegte Weg, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung. Interessierende Größen der Relativbewegung sind analog dazu der Abstand, die Geschwindigkeitsdifferenz und die Beschleunigungsdifferenz. Informationen über die Straßenoberfläche, die eine Einschätzung der maximal möglichen positiven und negativen Beschleunigungen erlaubt, werden zunächst nicht berücksichtigt.

Welche dieser Größen in der Realität direkt gemessen werden und welche aus gemessenen errechnet werden müssen, hängt von der eingesetzten Sensorik ab. So erlauben z.B. Radarsensoren eine direkte Erfassung der Geschwindigkeit von Objekten, die sich im Strahl bewegen, in diesem Fall die Bestimmung der Geschwindigkeitsdifferenz. Im Modell werden alle Größen der eigenen Bewegung als direkt meßbar behandelt, ebenso der Abstand und die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorausfahrenden.

Alle Größen liegen im Modell exakt vor. Um die in der Realität gemessenen Größen nachzubilden, müssen Einschränkungen der Meßgenauigkeit explizit modelliert werden. Dies geschieht zum einen durch Nachbildung der begrenzten Reichweite der Abstandssensoren, zum anderen mit Hilfe additiver und multiplikativer Fehlerwerte, die zu den exakten Meßwerten hinzugefügt werden. Um Variationen der Meßfehler repräsentieren zu können, werden diese durch normalverteilte Zufallsgrößen dargestellt.

Berechnung

Errechnet werden müssen die nicht direkt messbaren Größen der Bewegung. Außerdem werden die in Kapitel 2 beschriebenen Parameter berechnet:

- der sichere Abstand und
- die notwendige Verzögerung.

Bei der Wahl eines anzuzeigenden sicheren Abstands ist zu beachten, daß dieser zwar groß genug sein sollte, um eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten, daß der empfohlene Wert aber nicht unerwartet hoch sein darf. Wird als sicherer Abstand ein Wert angezeigt, der sehr viel größer ist als der vom Fahrer üblicherweise eingehaltene und auf seinen Erfahrungen beruhende Mindestabstand, so wird die Akzeptanz dieses Sicherheitsabstands beim Fahrer niedrig sein, die Wirksamkeit der Sicherheitsempfehlung also relativiert. Werden diese deutlich höheren Abstände hingegen von den Fahrern ausgerüsteter Fahrzeuge eingehalten, so würden die entstehenden größeren Lücken wiederum von anderen Fahrern genutzt, um von benachbarten Fahrstreifen hineinzuwechseln. Die Folge wäre, daß Fahrer ausgerüsteter Fahrzeuge ständig gezwungen würden, zu verzögern, um wieder einen sicheren Abstand herzustellen, was diese Fahrer auf Dauer frustrieren und damit ebenfalls die Akzeptanz des empfohlenen Sicherheitsabstands senken würde.

Von den drei möglichen Definitionen eines kinematisch sicheren Abstands aus Kapitel 2 scheidet daher der absolut sichere Abstand aus, da die empfohlenen Abstandswerte zu hoch sind. Der bedingt relativ sichere Abstand setzt die zuverlässige Kenntnis der Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs voraus. Hiervon kann aber erst bei vollem Ausrüstungsgrad der Fahrzeugflotte ausgegangen werden. Auch diese Definition ist daher hier ungeeignet. Sinnvoll scheint nur die Definition des relativ sicheren Abstands. Einstellbare Parameter bei der Definition des sicheren Abstands sind die Werte maximaler Verzögerung des eigenen und des vorausfahrenden Fahrzeugs, sowie eine Zeitlücke τ . Bei geschickter Wahl dieser Parameter kann es gelingen, daß die errechneten Abstandswerte den Erwartungen der Fahrer noch entsprechen und gleichzeitig eine ausreichende Sicherheit gewährleistet wird. Um auf der sicheren Seite zu liegen, sollte die maximale Verzögerung des Vorausfahrenden betragsmäßig eher nach oben, die eigene eher nach unten abgeschätzt werden. Bei der Zeitlücke τ ist die Reaktionszeit des Fahrer-Fahrzeug-Systems zu berücksichtigen: Reaktionszeit des Fahrers, Umsetzzeit, Ansprechzeit der Bremsen.

Für die Berechnung des Wertes notwendiger Verzögerung gilt die Formel 2-9. Der Wert kann immer dann berechnet werden, wenn das Vorderfahrzeug langsamer fährt.

Merkmalsauswahl

Die beiden wesentlichen Größen, die dem Fahrer angezeigt werden sollen, sind der sichere Abstand und die notwendige Verzögerung. Der sichere Abstand gilt allgemein, für Folgevorgänge mit v_n annähernd so groß wie v_{n-1} , aber auch für alle Fälle, in denen die beiden Fahrzeuge mit unterschiedlicher Geschwindigkeit fahren, z.B. Annäherungsvorgänge. Der Abstand reicht jeweils aus, um bei einer Vollbremsung des Vorausfahrenden eine Kollision zu vermeiden. Allerdings wird dem Nachfolger in dieser Notsituation zugemutet, ebenfalls mit maximaler Verzögerung zu bremsen. Der errechenbare Wert notwendiger Verzögerung ist eine zusätzliche Größe, die aber nur dann relevant ist, wenn sich das Fahrzeug einem langsameren Vorausfahrenden nähert.

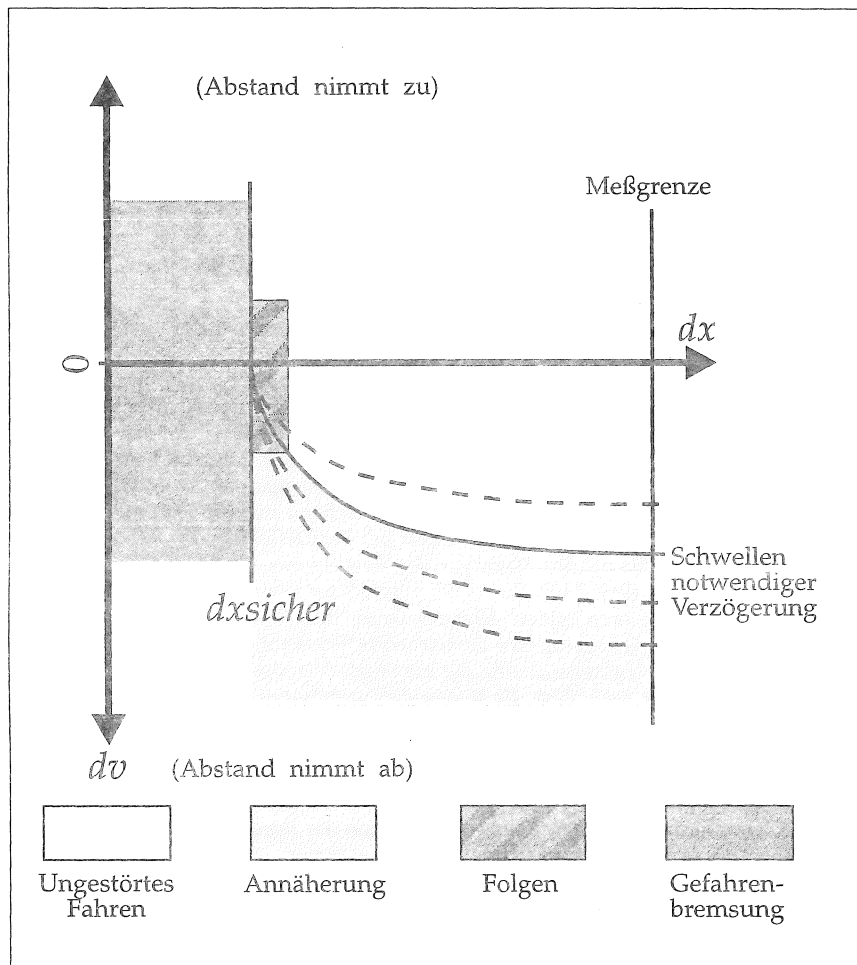


Abb. 6-4: Schwellenwerte beim beeinflussen Fahren

Klassifizierung

In diesem letzten Schritt der Modellierung des Einflusses der Abstandswarnung ist zu unterscheiden, ob das Beeinflussungssystem die Fahrzeugbewegungen aufgrund der empfangenen Signale regelt oder ob der Fahrer auf die ihm angebotene Information reagiert. Entsprechend ist zu unterscheiden zwischen der automatischen Klassifizierung und der Klassifizierung durch den Fahrer.

Der sichere Abstand sollte dem Fahrer daher permanent angezeigt werden, z.B. in Form einer graphischen Darstellung, aus der der Fahrer mit einem Blick ersehen kann, in welchem Verhältnis der errechnete sichere Abstand zu dem aktuell eingehaltenen Abstand steht. Dies kann z.B. durch eine farbige Anzeige geschehen, in der ein grünes Signal dafür steht, daß der aktuelle Abstand größer als der errechnete Sicherheitsabstand ist, gelb dafür, daß der Abstand im kritischen Bereich ist, bzw. daß der Sicherheitsabstand leicht unterschritten wurde und rot für ein Fahren im Gefahrenbereich mit einem Abstand deutlich unter der Sicherheitsvorgabe. Zusätzlich kann ein Unterschreiten des Sicherheitsabstandes durch akustische Warnsignale angezeigt werden. Beim automatischen Fahren wird dem Regler zusätzlich zum aktuellen Abstand der Wert des Sicherheitsabstands übergeben sowie ein Signal, das anzeigt, ob der Sicherheitsabstand unterschritten ist oder nicht.

Der errechnete Wert notwendiger Verzögerung für Annäherungsvorgänge sollte dem Fahrer ebenfalls nicht als Absolutwert angezeigt werden, sondern sollte zum Beispiel in Relation gesetzt werden zu vordefinierten Schwellenwerten. Mit diesen Schwellenwerten können verschiedene Stufen des Fahrkomforts definiert werden: ein Schwellenwert notwendiger Verzögerung ist ein fester Verzögerungswert, z.B. $-2,5 \text{ m/s}^2$. Wird dieser bei Annäherungsvorgängen durch den aktuellen errechneten Wert notwendiger Verzögerung überschritten, reagiert das System mit akustischen und/oder optischen Warnsignalen. Beim automatischen Fahren wird wiederum der aktuelle Wert notwendiger Verzögerung, der Schwellenwert sowie ein Signal übergeben, daß eine Überschreitung des Schwellenwerts anzeigt.

Im Modell wird dies durch Parameter repräsentiert, die anzeigen, ob der Sicherheitsabstand oder ein Schwellenwert notwendiger Verzögerung überschritten ist, und das Fahrzeug sich demnach in einem gewarnten Zustand befindet. Beide Größen können im $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm dargestellt werden. Der sichere Abstand wird dabei nur im Bereich niedriger Geschwindigkeitsdifferenzen betrachtet und kann dort als von Δv unabhängiges Geradenstück abstrahiert werden, die Schwellen notwendiger Verzögerung hingegen als Parabel⁴. Formt man die Gleichung notwendiger Verzögerung (2-9) so um, daß Δx als Funktion von Δv dargestellt wird, erhält man für einen beliebigen festen Schwellenwert der Verzögerung b_{si} :

$$\Delta x = \Delta x_{sicher} - \frac{\Delta v_0^2}{2 \cdot (b_{si} - b_{i-1})} \quad (6-1)$$

Diese Funktion ist für $\Delta v = 0$ gerade der sichere Abstand. Der Parabelursprung liegt also bei $\Delta v = 0$, $\Delta x = \Delta x_{sicher}$. In Abbildung 6-4 sind der sichere Abstand sowie Funktionen der notwendigen Verzögerung dargestellt, die verschiedene Schwellenwerte der Beschleunigung repräsentieren.

⁴ Dabei interessiert nur der Ast der Parabel, bei dem Δv negativ ist, da nur dieser den Bereich der Annäherung repräsentiert.

a) Automatische Klassifizierung

Die oben definierten Schwellen *sicherer Abstand* und *notwendige Verzögerung* markieren Grenzen, bei deren Überschreiten eine Veränderung in den Signalen eintritt. Auf diese neue Situation, die eine Veränderung des Zustands bezüglich des Vorfahrenden anzeigt, muß mit einer Verhaltensänderung reagiert werden. Insofern trennen die genannten Schwellen verschiedene Zustandsbereiche voneinander, denen beim automatischen Fahren jeweils eine bestimmte Form des Fahrverhaltens zugeordnet ist.

Zu diesen grundlegenden Schwellen kommen noch weitere hinzu, die nötig sind, um das automatische Fahren zu repräsentieren. Die begrenzte Reichweite der Meßsensoren kann durch eine Schwelle *Meßgrenze* beschrieben werden, die von Δv unabhängig ist und sich daher als Gerade mit festem Δx -Wert darstellt. Außerdem werden noch Schwellen benötigt, um den Folgevorgang einzugrenzen: eine weitere Abstandsgrenze *oberer Folgeabstand*, sowie zwei Schwellen, die den Folgevorgang hinsichtlich positiver bzw. negativer Geschwindigkeitsdifferenzen begrenzen: *pos.* bzw. *neg. Δv -Grenze*.

Diese Schwellen teilen die $\Delta x/\Delta v$ -Ebene in Zustandsbereiche (Abb. 6-4) ein. Die diesen Bereichen jeweils zugeordnete Form des Verhaltens wird wie folgt modelliert:

- Ungestörtes Fahren

Die Fahrzeugbewegung wird nicht durch ein Vorderfahrzeug beeinflusst, entweder, weil keines gemessen werden kann (außerhalb der Reichweite des Sensors) oder, weil der Abstand noch so groß ist, daß eine benötigte Verzögerung betragsmäßig unterhalb jedweden definierten Schwellenwerts liegt.

In diesem Fall kann das Fahrzeug mit einer zuvor z.B. vom Fahrer definierten Wunschgeschwindigkeit fahren, bzw. diese durch Beschleunigen zu erreichen suchen. Ähnlich wie die Schwellenwerte notwendiger Verzögerung abhängig vom gewünschten Fahrkomfort Grenzen für die negative Beschleunigung außerhalb von Gefahrensituationen definieren, können auch für die positive Beschleunigung Komfort-Grenzen festgesetzt werden, die zum Erreichen der Wunschgeschwindigkeit nicht überschritten werden sollen. Allerdings scheint es nicht sinnvoll, einen festen Beschleunigungswert zu verwenden, wenn mit dieser Komfort-Grenze verschiedene Fahrsituationen behandelt werden sollen. Diese Grenze sollte vielmehr von der absoluten Geschwindigkeit und von der Differenz zwischen Geschwindigkeit und Wunschgeschwindigkeit abhängen.

- Annäherung

Das Annähern an ein langsames Vorderfahrzeug wird dadurch erkannt, daß eine der Schwellen notwendiger Verzögerung überschritten wurde. Dies bedeutet, daß jetzt zur Kollisionsvermeidung bereits mit einer betragsmäßig höheren Verzögerung gebremst werden muß, als der überschrittene Schwellenwert.

Das System reagiert jetzt mit Verzögerung. Die tatsächlich notwendige Ver-

zögerung wird verwendet, wenn nur eine derartige Schwelle definiert ist, oder wenn die letzte von mehreren definierten Schwellen überschritten wurde. Wurden mehr als eine Schwelle definiert, und ist noch nicht die letzte überschritten, wird mit einer betragsmäßig geringeren als der tatsächlich notwendigen Verzögerung gebremst, bis eine neue Schwelle überschritten wird, z.B. mit einem prozentualen Anteil der tatsächlich notwendigen Verzögerung (80%, 90%). Der Vorteil bei Verwendung mehrerer, der eigentlichen Schwelle "vorgeschalteter" Schwellen ist ein langsames Eintauchen in den Verzögerungsvorgang. Dadurch kann die Veränderung der Beschleunigung (der Ruck) reduziert werden und bei einer nicht konstanten Fahrweise des Vorderfahrzeugs, z.B. einem Beschleunigen, entsteht insgesamt ein gleichmäßigeres Fahrverhalten beim Folgefahrzeug. Mit der tatsächlich notwendigen Verzögerung wird erst dann gebremst, wenn die letzte der definierten Schwellen überschritten ist (z.B. 40% der maximal möglichen Verzögerung), und demnach nichts mehr darauf hindeutet, daß das Vorderfahrzeug wieder beschleunigt.

- Folgen

In diesem Bereich ist die Geschwindigkeitsdifferenz nahe null, der Abstand liegt zwischen Sicherheitsabstand und oberem Folgeabstand.

Der Regler im Folgefahrzeug versucht die Geschwindigkeitsänderungen beim Vorausfahrenden wahrzunehmen und seine eigene Beschleunigung diesen anzupassen. Das Fahrzeug wird daher mit der Systemverzögerungszeit auf Änderungen reagieren, und somit oszillierend im Folgebereich pendeln.

- Gefahrenbremsung

Wenn der errechnete Sicherheitsabstand unterschritten ist, befindet sich das Fahrzeug in einer Gefahrensituation. Bei einer plötzlichen Vollbremsung des Vorausfahrenden könnte eine Kollision ggf. nicht mehr vermieden werden.

Es muß daher versucht werden, den Abstand durch Verzögern wieder zu vergrößern. Es wird eine Gefahrenbremsung eingeleitet, deren Stärke jedoch davon abhängen wird, wie weit der Sicherheitsabstand unterschritten ist. Die unterschiedlich starke Reaktion wird errechnet, indem ein Zeitintervall t_{erlaubt} angegeben wird, innerhalb dessen der Sicherheitsabstand wieder erreicht werden soll. Die Größe dieses Zeitintervalls wird als lineare Funktion in Abhängigkeit vom Grad der Unterschreitung des Sicherheitsabstands angegeben.

$$t_{\text{erlaubt}} := dt + \frac{\Delta x - \Delta x_{\text{Still}}}{\Delta x_{\text{sicher}} - \Delta x_{\text{Still}}} \cdot t_{\text{max}}$$

Dabei ist dt der Zeitschritt des Systems (z.B. 0,1 Sekunde), Δx_{Still} der Stillstandsabstand (entspricht der Schwelle Δx im Fahrermodell) und t_{max} die vorzugebende maximale Dauer des Fahrens im Gefahrenbereich. Die Größe des Zeitintervalls ist maximal, wenn der aktuelle Abstand gleich dem Sicherheitsabstand ist. Es hat sein Minimum von nur genau dem Systemzeitschritt beim Stillstandsabstand. Die Beschleunigung wird mit Hilfe dieser Zeitintervalldauer wie folgt berechnet:

$$b = 2 \cdot \frac{\Delta v}{t_{\text{erlaubt}}} - 2 \cdot \frac{\Delta x_{\text{sicher}} - \Delta x}{t_{\text{erlaubt}}^2}$$

b) Klassifizierung durch den Fahrer

Für den Fall des unterstützten Fahrens treffen die direkte Wahrnehmung der Umwelt durch den Fahrer und dessen Einschätzung der Situation zusammen mit den vom Abstandswarnsystem angezeigten Informationen. Der Fahrer verarbeitet nun die Informationen aus beiden Quellen. Daraus resultierende Veränderungen des Fahrverhaltens gegenüber der nicht unterstützten Situation sind dann zu erwarten, wenn die natürliche Einschätzung des Fahrers abweicht von der angezeigten Fahrempfehlung. Im Modell kann dies dadurch dargestellt werden, daß die beiden

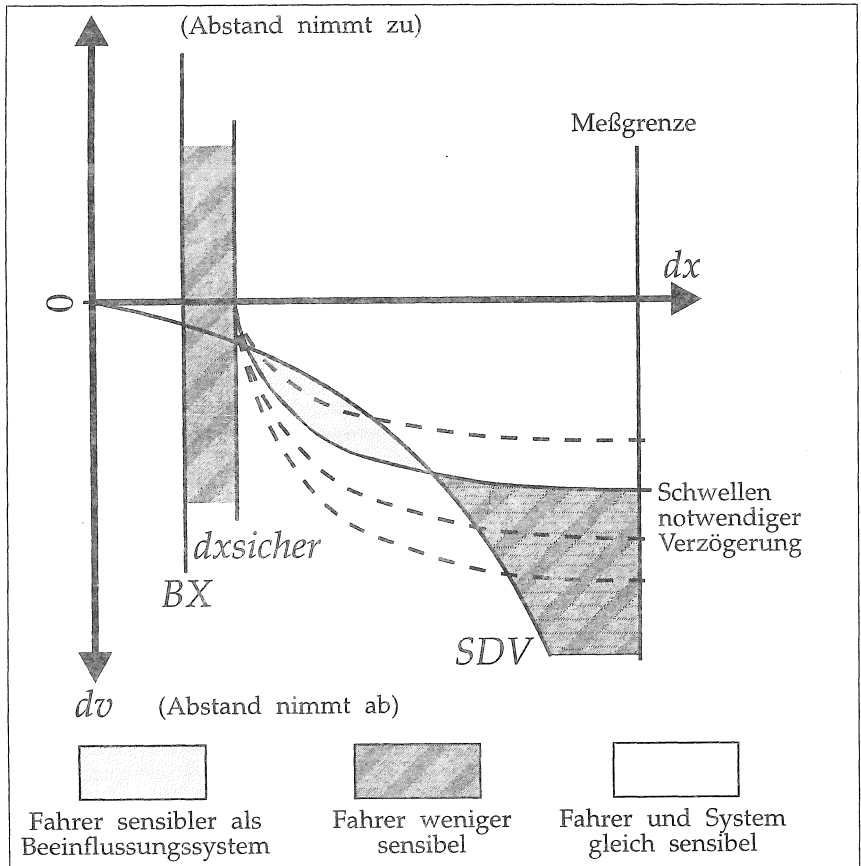


Abb. 6-5: Überlagerung der Schwellen menschlicher Wahrnehmung und Entscheidung mit den Warnschwellen des Abstandswarnsystems

Modelle, die die Wahrnehmung und Einschätzung des Fahrers bzw. die Messung, Berechnung und Merkmalsauswahl des Abstandswarnsystems repräsentieren, überlagert werden. In Abbildung 6-5 sind die Wahrnehmungs- und Entscheidungsschwellen des verwendeten Fahrermodells nach WIEDEMANN (1974) und die oben diskutierten Warn- oder Anzeigeschwellen in ein $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm eingetragen.

Durch die Überlagerung ergeben sich Bereiche, in denen der Fahrer sensibler reagiert als das System, und solche, in denen er weniger sensibel reagiert. Dies resultiert zum einen aus Unterschieden zwischen den Funktionsverläufen der Schwelle menschlicher Wahrnehmung SDV und der Schwellen notwendiger Verzögerung, zum anderen aus Unterschieden zwischen dem minimalen Folgeabstand BX des Fahrers und dem sicheren Abstand, der vom Abstandswarnsystems errechnet ist.

Zu beachten ist, daß der sichere Abstand und der minimale Folgeabstand des Fahrers von der absoluten Geschwindigkeit abhängen. Die im $\Delta x/\Delta v$ -Diagramm dargestellten Schwellen repräsentieren daher nur eine Situation mit fester Absolutgeschwindigkeit des Vorausfahrenden, wobei hier eine relativ hohe Geschwindigkeit angenommen wurde, bei der der sichere Abstand größer ist als der vom Fahrer eingehaltene Folgeabstand. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten hält der Fahrer hingegen häufig einen Mindestabstand ein, der höher ist als der sichere Abstand. In Abbildung 6-6 sind minimaler Folgeabstand und sicherer Abstand gegenübergestellt. Der minimale Abstand des Fahrers liegt hier normalverteilt zwischen den Kurven $BX-1$ und $BX-3$ mit Mittelwert $BX-2$, wie dies aus Messungen bekannt ist (siehe Kapitel 3 und 4). Für den sicheren Abstand sind drei Kurven angegeben, die verschiedene Zeitlücken repräsentieren: 1,5s, 1,8s und 2s (siehe auch Kapitel 2). Es wird hier von annähernd gleichen Bremsvermögen von Vorderfahrzeug und Folgefahrzeug ausgegangen.

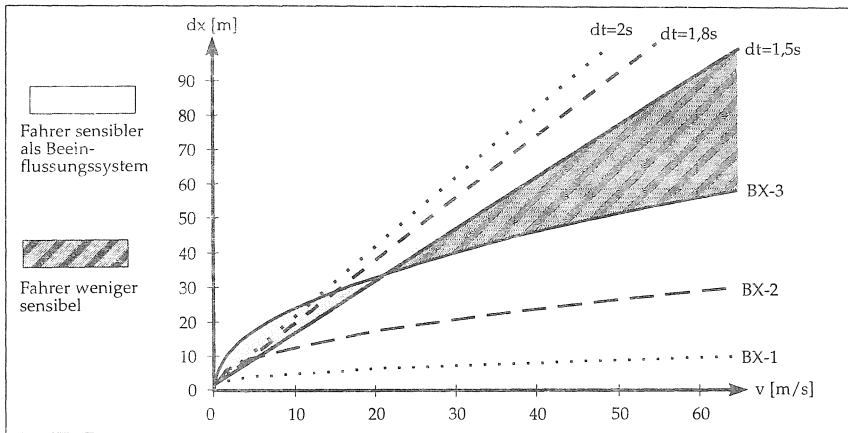


Abb. 6-6: Minimaler Folgeabstand und sicherer Abstand

In diesen in den Abbildungen dargestellten Bereichen unterschiedlicher Einschätzung

von Fahrer und Abstandswarnsystem findet die Klassifizierung durch den Fahrer statt. Zu unterscheiden ist dabei, um welchen der Bereiche es sich handelt, d.h. welche der beiden Warnschwellen überschritten wurde. Die Klassifizierung beschreibt dann, in welcher Form das natürliche Fahrverhalten des Fahrers an die angezeigte Fahrempfehlung adaptiert wird. Dazu wurden vier Klassen menschlicher Reaktion definiert, die jeweils eine prinzipielle Form der Verhaltensanpassung beschreiben.

1. Volle Reaktion

Die Warnung wird vom Fahrer voll akzeptiert. Er paßt sein Fahrverhalten der angezeigten Empfehlung an. Dies bedeutet, daß er zum einen den angezeigten Wert des sicheren Abstands akzeptiert. Im Modell wird der subjektive Mindestabstand durch den objektiv sicheren Abstand ersetzt. Zum anderen bedeutet es, daß er mit der Verzögerung beginnt, sobald ihm die Überschreitung einer Schwelle notwendiger Verzögerung angezeigt wird.

Wird die Schwelle sicheren Abstands unterschritten, versucht der Fahrer, seinen Abstand wieder zu vergrößern. Modelliert wird dies in ähnlicher Weise wie beim automatischen Fahren. Es wird angenommen, daß sich der Fahrer selbst eine Grenze für die maximale Dauer des Fahrens im Gefahrenbereich setzt. Diese entspricht dann der Größe t_{\max} aus der Modellierung des automatischen Fahrens. Im Modell setzt sich diese maximale Dauer zusammen aus einem fahrerabhängigen und einem fahrerunabhängigen Zeitintervall. Beide Intervalle werden als normalverteilte Zufallsgrößen implementiert und erlauben damit eine Modellierung interpersoneller und intrapersoneller Unterschiede.

Bei Überschreitung der Schwelle notwendiger Verzögerung wird eine Zielbremsung auf die Geschwindigkeit des Vorausfahrenden und den sicheren Abstand eingeleitet, die in ähnlicher Weise realisiert ist wie die Zielbremsung beim nicht-unterstützten natürlichen Fahren. Dies hat zur Folge, daß der Fahrer im Annäherungsfall nicht erst auf die Wahrnehmungsschwelle *SDV* reagiert, sondern bereits nach erteilter Warnung, repräsentiert durch Überschreiten der Warnschwelle.

2. Partielle Reaktion

Der Fahrer akzeptiert die Warnung, er akzeptiert den empfohlenen Wert aber nur noch partiell. Bei der Modellierung genügt es, diese partielle Akzeptanz auf den Wert des sicheren Abstands zu beziehen. Der Fahrer ersetzt nun nicht mehr wie oben seinen subjektiven Wert des Mindestabstands durch den objektiv sicheren Abstand. Vielmehr modifiziert er sein subjektives Sicherheitsempfinden in Richtung auf den empfohlenen Wert. Sein neuer subjektiver Sicherheitsabstand liegt demnach zwischen dem natürlichen unbeeinflussten Wert und dem empfohlenen Sicherheitsabstand.

Im Modell wird dies wieder durch eine Zufallsgröße realisiert, die den Grad der Akzeptanz des empfohlenen Werts angibt. Diese Größe ist abhängig vom Sicherheitsbedürfnis des Fahrers und wird sich während eines Fahrvorgangs

nicht laufend ändern. Sie wird im Modell als fest angenommen und für jeden Fahrer einmal aus einer Normalverteilung gezogen. Damit werden interpersonelle Unterschiede nachgebildet.

Da der Fahrer die Warnung akzeptiert, beginnt er hier ebenfalls mit der Zielbremsung, sobald er vom System eine Warnung erhält, also nach Überschreiten des Schwellenwerts notwendiger Verzögerung.

3. Relative Reaktion

Auch in dieser Klasse des Reaktionsverhaltens akzeptiert der Fahrer die Gefahrenwarnung. Allerdings akzeptiert er den empfohlenen Wert des Sicherheitsabstands nicht mehr. Der Fahrer ändert daher nicht sichtbar sein Abstandsverhalten, er fährt allerdings aufmerksamer in all denjenigen Situationen, in denen ihm das Unterschreiten des Sicherheitsabstands angezeigt wird. Dies hat eine Reduktion der Reaktionszeit zur Folge. Wird der Fahrer gewarnt, ist er sich einer potentiellen Gefahr bewußt. Er rechnet daher damit, in unmittelbarer Zukunft seine subjektive Sicherheitsschwelle zu überschreiten, nimmt diese Überschreitung schneller wahr und kann früher darauf reagieren.

Da der Fahrer die Warnung akzeptiert, kann die Verzögerung beim Annähern ebenfalls früher eingeleitet werden, allerdings erfolgt die Zielbremsung hier auf den unveränderten subjektiven Wert des Folgeabstands.

4. Keine Reaktion

Hier akzeptiert der Fahrer die Warnung und Empfehlung gar nicht. Er ignoriert die Anzeige und behält sein natürliches Fahrverhalten bei. Er fährt im Falle einer Warnung nicht aufmerksamer, er adaptiert nicht sein subjektives Sicherheitsempfinden.

Welcher Anteil der Fahrer ihr Fahrverhalten in welcher Form den Empfehlungen des Abstandswarnsystems anpassen wird, oder in Worten des Modells, wieviel Fahrer in welcher Situation in welche der definierten Reaktionsklassen fallen werden, kann, wie weiter oben bereits mehrfach angesprochen, derzeit nicht bestimmt werden. Trotz Felderproben und Überlegungen über das menschliche Adaptationsverhalten können noch keine endgültigen Aussagen darüber getroffen werden, welches Fahrverhalten sich nach Einführung der Fahrbeeinflussungssysteme tatsächlich einstellen wird.

Der Grad der Akzeptanz hängt z.B. auch von der konkreten Realisierung der Systeme ab: wie "akzeptabel" sind die Empfehlungen? Welche Form der Warnung wird verwendet? So wird mit einer akustischen Warnung sicherlich ein hoher Befolgungsgrad erreicht, wenn nur das Signal störend genug ist und das System nicht abgeschaltet werden kann. Eine Unterscheidung der Reaktion der Fahrer auf eine Warnung wird sich dann höchstens noch über die Warndauer feststellen lassen, ab der ein Fahrer anfängt zu verzögern.

Mit dem dargestellten Modell können aber dennoch die Auswirkungen der

Einführung von Abstandswarnsystemen untersucht werden und Aussagen über potentielle Veränderungen im Verkehrsfluß getroffen werden. Das fehlende Wissen über das menschliche Adaptationsverhalten wird im Modell durch die Aufteilung der Fahrer auf die definierten Klassen repräsentiert. Es müssen daher verschiedene Klassenaufteilungen untersucht werden. Die Klassenaufteilung wird eine Eingabegröße des Modells und wird in der Auswahl der Simulationsszenarien als Eingabeparameter berücksichtigt. Dadurch kann es gelingen, den Bereich potentieller Veränderungen einzugrenzen.

6.2.2 Modell des Einflusses der Geschwindigkeitskontrolle

Auch für das System der Geschwindigkeitskontrolle wird das oben beschriebene generelle Modell umgesetzt. Die Beschreibung kann hier kürzer ausfallen, da die Realisierung in ähnlicher Weise wie bei der Abstandswarnung erfolgt.

Messung

Es werden ähnliche Meßgrößen wie bei der Abstandswarnung benötigt, die sich im wesentlichen auf die Situation auf dem aktuellen Fahrstreifen beziehen. Zusätzlich zu den einfachen Größen, die die eigene Bewegung, die Relativbewegung bezüglich umgebenden Fahrzeugen sowie die Straßenoberflächenbeschaffenheit beschreiben, interessieren hier auch komplexere Größen, und zwar in Abhängigkeit von den zu realisierenden Optimierungszielen (siehe Kapitel 2).

Für die Berechnung einer sicheren Folgegeschwindigkeit kann neben der Bewegung des Vorderfahrzeugs auch die Verkehrssituation vor dem Vorderfahrzeug berücksichtigt werden, wozu z.B. aggregierte Verkehrs-Kenngrößen benötigt würden, die nicht direkt im Fahrzeug gemessen werden können, sondern von stromabwärts fahrenden und ebenfalls ausgerüsteten Fahrzeugen oder von straßenseitigen Meßeinrichtungen übertragen werden.

Zur Berechnung einer bezüglich der Leistungsfähigkeit optimalen Geschwindigkeit werden wiederum aggregierte Kenngrößen des Verkehrszustands benötigt, die nur von straßenseitigen Systemen erfaßt werden können.

Um in der Geschwindigkeitsempfehlung die aktuell gültigen Geschwindigkeitsbeschränkungen berücksichtigen zu können, muß eine Möglichkeit geschaffen werden, diese leicht erfassen zu können. Dazu werden geeignete straßenseitige Einrichtungen benötigt, da eine optische Wahrnehmung der klassischen Verkehrszeichen zu unsicher ist.

Zur Harmonisierung der Geschwindigkeit innerhalb des Fahrstreifens ist es nötig, eine mittlere Geschwindigkeit oder die Geschwindigkeit von vielen Fahrzeugen auf dem Fahrstreifen zu erfassen. Dies kann wiederum nur mit Hilfe anderer ausgerüsteter Fahrzeuge oder durch straßenseitige Systeme erfolgen.

Zur Regulierung der Geschwindigkeitsaufteilung zwischen den Fahrstreifen werden die Geschwindigkeitsinformationen von allen Fahrstreifen benötigt.

Berechnung

Berechnet werden wieder diejenigen Größen, die nicht direkt gemessen werden können. Zu den Bewegungs- und Relativbewegungsgrößen kommen hier, je nach zu realisierenden Optimierungszielen, noch die Werte optimaler Geschwindigkeit hinzu.

Eine sichere Folgegeschwindigkeit läßt sich wie schon bei SCHNITTGER (1991) einfach aus der Gleichung des relativ sicheren Abstands errechnen:

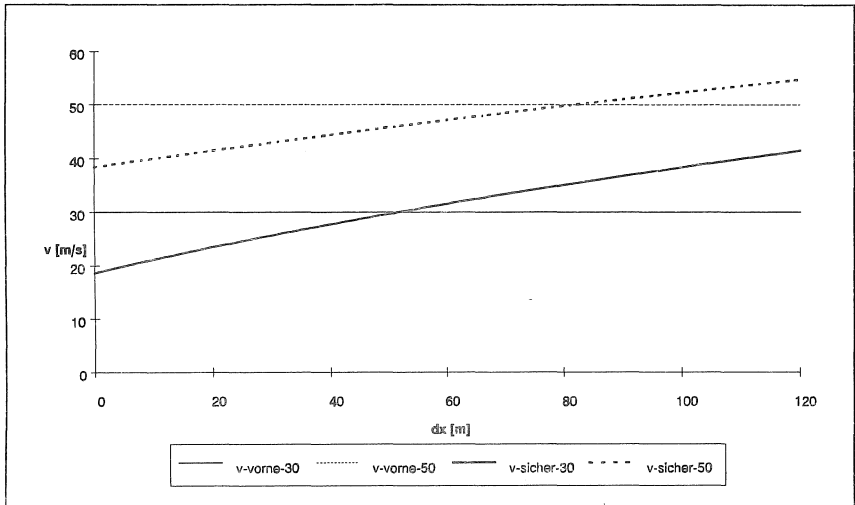
$$v_i = b_i \cdot \tau_i + \sqrt{(b_i \cdot \tau_i)^2 + \frac{v_{i-1}^2 \cdot b_i}{b_{i-1}}} + 2b_i(c_i - \Delta x_i)$$

mit b_i und b_{i-1} den maximalen Bremsvermögen des Fahrzeugs i und dessen Vorderfahrzeugs, τ_i der Reaktionszeit und c_i dem Stillstandsabstand. Danach ist die sichere Folgegeschwindigkeit gerade gleich der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden, wenn im sicheren Abstand gefahren wird. Für höhere Abstände errechnet sich eine sichere Folgegeschwindigkeit, die höher ist als die des Vorausfahrenden, für Abstände kleiner als der Sicherheitsabstand ergibt sich eine sichere Geschwindigkeit, die niedriger ist als die des Vorausfahrenden. Bei Annäherungsvorgängen wird nach dieser Gleichung ein langsames Heranführen an die Geschwindigkeit des Vorausfahrenden erzielt. Bei Folgevorgängen wird eben diese Geschwindigkeit des Vorausfahrenden angezeigt. Führt das Fahrzeug hingegen mit einem Abstand, der größer als der Sicherheitsabstand ist, ohne sich anzunähern, kann eine sichere Geschwindigkeit empfohlen werden, die höher ist als die des Vorausfahrenden, womit auf ein Aufschließen auf das Vorderfahrzeug hingewirkt wird. Wird schließlich der sichere Abstand unterschritten, kann dies durch Einstellen der niedrigeren sicheren Folgegeschwindigkeit wieder korrigiert werden. Dies veranschaulicht Abbildung 6-7 für $b_i = b_{i-1} = -8 \text{ m/s}^2$, $\tau_i = 1,5 \text{ s}$, $c_i = 6,5 \text{ m}$ und zwei verschiedene aber konstante Werte der Geschwindigkeit v_{i-1} des Vorausfahrenden.

Für die Harmonisierung der Geschwindigkeiten bzw. eine günstige Aufteilung der Geschwindigkeiten über den Fahrstreifen müssen ggf. mittlere Geschwindigkeitswerte aus den verschiedenen Einzelgeschwindigkeiten berechnet werden, die z.B. von straßenseitigen Einrichtungen übertragen wurden.

Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit wurden in Kapitel 2 zwei Möglichkeiten angesprochen. Die Anzeige einer höheren Geschwindigkeit bei denjenigen Fahrern, die mit zu großen Lücken fahren, kann, wie oben erwähnt, mit Hilfe der sicheren Folgegeschwindigkeit erreicht werden. Für die Berechnung einer optimalen Durchflußgeschwindigkeit müssen wiederum makroskopische Größen ermittelt werden,

insbesondere die mittlere Geschwindigkeit der ganzen Fahrbahn.



Merkmalsauswahl

Es kann gewünscht sein, mehrere oder gar alle angesprochenen Optimierungsstrategien anzuwenden. Dies führt zu mehreren, unter Umständen unterschiedlichen Werten optimaler Geschwindigkeit. Aufgabe der Merkmalsauswahl ist es, die Anzahl dieser Werte zu reduzieren. Dem Fahrer kann gleichzeitig höchstens ein Wert optimaler Geschwindigkeit angezeigt werden, höchstens noch ein Geschwindigkeitsintervall, bestehend aus einer oberen und einer unteren Grenze optimaler Geschwindigkeit. Dies gilt für beide Formen der Beeinflussung, für den Mensch bzw. für das System als Fahrer. Soll ein Intervall angezeigt werden, so wird der obere Wert durch das Minimum aller oberen Schranken ($\sup v_{\text{opt}}$) begrenzt, der untere Wert durch das Maximum der unteren Schranken ($\inf v_{\text{opt}}$).

$$\sup v_{\text{opt}} := \min (\text{Geschwindigkeitsbeschränkungen, sichere Folgegeschwindigkeit bei Annähern und Folgen, optimale Durchflußgeschwindigkeit,...})$$

$$\inf v_{\text{opt}} := \max (\text{vorgeschriebene Mindestgeschwindigkeit, sichere Folgegeschwindigkeit bei zu großen Lücken zum Vorausfahren,...})$$

Soll statt eines Intervalls nur ein Geschwindigkeitswert angezeigt werden, bildet $\sup v_{\text{opt}}$ eine obere Grenze und $\inf v_{\text{opt}}$ ggf. eine untere. Als Wert kann z.B. der Mittelwert beider Grenzen angezeigt werden.

Klassifizierung

Bei der Klassifizierung durch den Fahrer wurden wiederum Klassen der Reaktion auf die Anzeige definiert. In Analogie zum Modell der Abstandskontrolle wurden hier jedoch nur drei Klassen definiert:

Volle Reaktion

Der Fahrer akzeptiert den angezeigten Wert vollständig.

Partielle Reaktion

Der Fahrer akzeptiert den angezeigten Wert nur partiell.

Keine Reaktion

Der angezeigte Wert wird vom Fahrer ignoriert.

Bei der automatischen Klassifizierung wird die berechnete optimale Geschwindigkeit direkt als Eingangsgröße der Fahrprozeduren verwendet.

Modelliert wird der Einfluß in beiden Fällen durch Beeinflussung eines fahrerfahrzeugspezifischen Parameters: die Wunschgeschwindigkeit von Fahrer bzw. System. Diese wird in der Klassifizierung in der oben beschriebenen Form an die Anzeige angepaßt. Dadurch, daß der Einfluß der Geschwindigkeitskontrolle auf das Fahrverhalten im Modell anders repräsentiert wird als der der Abstandskontrolle, wird es möglich, beide Systeme gemeinsam zu aktivieren.

6.2.3 Modell des Einflusses der Fahrstreifenwechselhilfe

Ziele und Funktionen der Fahrstreifenwechselhilfe wurden in Kapitel 2 vorgestellt. Im Gegensatz zu den beiden bisher vorgestellten Systemen liegt das Augenmerk hier nun nicht mehr nur auf dem einen gerade befahrenen Fahrstreifen. Vielmehr sind jetzt zusätzlich die beiden benachbarten Fahrstreifen von Interesse.

Messung

So richtet sich die Messung in der Realität wie im Modell auf den Verkehr auf den gerade befahrenen und auf die benachbarten Fahrstreifen. Gemessen werden wiederum Größen der eigenen Bewegung sowie Größen der Relativbewegung zu umgebenden Fahrzeugen, wie Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz.

Für die Modellierung der Messung ist es wichtig, Form und Größenordnung von Meßfehlern und Meßungenauigkeiten zu repräsentieren. Stärker noch als bei der Messung von Fahrzeugen auf dem eigenen Fahrstreifen kommt hier die Möglichkeit hinzu, daß Fahrzeuge in der Realität gar nicht erfaßt werden, da sie sich in einem sogenannten toten Winkel des Meßsystems bewegen. Da jedoch an dieser Stelle nicht bekannt ist, welche Art von Meßsensorik eingesetzt werden könnte, um Fahrzeuge

auf benachbarten Fahrstreifen zu erfassen, wird bei der Modellierung lediglich von einer analogen Meßungenaugkeit wie bei der Modellierung der Messungen auf dem eigenen Fahrstreifen ausgegangen.

Die zur Optimierung der Fahrstreifenaufteilung benötigten makroskopischen Größen, wie die mittlere Geschwindigkeit auf den einzelnen Fahrstreifen, können wie weiter oben angesprochen, nur schwer vom bewegten Fahrzeug aus erfaßt werden, müßten vielmehr von straßenseitigen Meßeinrichtungen aufgenommen und an die Fahrzeuge übertragen werden. Hierzu könnten sogar bereits installierte kollektive Fahrbeeinflussungssysteme genutzt werden, wie Schilderbrücken mit dynamischer Geschwindigkeitsanzeige, um allen, nicht nur den ausgerüsteten Fahrzeugen, unterschiedliche Geschwindigkeitsbeschränkungen auf den verschiedenen Fahrstreifen anzuzeigen.

Berechnung

Neben den nicht direkt meßbaren Größen der eigenen Bewegung und der Relativbewegung werden hier Parameter berechnet, die eine objektive Einschätzung von Möglichkeiten, Sicherheit und Nutzen eines Fahrstreifenwechsels erlauben. Dies sind die Sicherheitsabstände zu auf den benachbarten Fahrstreifen vorausfahrenden sowie den dort nachfolgenden Fahrzeugen. Die Sicherheitsabstände werden hier wie beim System der Abstandswarnung berechnet, indem der Ansatz der relativen Sicherheit verwendet wird. Es wird dabei angenommen, das Fahrzeug befinde sich bereits auf dem benachbarten Fahrstreifen, habe also unter Beibehaltung der longitudinalen Bewegung eine laterale Bewegung durchgeführt.

Außerdem wird berechnet, welche Verzögerung unter diesen Umständen dem neuen Folgefahrzeug zugemutet wird. Auch dies wird wie bei der Abstandswarnung berechnet, als Wert notwendiger Verzögerung für das Folgefahrzeug, um die Geschwindigkeitsdifferenz bei Einhaltung des sicheren Abstands auf null zu reduzieren.

Zur Einschätzung des Nutzens des Fahrstreifenwechselmanövers für die eigene Fahrt bzw. für die Qualität des Verkehrsflusses insgesamt werden schließlich die Geschwindigkeitsniveaus auf den betroffenen Fahrstreifen benötigt. Diese müssen dann berechnet werden, wenn durch Übertragung von straßenseitigen Meßeinrichtungen oder anderen ausgerüsteten Fahrzeugen Geschwindigkeitswerte von mehreren Fahrzeugen vorliegen, die gemittelt werden müssen. Andernfalls sind entweder schon die gemittelten Werte übertragen worden, oder es gibt keine äußere Meßeinrichtung. Ist letzteres der Fall, werden die Geschwindigkeiten der auf den verschiedenen Fahrstreifen unmittelbar Vorausfahrenden als Schätzwert des Geschwindigkeitsniveaus verwendet.

Merkmalsauswahl

Ergebnis der Merkmalsauswahl soll die Empfehlung für oder gegen einen Fahrstreifenwechsel sein, sowie die Anzeige einer dabei zu fahrenden Geschwindigkeit.

Ob ein Fahrstreifenwechsel empfohlen wird oder nicht, hängt zunächst davon ab, ob dieser als sicher bewertet werden kann. Dafür muß überprüft werden, ob die Sicherheitsabstände zum Vorderfahrzeug und zum Folgefahrzeug auf dem neuen Fahrstreifen eingehalten werden. Außerdem muß gewährleistet sein, daß die dem Folgefahrzeug zugemutete Verzögerung nicht dessen maximales Bremsvermögen übersteigt. Mehr noch, diese Verzögerung sollte ähnlich wie bei den Komfortgrenzen der Abstandswarnung zu definierende Schwellenwerte nicht überschreiten.

Außerdem muß geprüft werden, ob ein Fahrstreifenwechsel für die eigene Bewegung bzw. für den Verkehrsfluß auf dem Streckenabschnitt vorteilhaft ist. Ersteres geschieht zunächst durch die Feststellung des Grades der eigenen Behinderung, indem die eigene Wunschgeschwindigkeit mit dem Geschwindigkeitsniveau auf dem derzeitigen Fahrstreifen bzw. der aktuellen Geschwindigkeit des auf demselben Fahrstreifen Vorausfahrenden verglichen wird. Anschließend werden die Geschwindigkeitsniveaus des gerade befahrenen und des benachbarten Fahrstreifens bzw. die Geschwindigkeiten der auf diesen Fahrstreifen Vorausfahrenden miteinander verglichen. Ob durch den Fahrstreifenwechsel ein individueller Vorteil entsteht, kann danach über vorzugebende Schwellenwerte entschieden werden: übersteigt der Grad der Behinderung auf dem derzeitigen Fahrstreifen einen Schwellenwert, beispielsweise 20%, und ist das Geschwindigkeitsniveau auf dem benachbarten Fahrstreifen mindestens um einen anderen Schwellenwert höher, z.B. 10%, so wird der Fahrstreifenwechsel als individuell vorteilhaft definiert.

Die Einschätzung, ob durch den Fahrstreifenwechsel ein kollektiver Nutzen entsteht, kann nur aufgrund der Geschwindigkeiten auf den einzelnen Fahrstreifen durchgeführt werden. Ist die eigene Wunschgeschwindigkeit niedriger als das Geschwindigkeitsniveau des befahrenen Fahrstreifens, kann aus kollektiver Sicht ein Fahrstreifenwechsel nach rechts empfohlen, eine Fahrstreifenwechselempfehlung nach links hingegen blockiert werden. Ist die eigene Wunschgeschwindigkeit höher als das Geschwindigkeitsniveau des befahrenen Fahrstreifens, kann eine Empfehlung zum Wechseln nach links gegeben werden. Für Fahrstreifenwechselempfehlungen zu langsameren Fahrstreifen ist allerdings zu prüfen, wie lange das Fahrzeug unter gegebenen Umständen auf diesem langsameren Fahrstreifen verbleiben kann, bevor es erneut wegen einer Behinderung zum derzeitigen Fahrstreifen zurückwechseln müßte. Hierfür kann ein nicht zu unterschreitendes Mindestzeitintervall angegeben werden.

Alle drei Teilentscheidungen führen schließlich zur Fahrstreifenwechselempfehlung. Ein Fahrstreifenwechsel wird nur dann empfohlen, wenn alle Entscheidungen positiv ausfallen.

Wird der Fahrstreifenwechsel empfohlen, wird zusätzlich eine Geschwindigkeit angezeigt, die das Fahrzeug auf dem neuen Fahrstreifen einhalten soll. Damit kann erreicht werden, daß die Behinderung anderer Fahrzeuge reduziert wird. Diese empfohlene Geschwindigkeit kann also auch höher sein, als die eigene Wunschgeschwindigkeit. Sie errechnet sich aus dem Geschwindigkeitsniveau auf dem neuen Fahrstreifen, in die mindestens die Geschwindigkeiten des Vorder- und des Folgefahrzeugs auf diesem Fahrstreifen eingehen. Im Modell wird diese empfohlene Geschwindigkeit in einem eigenen Fahrzeugparameter gehalten, der nur für die Dauer des Aufenthalts auf dem betroffenen Fahrstreifen die eigene Wunschgeschwindigkeit beeinflußt.

Klassifizierung

Für die Klassifizierung durch den Fahrer wurden wieder vier Klassen definiert, die jeweils eine prinzipielle Form der Adaptation des Fahrverhaltens an die Empfehlung der Fahrstreifenwechselhilfe beschreiben.

Volle Reaktion

Der Fahrer akzeptiert die Fahrstreifenwechselempfehlung. Er führt einen Fahrstreifenwechsel durch, wenn ihm dies empfohlen wird, bzw. verzichtet darauf, wenn ihm davon abgeraten wird. Ebenfalls akzeptiert er die angezeigte Geschwindigkeit als seine neue Wunschgeschwindigkeit während der Fahrt auf dem anderen Fahrstreifen.

Partielle Reaktion

Auch hier akzeptiert der Fahrer die Fahrstreifenwechselempfehlung. Jetzt akzeptiert er die angezeigte Geschwindigkeit jedoch nur noch partiell. Er verändert seinen individuellen Wert der Wunschgeschwindigkeit in Richtung auf den angezeigten Wert. Modelliert wird dies wie bei den anderen beiden Systemen mit Hilfe von Zufallsparametern.

Relative Reaktion

Hier akzeptiert der Fahrer zwar noch die Fahrstreifenwechselempfehlung, die angezeigte Geschwindigkeit ignoriert er jedoch.

Keine Reaktion

In dieser Klasse schließlich ignoriert der Fahrer die Empfehlung gänzlich.

Beim automatischen Fahren könnten die beiden Signale wiederum direkt als Eingangsparameter verwendet werden. Das System würde mit Fahrstreifenwechsel bei entsprechender Anzeige reagieren und andernfalls keinen Fahrstreifenwechsel durchführen. Allerdings wird für das System Fahrstreifenwechselhilfe nur das unterstützte, nicht aber das automatische Fahren untersucht. Dies wird im nächsten Kapitel begründet.

7. Einsatz des Modells

Das beschriebene Simulationsmodell wird verwendet, um Auswirkungen der Einführung von individuellen Fahrbeeinflussungssystemen auf den Verkehrsablauf abzuschätzen. Das Vorgehen wird nun in diesem Kapitel beschrieben. Zunächst muß festgelegt werden, welche Versuche durchzuführen sind. Der Simulationsplan, der sich aus verschiedenen Simulationsszenarien zusammensetzt, wird daher zuerst vorgestellt. Anschließend wird diskutiert, in welcher Form die einzelnen Simulationsläufe ausgewertet und verglichen werden können. Dazu werden zunächst die aufgrund der Untersuchungsziele interessierenden Kenngrößen des Verkehrsablaufs identifiziert. Es wird dann im einzelnen beschrieben, in welcher Form diese Kenngrößen aus den Modellausgaben gewonnen werden können. Im dritten Teil dieses Kapitels schließlich wird die eigentliche Auswertung der Simulationsläufe des Versuchsplans beschrieben. Die Ergebnisse dieser Analyse werden vorgestellt.

7.1 Der Simulationsplan

In dieser Untersuchung werden verschiedene Verkehrssituationen auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen betrachtet. Der Streckenabschnitt, auf dem der Verkehr simuliert wird, setzt sich zusammen aus einer Vorlaufstrecke von eineinhalb Kilometern, der eigentlichen Beobachtungsstrecke von 1/2 Kilometer, sowie einer Nachlaufstrecke von einem Kilometer. Vor- und Nachlaufstrecken sind nötig um sicherzustellen, daß der Verkehr im beobachteten Abschnitt nicht von Unzulänglichkeiten des einfacheren Modells zum Einsetzen von Fahrzeugen und vom plötzlichen Verschwinden vorausfahrender Fahrzeuge beeinflußt wird.

Auf diesem Streckenabschnitt sind verschiedene Simulationsläufe durchzuführen, die jeweils unterschiedliche Verkehrssituationen repräsentieren und deren Ergebnisse in der Analyse miteinander verglichen werden können. Diese simulierten Situationen werden im folgenden *Simulationsszenarios* genannt. Die Szenarios werden durch eine Menge von grundlegenden Parametern charakterisiert. Jedem Szenario entspricht genau eine bestimmte Werteausprägung aller Parameter dieser Parametermenge. Die Menge zu untersuchender Szenarien ist daher das Produkt der Anzahl Ausprägungen aller unabhängigen Parameter. Im folgenden werden nun die szenariobeschreibenden Parameter vorgestellt und die zu untersuchenden Wertebereiche jedes Parameters diskutiert. Für jeden Parameter werden die untersuchten Werteausprägungen angegeben.

Wesentliche Parameter sind:

- Eingebaute Fahrbeeinflussungssysteme
- Anteil ausgerüsteter Fahrzeuge
- Form der Fahrverhaltensbeeinflussung
- Verteilung der Fahrer auf die verschiedenen Klassen der Verhaltensadaptation

Zu diesen wesentlichen Parametern, mit denen die verschiedenen Szenarios beschrieben werden, kommen noch andere Größen hinzu, mit denen ebenfalls unterschiedliche Verkehrssituationen charakterisiert werden, die aber keine weitere Verfeinerung der Menge der definierten Simulationsszenarios bedeuten. Vielmehr werden den Szenarien jeweils eine Reihe Simulationsläufe zugeordnet, die aus der Variation folgender Größen resultieren:

- Zuflußverkehrsstärke
- Verkehrszusammensetzung (LKW-Anteil)

Besondere Bedeutung hat der Parameter Zuflußverkehrsstärke, da die Wirkung der untersuchten Fahrbeeinflussungssysteme grundsätzlich von der Verkehrsbelastung abhängt. Es wurden daher jeweils 4 Ausprägungen zwischen 2000 und 4000 Fahrzeugen pro Stunde simuliert. Der LKW-Anteil wurde einheitlich auf 5% gesetzt.

7.1.1. Eingebaute Fahrbeeinflussungssysteme

Untersucht werden die drei Fahrbeeinflussungssysteme Abstandswarnung, Geschwindigkeitskontrolle und Fahrstreifenwechselhilfe. Diese Systeme werden zunächst einzeln untersucht. Außerdem scheint eine Betrachtung der Kombination von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle sinnvoll.

7.1.2 Anteil ausgerüsteter Fahrzeuge

Neben den beiden Extremfällen, nämlich der aktuellen Situation, in der noch kein Fahrzeug ausgerüstet ist und einer angestrebten Zielsituation, in der alle Fahrzeuge ausgerüstet sein werden, sind verschiedene Zwischenstufen der Ausrüstung zu untersuchen. Die Einführung von Fahrbeeinflussungssystemen wird nur schrittweise erfolgen, ähnlich wie bei anderen zusätzlichen Systemen, die für die Fortbewegung nicht unbedingt nötig sind, wie Katalysator oder ABS. Von besonderem Interesse sind daher die Stufen, in denen noch relativ wenig Fahrzeuge ausgerüstet sind. Neben dem 0%- und dem 100%-Fall werden noch eine Ausrüstung von 10%, 20% und 50% aller Fahrzeuge untersucht.

7.1.3 Form der Fahrverhaltensbeeinflussung

Grundsätzlich ist zwischen den beiden möglichen Formen der Fahrverhaltensbeeinflussung zu unterscheiden: dem unterstützten und dem kontrollierten oder automatischen Fahren. Beide Strategien werden für sich alleine betrachtet, die beiden Beeinflussungsformen werden nicht in Szenarien gemischt untersucht. Für das System Fahrstreifenwechselhilfe wird nur das unterstützte Fahren untersucht. Eine echte Kontrolle lateraler Bewegungen durch automatische Systeme ist z. Zt. aus technischen, rechtlichen und versicherungstechnischen Gründen nicht realisierbar.

7.1.4 Verteilung der Fahrer auf Klassen der Verhaltensadaptation

Im Falle des unterstützten Fahrens sind wie bereits diskutiert aus Mangel an

empirischem Wissen verschiedene Verteilungen der Fahrer auf die definierten Klassen der Verhaltensadaptation zu simulieren. Auch hier werden zunächst wieder die beiden Extrem-Fälle betrachtet: alle Fahrer reagieren voll, bzw. alle Fahrer reagieren gar nicht. Außerdem werden noch 3 dazwischenliegende Fälle betrachtet: eine Gleichverteilung über alle vier Klassen (jede mit 25%), eine Aufteilung mit 50% voller Reaktion und 50% keiner Reaktion und schließlich eine mit 80% voller Reaktion 10% partieller Reaktion und 10% keiner Reaktion.

Die Tabelle 7-1 gibt einen Überblick über die diskutierten Szenarien. Insgesamt wurden 93 Szenarien simuliert. Jedem dieser Szenarien waren 4 Simulationsläufe zugeordnet mit jeweils 2 Stunden Simulationszeit, bzw. mit jeweils 4 Stunden bei den Eckszenarien.

7.2 Auswahl möglicher Auswertemethoden zur Analyse der Simulationsläufe

In der Simulation sind alle üblichen Meßverfahren möglich, so wie sie zum Beispiel einleitend in Kapitel 4 vorgestellt wurden. Ein Vorteil der Simulation ist aber gerade, daß hier auch solche Messungen einfach durchgeführt werden können, die in der Realität entweder gar nicht möglich oder sehr aufwendig sind.

Bei der Auswahl geeigneter Meßverfahren und darauf aufbauender Auswertemethoden ist nun, wie in Kapitel 5 diskutiert, zum einen zu beachten, daß die analysierten Ausgabegrößen auf einem höheren Abstraktionsniveau liegen als die die Grundstruktur des Modells bildenden Größen. Zum anderen sind jedoch die besonderen Möglichkeiten zu nutzen, die zur Auswertung von Verkehrszuständen innerhalb der Simulation zur Verfügung stehen.

Die Analyse der Simulationsläufe sollte daher auf ortsfesten Meßverfahren aufbauen. Mit bewegten Meßverfahren würde die Analyse zu nahe am Modellkern liegen. Es würden ähnliche Daten analysiert, wie diejenigen, die bei der Kalibrierung ins Modell eingegangen sind. In der Realität übliche ortsfeste Meßverfahren sind Aufnahmen zu festen Zeitpunkten über einem längeren Wegintervall, sog. momentane Messungen, und häufiger noch Verkehrserfassung an festen Querschnitten über einem längeren Zeitintervall, sog. lokale Messungen. Mit beiden Verfahren gelingt die Schätzung des Verkehrszustands nur in den zufällig gewählten Ausschnitten, bei ersterem in dem sehr begrenzten Zeitintervall, bei letzterem in dem sehr kurzen Streckenabschnitt. So kann es passieren, daß Unregelmäßigkeiten im Verkehrsfluß bis hin zu kleineren Verkehrszusammenbrüchen mit Stillstand einiger Fahrzeuge nicht erfaßt werden, da diese außerhalb des Beobachtungsausschnitts stattfinden. Eine bessere Schätzung des Verkehrszustands ist mit einer größeren Ausdehnung sowohl der räumlichen als auch der zeitlichen Länge des Beobachtungsbereichs zu erreichen. Dies führt zum allgemeinen Fall der ortsfesten Messung, dem räumlich-zeitlichen Meßverfahren, wobei bei der Auswertung von simuliertem Verkehr im Gegensatz zur realen Verkehrserfassung nicht nur Informationen über die Ränder des Weg-Zeit-Fensters zur Verfügung stehen, sondern ebenfalls der Fahrtverlauf aller Fahrzeuge innerhalb

Szenario	Eingebaute Systeme	Ausrüstungsgrad	Form der Beeinflussung	Reaktionsverhalten
0	keines	0%	keine	-
1 - 5	Abstandswarnung	10%	unterstützt	jeweils (100%, 0%, 0%, 0%) (80%, 10%, 0%, 10%) (25%, 25%, 25%, 25%) (50%, 0%, 0%, 50%) (0%, 0%, 0%, 100%)
6 - 10		20%		
11 - 15		50%		
16 - 20		100%		
21	Abstandswarnung	10%	kontrolliert	-
22		20%		-
23		50%		-
24		100%		-
25 - 29	Geschwindigkeitskontrolle	10%	unterstützt	jeweils (100%, 0%, 0%, 0%) (80%, 10%, 0%, 10%) (25%, 25%, 25%, 25%) (50%, 0%, 0%, 50%) (0%, 0%, 0%, 100%)
30 - 34		20%		
35 - 39		50%		
40 - 44		100%		
45	Geschwindigkeitskontrolle	10%	kontrolliert	-
46		20%		-
47		50%		-
48		100%		-
49 - 53	Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle	10%	unterstützt	jeweils (100%, 0%, 0%, 0%) (80%, 10%, 0%, 10%) (25%, 25%, 25%, 25%) (50%, 0%, 0%, 50%) (0%, 0%, 0%, 100%)
54 - 58		20%		
59 - 63		50%		
64 - 68		100%		
69	Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle	10%	kontrolliert	-
70		20%		-
71		50%		-
72		100%		-
73 - 77	Fahrstreifenwechsellhilfe	10%	unterstützt	jeweils (100%, 0%, 0%, 0%) (80%, 10%, 0%, 10%) (25%, 25%, 25%, 25%) (50%, 0%, 0%, 50%) (0%, 0%, 0%, 100%)
78 - 82		20%		
83 - 87		50%		
88 - 92		100%		

Tabelle 7-1: Simulationsszenarien

des Beobachtungsfensters.

Im folgenden wird nun diskutiert, welche räumlich-zeitlichen Größen zur Analyse

der Simulationsläufe verwendet werden. Anschließend wird beschrieben, in welcher Form diese interessierenden Größen korrekt aus den Modellausgaben errechnet werden können. Hauptuntersuchungsziel ist der Einfluß der Beeinflussungssysteme auf die Leistungsfähigkeit der Straßen und auf die Sicherheit des Verkehrsflusses. Verkehrszustände können vollständig durch die drei grundlegenden makroskopischen Verkehrskenngrößen beschrieben werden: die Verkehrsstärke Q als Anzahl Fahrzeuge bezogen auf ein Zeitintervall, die Verkehrsdichte K als Anzahl Fahrzeuge bezogen auf ein Wegintervall und die mittlere Geschwindigkeit V in einem Weg-Zeit-Ausschnitt. Hiermit kann der Verkehrsfluß insgesamt bewertet werden. Es können Unregelmäßigkeiten und Stauerscheinungen erkannt werden.

Außerdem kann die Leistungsfähigkeit aus den gemessenen Werten der Verkehrsstärke ermittelt werden. HEIDEMANN (1989) schlägt ein Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit aus an Langzeitzählstellen gemessenen Verkehrsstärken vor: er definiert die Leistungsfähigkeit als maximale stündliche Verkehrsstärke, die im stochastischen Mittel realisiert werden kann, und verwendet dazu den Mittelwert aus Messungen an verschiedenen Streckenabschnitten ähnlichen Typs. In PERSAUD, HURDLE (1991) wird diskutiert, ob gemessene maximale Werte der Verkehrsstärke, Perzentile oder Mittelwerte verwendet werden sollen, um die Kapazität eines Streckenabschnitts zu bestimmen. Sie schlagen vor, diese als die mittlere Abfluß-Verkehrsstärke aus einer Warteschlange zu definieren, wie sie z.B. an Engpässen entsteht. Sie beschreiben zwar den Einfluß des Betrachtungsintervalls auf die daraus ermittelte Kapazität, geben aber keine Empfehlung über eine zu verwendende Intervalllänge ab. Im Highway Capacity Manual (HCM, 1985) wird die Kapazität als maximale auf eine Stunde bezogene Verkehrsstärke definiert, wobei als Bemessungsintervall 15 Minuten empfohlen werden. Den Einfluß der Intervalllänge auf die beobachtete Leistungsfähigkeit beschreibt auch LEUTZBACH (1993). KELLER, SACHSE (1992) schlagen im Regelfall Intervalllängen von 15 Minuten vor und geben Formeln für die Umrechnung auf Stundenwerte an.

Neben dem Mittelwert der Geschwindigkeit kann auch die Verteilung der Reisegeschwindigkeiten aller Fahrzeuge im betrachteten Weg-Zeit-Ausschnitt von Interesse sein, um eine Vorstellung über die Streuung der Geschwindigkeiten zu erhalten. Diese Streuung kann als ein Maß zur Schätzung der Veränderungen der Verkehrssicherheit verwendet werden. Wichtige Kenngrößen zur Beurteilung von Geschwindigkeitsverteilungen sind neben Mittelwert und Streuung noch verschiedene Perzentile: 15%, 50% und 85%-Perzentile (LEUTZBACH, 1993).

Die im Ausschnitt beobachteten Beschleunigungswerte aller Fahrzeuge geben Aufschluß über die Regelmäßigkeit des Verkehrsflusses, über den Fahrkomfort für die Fahrzeuginsassen und sie können ebenfalls zur Schätzung von Veränderungen der Sicherheit genutzt werden: Geringere Häufigkeiten heftiger Verzögerungen bedeuten weniger Gefahrsituationen. Auch die Verteilung der Zeitlücken kann zur Analyse der Verkehrssicherheit genutzt werden, z.B. durch Untersuchung der Anzahl Zeitlücken, die geringer als vorzuziehende kritische Schwellenwerte sind.

Zur Untersuchung der Veränderungen durch das Beeinflussungssystem Fahr-

streifenwechselhilfe werden fahstreifenbezogene Kenngrößen benötigt. Dies sind neben der Anzahl stattgefundener Fahstreifenwechsel die Fahstreifenaufteilung sowie die Geschwindigkeitsniveaus auf den einzelnen Fahstreifen.

Zusammenfassend müssen folgende Größen ermittelt werden, deren Berechnung im einzelnen noch beschrieben wird:

1. Makroskopische Größen der Gesamtfahrbahn:
 - Verkehrsstärke
 - Verkehrsdichte
 - mittlere Geschwindigkeit
2. Makroskopische Größen der einzelnen Fahstreifen:
 - Fahstreifenaufteilung
 - mittlere Geschwindigkeiten der Fahstreifen
3. Mikroskopische Größen:
 - Verteilung der Reisegeschwindigkeiten
 - Verteilung der Beschleunigungswerte
 - Verteilung der Zeitlücken
 - Anzahl Fahstreifenwechsel

7.2.1 Ermittlung der makroskopischen Verkehrskenngrößen der Fahrbahn

Die makroskopischen Kenngrößen zur Beschreibung von Verkehrszuständen in einem Weg-Zeit-Ausschnitt, Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit, müssen nach EDIE (1963) und COERS (1970) mittels der in (4-1) angegebenen Formeln berechnet werden, wobei die von allen Fahrzeugen im betrachteten Weg-Zeit-Fenster zurückgelegten Wege x_i sowie die dafür benötigten Zeiten t_i bekannt sein müssen. Nur hiermit kann eine korrekte Schätzung aller Verkehrszustände erreicht werden, und zwar sowohl bei großer als auch bei geringer räumlicher bzw. zeitlicher Ausdehnung des Beobachtungs-Fensters.

Grundlage für die Ermittlung der räumlich-zeitlichen Verkehrskenngrößen innerhalb der Simulationsläufe bildet eine Ergebnisdatei, in der in Sekundenschritten alle Fahrzeuge mit ihren Bewegungsgrößen erfaßt werden. Die Datei enthält für jedes Fahrzeug die eindeutige Fahrzeugkennung, die Position des Fahrzeugs auf der Strecke, den Fahstreifen, auf dem sich das Fahrzeug befindet, die aktuelle Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Fahrzeugs in Fahrtrichtung. Hieraus können die zurückgelegten Wege und die dafür benötigten Zeiten für jedes einzelne Fahrzeug, sowie die Summen für alle Fahrzeuge, durch Aufsummieren ermittelt werden.

Probleme ergeben sich nur an den Rändern, wobei vier Fälle zu unterscheiden sind:

- (1) Fahrzeuge, die zu Beginn des Beobachtungs-Zeitintervalls schon auf dem beobachteten Streckenabschnitt sind (diese fahren in Abbildung 4-1 von unten in das räumlich-zeitliche Beobachtungsfenster),
- (2) Fahrzeuge, die am Ende des Beobachtungs-Zeitintervalls noch auf dem

- Streckenabschnitt sind (diese verlassen das Fenster nach oben),
- (3) Fahrzeuge, die zwischen Beobachtungsbeginn und -ende in den Streckenabschnitt einfahren (in der Abbildung von links), und
 - (4) Fahrzeuge, die im Beobachtungs-Zeitintervall den Streckenabschnitt verlassen (in der Abbildung nach rechts).

Die Behandlung der Fälle (1) und (2) kann dadurch vereinfacht werden, daß Beginn und Ende des Zeitausschnitts jeweils auf ganzzahlige Sekundenwerte gelegt werden. Dann ist keine zusätzliche Berechnung nötig. Diese Forderung stellt keine Einschränkung möglicher Auswertungen der Verkehrsabläufe dar.

Die anderen beiden Fälle können nicht vereinfacht werden, da nicht gefordert werden kann, daß alle Fahrzeuge zu vollen Sekundenwerten in den beobachteten Streckenabschnitt hinein- bzw. aus diesem herausfahren sollen. Die exakten Einfahr- bzw. Ausfahrzeitpunkte müssen aus den bekannten Werten errechnet werden. Bekannt sind Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs zum Zeitpunkt t nach Überfahren des Querschnitts ebenso wie zum Zeitpunkt $t-1$ vor Überfahren des Querschnitts, wobei mit Querschnitt entweder der Beginn oder das Ende des beobachteten Streckenabschnitts bezeichnet sind. Da im Simulationsmodell mit einem niedrigeren Zeitschritt als dem Sekundenschritt der Ergebnisdatei gearbeitet wird, kann nicht von konstanter Beschleunigung des Fahrzeugs innerhalb des 1-Sekundenintervalls $t-1$ bis t ausgegangen werden. Das exakte Beschleunigungsprofil kann aus der Datei allerdings nicht ermittelt werden, dadurch ist der Überfahrungszeitpunkt nicht kinematisch exakt bestimmbar. Eine Schätzung des Zeitpunkts mittels linearer Interpolation zwischen den beiden bekannten Fahrzeugpositionen scheint zu einfach, insbesondere wenn das Fahrzeug positiv oder negativ beschleunigt. Dies wird besonders kritisch bei Staubildung und Stauauflösung, also gerade bei den interessierenden Veränderungen im Verkehrszustand. Der Fehler durch diese Schätzung wird umso größer, je kleiner die Gesamtsumme der Durchfahrungszeiten ist, also je kürzer die Beobachtungsstrecke gewählt wird. Eine bessere Schätzung kann durch lineare Interpolation der ebenfalls bekannten Geschwindigkeitswerte zu den Zeitpunkten $t-1$ und t erreicht werden. Dadurch wird der exakte Fahrtverlauf zwar ebenfalls nur angenähert, die Abweichung ist nun aber nur noch sehr gering. Diese Schätzung entspricht der nur noch wenig von der Realität abweichenden Annahme konstanter Beschleunigung innerhalb des 1-Sekundenintervalls $t-1$ bis t .

7.2.2 Ermittlung der makroskopischen Verkehrskenngrößen der einzelnen Fahrstreifen

Die benötigten Größen werden in ähnlicher Weise ermittelt wie die allgemeinen Kenngrößen der Fahrbahn. Dies betrifft insbesondere die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit. Dazu werden die Werte x_i und t_i für die einzelnen Fahrstreifen getrennt aufsummiert. Hieraus errechnet sich wiederum nach EDIE und COERS die mittlere Geschwindigkeit auf den Fahrstreifen.

Die Aufteilung der Fahrzeuge auf die Fahrstreifen wird in der Literatur üblicherweise

querschnittsbezogen betrachtet. Wie die anderen bisher betrachteten Größen soll die Fahrstreifenaufteilung hier jedoch ebenfalls in einem längeren Weg- und Zeitintervall ermittelt werden. Da in der Literatur noch keine derartigen räumlich-zeitlichen Größen genannt sind, werden an dieser Stelle zwei neue Kenngrößen definiert:

- der Verkehrsstärke-Anteil $AQ(j)$ und
- der Verkehrsdichte-Anteil $AK(j)$ des Fahrstreifen j .

$AQ(j)$ ist definiert als Anteil des Fahrstreifens j an der Verkehrsstärke der Fahrbahn, entsprechend $AK(j)$ als Anteil der Verkehrsdichte. Unter Verwendung der Definitionen von EDIE und COERS werden diese Kenngrößen wie folgt berechnet:

$$AQ(j) = \frac{Q(j)}{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i(j)}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad AK(j) = \frac{K(j)}{K} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i(j)}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

$AQ(j)$ ist damit der Quotient aus der Summe der auf dem Fahrstreifen i zurückgelegten Wege und der Summe der auf der ganzen Fahrbahn zurückgelegten Wege, $AK(j)$ der entsprechende Quotient der dafür benötigten Zeiten. In WIEDEMANN, QUEREJETA (1989) wird eine Kenngröße "Fahrstreifenbenutzung" verwendet, die dem $AK(j)$ entspricht. Es wird allerdings nichts über die exakte Ermittlung der t_i ausgesagt.

7.2.3 Ermittlung der mikroskopischen Größen

Die Verteilung der Reisegeschwindigkeiten der Fahrzeuge im Beobachtungsausschnitt wird durch fahrzeuggetrenntes Aufsummieren der zurückgelegten Wege und der dafür benötigten Zeiten ermittelt.

Die Verteilung der Beschleunigungswerte ebenso wie die der Zeitlücken kann nur im 1-Sekunden-Raster aus der Ausgabe-Datei ermittelt werden. Es werden jeweils die zur vollen Sekunde abgespeicherten Werte der Beschleunigung sowie die zu diesen Zeitpunkten bestehenden Zeitlücken zu vorausfahrenden Fahrzeugen in die Verteilungen aufgenommen. Dadurch können zwar nicht die ganzen Fahrprofile berücksichtigt werden, sondern nur die momentanen Werte zu den diskreten Zeitpunkten. Die Verteilungen können aber dazu verwendet werden, verschiedene Simulationsläufe miteinander zu vergleichen.

Die Fahrstreifenwechsel werden vom Simulationssystem in einer gesonderten Ausgabedatei protokolliert, die neben dem Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels verschiedene charakteristische Parameter enthält, wie Abstände und Geschwindigkeitsdifferenzen zu umgebenden Fahrzeugen. Dies erlaubt eine Analyse der Anzahl Fahrstreifenwechsel ebenso wie der Umstände, unter denen diese stattfanden.

7.3 Auswertung und Analyse der Simulationsergebnisse

Im folgenden werden nun die Ergebnisse der 372 Simulationsläufe vorgestellt und bewertet. Bei der Darstellung und Analyse der diskutierten interessierenden Auswertegrößen wird vor allem die Veränderung dieser Größen in Abhängigkeit vom Ausrüstungsgrad der Fahrzeuge mit den verschiedenen Systemen der Fahrbeeinflussung hervorgehoben. Die Ergebnisse werden getrennt nach den eingesetzten Fahrbeeinflussungssystemen betrachtet: Abstandswarnung, Geschwindigkeitskontrolle, Kombination aus diesen beiden Systemen, sowie Fahrstreifenwechselhilfe. Außerdem wird nach der Form der Beeinflussung unterschieden: kontrollierend oder unterstützend. Bei den Systemen der longitudinalen Beeinflussung werden jeweils die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit, die Geschwindigkeit, die Sicherheit und den Fahrkomfort untersucht, beim System der lateralen Beeinflussung werden fahrstreifenbezogene Veränderungen analysiert.

Häufig werden die Ergebnisse nach Zuflußbelastungen unterschieden: niedrige Belastungen sind Zuflußverkehrsstärken um 2000 Fahrzeuge pro Stunde, mit mittleren Belastungen werden Werte um 3000 Fz/h bezeichnet, hohe Belastungen schließlich sind Belastungen mit über 3000 Fz/h, je nach Durchlaßfähigkeit bis zu 3500 oder 4000 Fz/h.

7.3.1 Das System Abstandswarnung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, beeinflusst das modellierte System Abstandswarnung das Abstandsverhalten, indem es einen sicheren Abstand vorschreibt oder empfiehlt, und indem es eine notwendige Verzögerung errechnet, die beim automatischen Fahren direkt zur Auswahl der Fahrprozedur verwendet wird und die beim unterstützten Fahren zu Warnungen an den Fahrer führt. Wesentlich für die Effekte, die die Einführung des Systems auf den Verkehrsfluß hat, ist die Grundeinstellung der Parameter, die die Systemfunktion beschreiben. Dies sind für den Sicherheitsabstand die Zeitlücke τ , für die notwendige Verzögerung die Schwellenwerte, ab denen im kontrollierten Fahren eine andere Fahrprozedur gewählt wird, bzw. ab denen im unterstützten Fahren eine Warnung ausgelöst wird. Für die Zeitlücke gibt es, wie in Kapitel 2 diskutiert, verschiedene Vorstellungen, die Rechtsprechung schreibt allerdings eine Mindestzeitlücke von 1,5s vor. Ein System der automatischen Regelung der Fahrzeugbewegungen bzw. der Unterstützung des Fahrers sollte diese Zeitlücke nicht unterschreiten. Die Simulationen wurden daher i.w. mit einer Zeitlücke von 1,5s durchgeführt. Als Schwellenwert notwendiger Verzögerung wurden verschiedene Anteile der maximal möglichen Verzögerung gewählt: im kontrollierten Fall wird bei Überschreiten von 10%, 30%, 40% und 60% der maximal möglichen Verzögerung in Prozeduren mit stärker werdenden Verzögerungen verzweigt, im unterstützten Fall wird bei Überschreiten von 30% eine Warnung gegeben, die erst bei Unterschreiten von 20% wieder zurückgenommen wird.

Insbesondere die Einstellung einer Zeitlücke von 1,5s hat Einfluß auf die Ver-

änderungen im Verkehrsfluß. Deutlich wird dies in der Diskussion der Leistungsfähigkeit.

Leistungsfähigkeit und Verkehrszustände

Neben der reinen Betrachtung der Leistungsfähigkeit ist es von Bedeutung zu analysieren, welche Verkehrszustände sich bei den unterschiedlichen Zuflußbelastungen auf der simulierten Strecke einstellen, ob es zu Verkehrszusammenbrüchen bis hin zum Stau kommt oder ob der Verkehr fließend bleibt. Dazu wurde der Verkehr auf einer Beobachtungsstrecke von 1/2 km untersucht. Wie oben beschrieben, wurden die makroskopischen Verkehrskenngößen nach EDIE und COERS berechnet und zu 1-Minuten-Intervallen aggregiert. Diese 1-Minuten-Intervall-Daten sind in Fundamentaldiagrammen in den Abbildungen 7-1 bis 7-4 dargestellt. Die zeitliche Länge von einer Minute wurde gewählt, da bei größeren Intervalllängen Verkehrszustandswechsel nicht mehr deutlich genug erkennbar sind. Die Diagramme in den Abb. 7-1 und 7-2 verdeutlichen die Veränderungen durch zunehmenden Ausrüstungsgrad der Fahrzeuge beim kontrollierten Fahren, die Diagramme in den Abb. 7-3 und 7-4 diejenigen beim unterstützten Fahren. In den Abbildungen 7-1 und 7-2 repräsentiert jedes Diagramm die Verkehrszustände aller Simulationsläufe eines Szenarios (jeweils 8 bzw. 16 Stunden Simulationszeit), in den Abbildungen 7-3 und 7-4 repräsentiert jedes Diagramm hingegen 5 Szenarien, und zwar die verschiedenen Adaptationsverhalten der Fahrer auf Warnungen des Beeinflussungssystems. Hier werden in den Fundamentaldiagrammen jeweils die umhüllenden Bereiche dargestellt, die die Verkehrszustände aller 5 Szenarien enthalten.

Deutlich sind die Veränderungen beim kontrollierten Fahren. Im ersten Diagramm, das den Ausrüstungsgrad 0% darstellt, ist der Bereich des freien Verkehrs stark ausgeprägt, allerdings kann ein nicht unerheblicher Anteil der 1-Minuten-Intervalle im Bereich des teilgebundenen und gebundenen Verkehrs erkannt werden. Da die Punkte den Zustand auf einem halben Kilometer simulierter Strecke repräsentieren, ist davon auszugehen, daß hier Störungen im Verkehrsfluß stattgefunden haben, die bis zum Stillstand von Fahrzeugen führten. Dies hat sich bei der mikroskopischen Betrachtung der Zeit-Weg-Linien bestätigt. Die Anzahl der 1-Minuten-Intervalle im Bereich des gebundenen Verkehrs nimmt mit Zunahme des Ausrüstungsgrades kontinuierlich ab. Schon bei einem Ausrüstungsgrad von 50% können Stauzustände praktisch vermieden werden. Das 100%-Szenario unterscheidet sich von letzterem nur noch dadurch, daß die maximal erreichten Verkehrsstärken geringer sind. Dies deutet schon an, daß die Leistungsfähigkeit bei voller Ausrüstung abnimmt. Das letzte Diagramm des kontrollierten Fahrens repräsentiert ein zusätzliches Szenario. Simuliert wurde hier dieselbe Situation wie im Diagramm darüber, d.h. 100% ausgerüstete Fahrzeuge bei kontrollierender Beeinflussung, allerdings wurde hier die im sicheren Abstand eingestellte Zeitlücke τ auf 1s heruntermgesetzt. Dies führt dazu, daß deutlich höhere Werte der Verkehrsstärke erreicht werden konnten.

Nicht ganz so deutlich sind die Veränderungen beim unterstützten Fahren. Auch hier nimmt zwar die Anzahl 1-Minuten-Intervalle im gebundenen Verkehrszustand mit

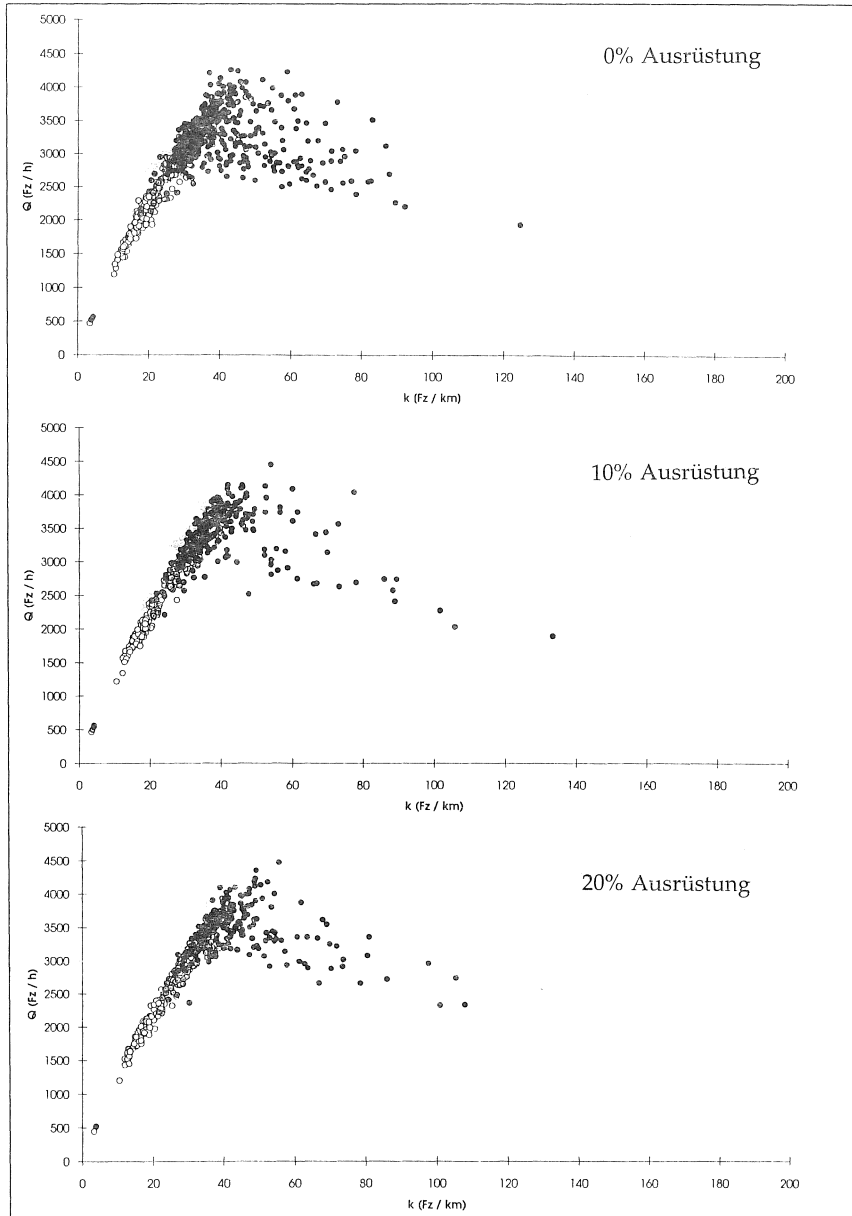


Abb. 7-1: Fundamentaldiagramme, Fahren mit kontrollierendem Einfluß, Teil I

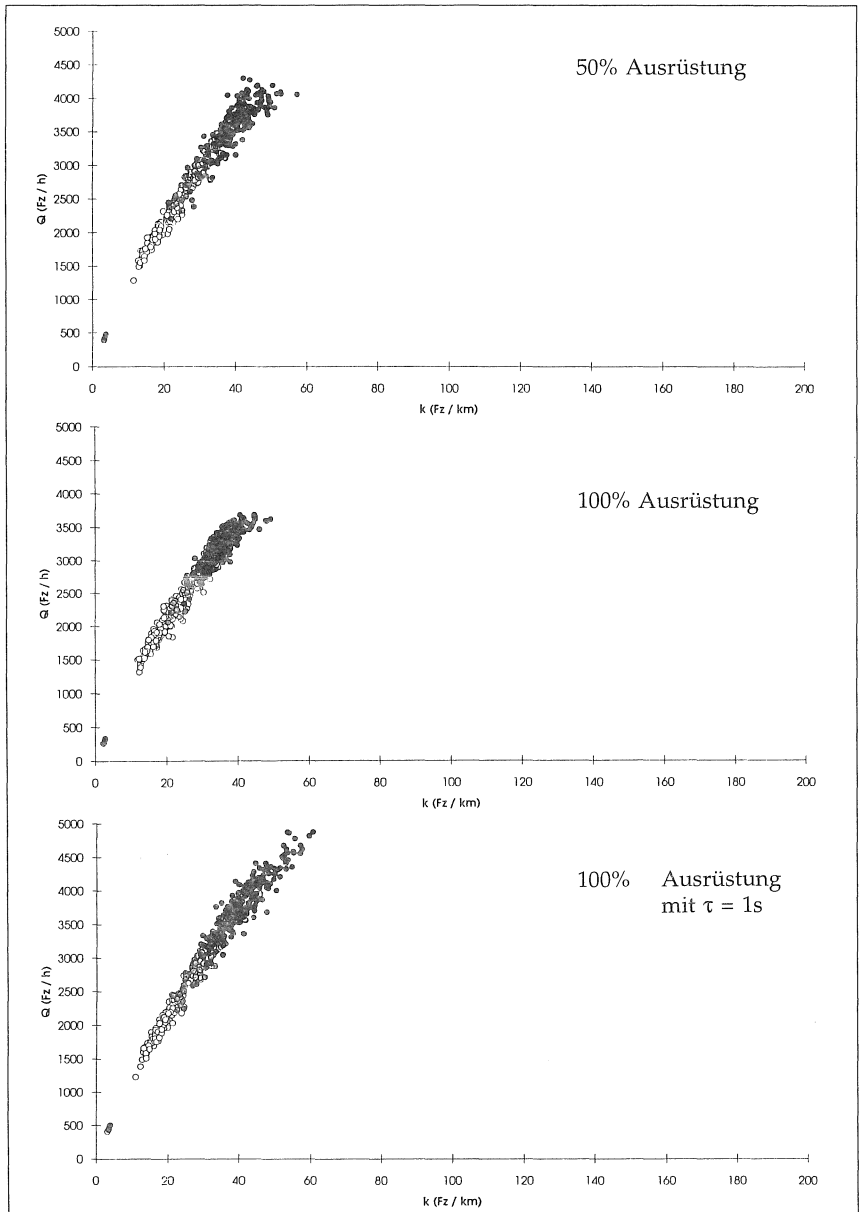


Abb. 7-2: Fundamentaldiagramme, Fahren mit kontrollierendem Einfluß, Teil II

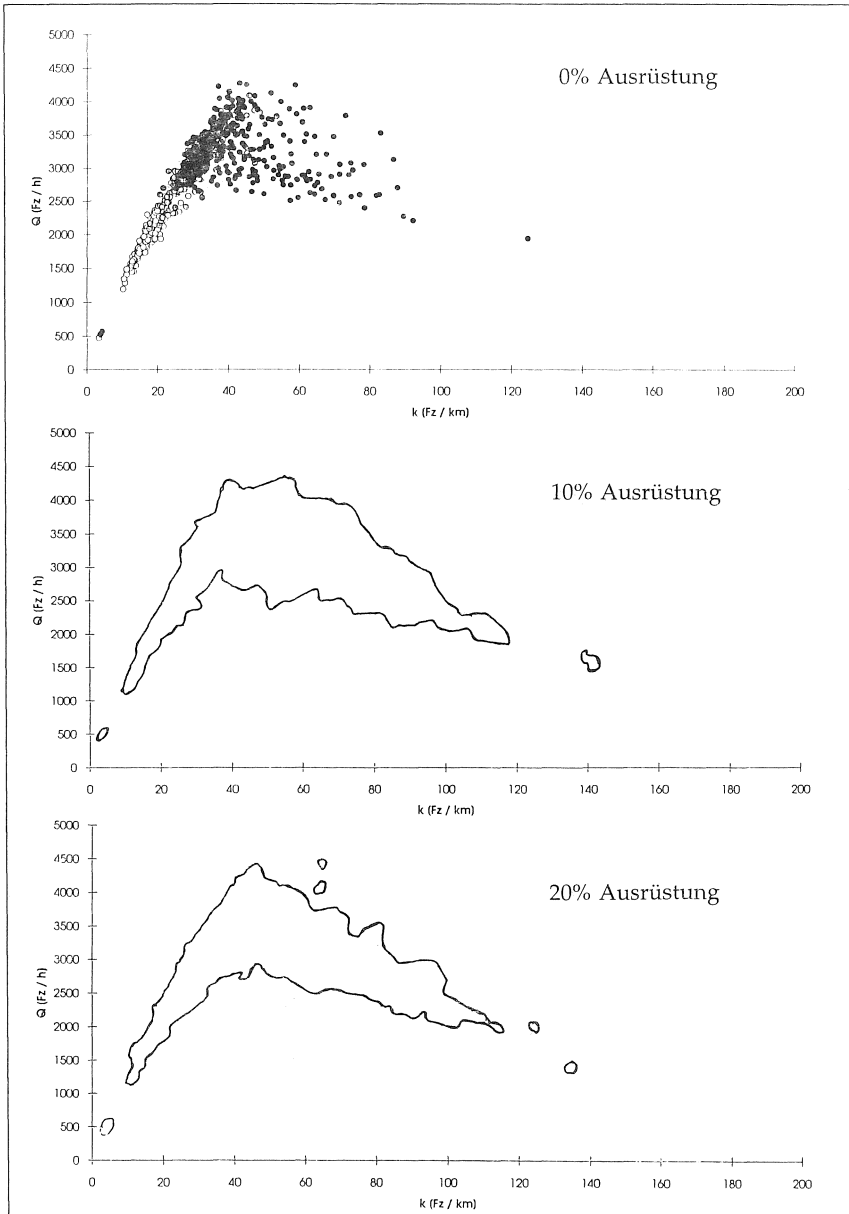


Abb. 7-3: Fundamentaldiagramme, Fahren mit unterstützendem Einfluß, Teil I

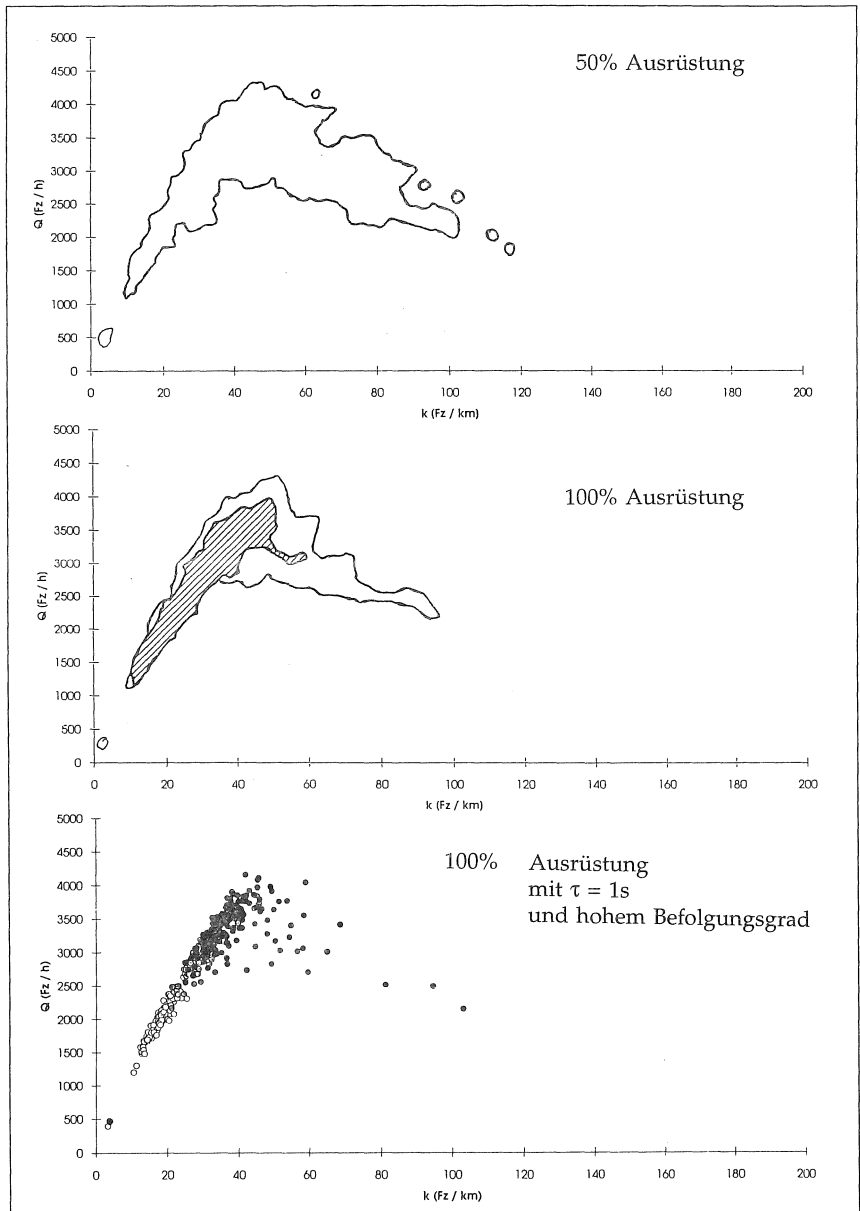


Abb. 7-4: Fundamentaldiagramme, Fahren mit unterstützendem Einfluß, Teil II

zunehmendem Ausrüstungsgrad ab, allerdings sehr viel weniger als beim kontrollierten Fahren. Selbst bei voller Ausrüstung können Zustände gebundenen Verkehrs nicht ganz vermieden werden. Im Diagramm der vollen Ausrüstung ist der Bereich des Szenarios, das den höchsten Befolgungsgrad der Fahrer repräsentiert (Szenario 16), getrennt als schraffierter Bereich dargestellt. Daraus wird erkennbar, daß auch im Falle des unterstützten Fahrens bei 100% Ausrüstung und gutem Befolgungsgrad der Fahrer Stauzustände weitgehend vermieden werden können. Das letzte Diagramm zeigt wiederum dieselbe Situation wie im darüberliegenden Diagramm mit auf 1s reduzierter Zeitlücke τ für die Bestimmung des Sicherheitsabstands. Allerdings ist hier nur das Szenario mit höchstem Befolgungsgrad dargestellt. Die niedrigere Zeitlücke bewirkt hier eine geringfügige Erhöhung der maximalen Verkehrsstärke gegenüber Szenario 16, hat allerdings auch zur Folge, daß die Anzahl Intervalle im Bereich des gebundenen Verkehrs wieder zunimmt. Es scheint, daß eine Zeitlücke von 1s bei einem vom Menschen kontrollierten wenn auch durch Warnungen unterstützten Fahrverhalten eher zu Instabilitäten führen kann.

Zur Analyse der Leistungsfähigkeiten wurden ebenfalls die zu 1-Minuten-Intervallen aggregierten Werte verwendet. 15-Minuten- oder gar Stunden-Intervalle zu betrachten würde bei Simulationsdauern von 8 bis 16 Stunden pro Szenario, wovon jeweils nur die Hälfte der Zeit mit hoher Zuflußbelastung simuliert wurde, zu einer zu geringen Anzahl von Werten führen. Die Betrachtung von 1-Minuten-Werten ist legitim, da es sich um räumlich-zeitliche Werte handelt und da die Ergebnisse zum Vergleich verschiedener Simulationsläufe verwendet werden sollen, nicht um exakte absolute Aussagen über die Leistungsfähigkeit zu treffen. Abbildungen 7-5 und 7-6 verdeutlichen die Entwicklung der maximalen Verkehrsstärken in Abhängigkeit vom Ausrüstungsgrad für das kontrollierte bzw. das unterstützte Fahren. Um nicht repräsentative 1-Minuten-Werte herauszufiltern, sind zusätzlich zwei Perzentile angegeben: das 95%- und das 98%-Perzentil. In Abbildung 7-5 sind zusätzlich zu Maximum und Perzentilen die entsprechenden Werte für die Simulationen mit 100% Ausrüstung und Zeitlücke τ auf 1s dargestellt. In Abbildung 7-6 sind für jeden

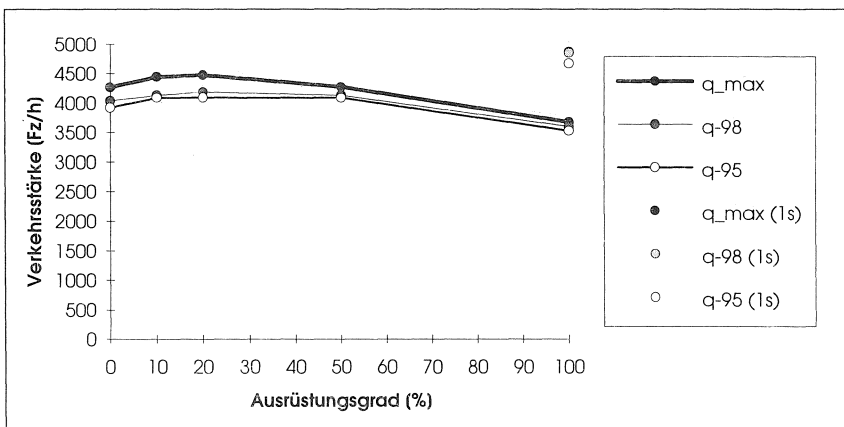


Abb. 7-5: Maximale Verkehrsstärken und Perzentile bei kontrollierendem Einfluß

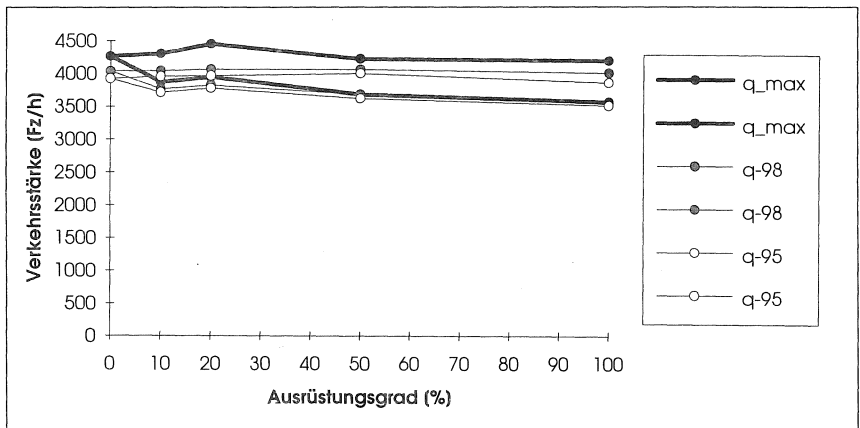


Abb. 7-6: Maximale Verkehrsstärken und Perzentile bei unterstützendem Einfluß

dargestellten Parameter zwei Kurven eingetragen, die jeweils das Maximum bzw. das Minimum des entsprechenden Parameters in den fünf Szenarien mit gleichem Ausrüstungsgrad repräsentieren, die die verschiedenen Adaptationsverhalten der Fahrer nachbilden.

Beim kontrollierten Fahren kann bei zunehmendem Ausrüstungsgrad nach anfänglichem leichten Anwachsen schließlich ein spürbarer Rückgang der Leistungsfähigkeit beobachtet werden. So sinkt z.B. das 98%-Perzentil von 4033,2 auf einen Wert von 3594,2 Fz/h. Dieses Ergebnis läßt sich durchaus mit den Werten von SCHNITTGER (1991) vergleichen (dort 3512,3 Fz/h). Das Absinken der Leistungsfähigkeit resultiert daraus, daß im Unterschied zum unbeeinflussten Fahren die ausgerüsteten Fahrzeuge nur noch Zeitlücken einhalten, die größer als 1,5s sind. Die theoretisch mögliche Grenze von $1/\tau$ kann nicht erreicht werden, da sich durch Fahrstreifenwechsel und unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten z.T. größere Lücken ergeben, nie jedoch Lücken kleiner als 1,5s. Zum Vergleich sind in Abb. 7-5 die Werte für Simulationen mit $\tau=1s$ angegeben. Hier ist eine deutliche Erhöhung der Leistungsfähigkeit bei vollem Ausrüstungsgrad erkennbar (98%-Perz.: 4857,6 Fz/h).

Beim unterstützten Fahren hängt die Leistungsfähigkeit vom Adaptationsverhalten der Fahrer ab: Bei hohem Befolgungsgrad der Fahrer sinkt mit zunehmendem Ausrüstungsgrad auch hier die Leistungsfähigkeit ab (98%-Perzentil auf 3550,64 Fz/h), bei niedrigem Befolgungsgrad bleibt sie in etwa auf dem Niveau des unausgerüsteten Zustands (4022,64 Fz/h). Die Leistungsfähigkeit bei den anderen Szenarien, mit mittleren Befolgungsgraden, liegt jeweils zwischen diesen beiden extremen Ausprägungen. Die Simulation mit $\tau=1s$ für das Szenario mit hohem Befolgungsgrad ergab zwar etwas höhere Werte der Leistungsfähigkeit, allerdings waren diese noch niedriger als diejenigen des ursprünglichen Szenarios mit

niedrigem Befolgungsgrad.

Reisegeschwindigkeit

Der Einfluß des Systems Abstandswarnung auf die Geschwindigkeiten ist bei niedrigen und mittleren Belastungen erwartungsgemäß gering. Untersucht wurde die Verteilung der Reisegeschwindigkeiten im beobachteten Streckenabschnitt von 1/2 Kilometer Länge. Die Mittelwerte bleiben bei den genannten Belastungen weitgehend unverändert. Um die Breite der Verteilung zu analysieren, wurden die Standardabweichung und zwei Perzentil-Werte betrachtet: das 15%- und das 85%-Perzentil. Auch hier ergaben sich keine wesentlichen Veränderungen bei niedrigen und mittleren Belastungen.

Lediglich bei der Simulation mit hohen Zuflußbelastungen konnte ein deutlicher Rückgang der Standardabweichung beobachtet werden: von 24,895 bei Ausrüstungsgrad 0% auf 11,742 im kontrollierten Fahren und auf Werte zwischen 22,327 und 11,791 im unterstützten Fahren jeweils bei voller Ausrüstung. Dies ist allerdings ausschließlich darauf zurückzuführen, daß Stauzustände, wie oben dargestellt, im kontrollierten Fahren ganz, im unterstützten Fahren größtenteils vermieden werden konnten. Die niedrigen Werte der Minimalgeschwindigkeit bei niedrigem Ausrüstungsgrad (18,247 km/h), die aus Verkehrsstörungen resultieren, können daher mit wachsender Anzahl ausgerüsteter Fahrzeuge auf Werte angehoben werden, wie sie auch bei den wenig belasteten Zuständen auftraten: 64,241 km/h bei kontrolliertem Fahren sowie 64,913 km/h im unterstützten Fahren mit hohem Befolgungsgrad. Entsprechend steigt der Wert des 15%-Perzentils leicht an, derjenige des 85%-Perzentils bleibt weitgehend unverändert. Außerdem kann wegen der Vermeidung von Stauzuständen ein leichtes Ansteigen des Mittelwerts der Reisegeschwindigkeit beobachtet werden. Abbildungen 7-7 und 7-8 verdeutlichen die Entwicklung der Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung für kontrolliertes bzw. unterstütztes

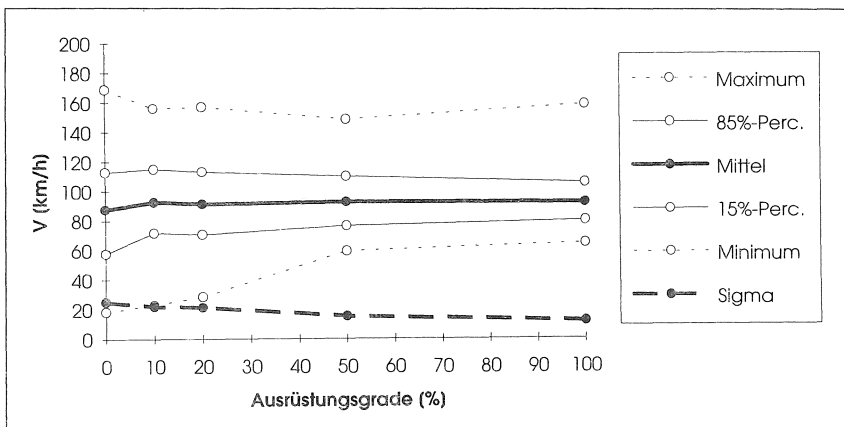


Abb. 7-7: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, kontrolliertes Fahren

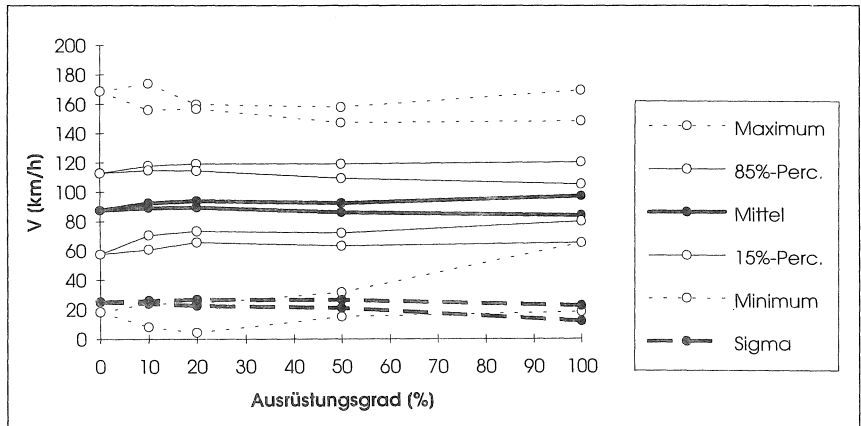


Abb. 7-8: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, unterstütztes Fahren

Fahren bei hoher Zuflußbelastung. In Abbildung 7-8 sind für jeden Parameter wieder zwei Kurven eingetragen, das jeweilige Minimum und Maximum der 5 zugehörigen Szenarien.

Sicherheit

Das System Abstandswarnung hat durch Angabe eines sicheren Abstands und durch frühzeitige Warnung vor langsameren Vorderfahrzeugen einen ganz wesentlichen Einfluß auf die Verkehrssicherheit. Fahrzeuge, deren Bewegungen vom System kontrolliert werden, sowie Fahrzeuge, deren Fahrer die Warnungen eines installierten Systems weitgehend befolgen, werden nur noch in Ausnahmefällen riskante Abstände einhalten.

Um die Verteilung der Zeitlücken einschätzen zu können, wurden wiederum Mittelwert, Standardabweichung, 15%- und 85%-Perzentile der Netto-Zeitlücken bestimmt, sowie zusätzlich die beobachteten Minimal- und Maximalwerte. Zur Ermittlung dieser Kenngrößen wurden die Zeitlücken im beobachteten Streckenabschnitt in 1-Sekunden-Abständen erfaßt.

Die Minimalwerte steigen lediglich für die Fälle 100%iger Ausrüstung bei kontrolliertem bzw. unterstütztem Fahren mit hohem Befolgungsgrad spürbar an. In allen anderen Fällen wird die untere Grenze der Zeitlücken durch nicht ausgerüstete bzw. nicht befolgende Fahrzeuge unverändert niedrig gehalten. Kontinuierlich verändert sich allerdings das 15%-Perzentil: es steigt bei allen Zuflußbelastungen mit zunehmendem Ausrüstungsgrad streng monoton an, von Werten zwischen 0,969s und 1,069s auf Werte zwischen 1,749s und 1,759s im kontrollierten Fahren, und auf

Werte zwischen 1,722s und 1,728s im unterstützten Fahren mit hohem Befolgungsgrad. Bei niedrigem Befolgungsgrad bleibt das 15%-Perzentil auch bei voller Ausrüstung praktisch unverändert (0,988s bis 1,014s).

Durch das Wegfallen der sehr kleinen Zeitlücken entwickelt sich bei niedrigen und mittleren Belastungen auch der Mittelwert der Verteilung leicht nach oben: bei niedrigen Belastungen von 2,886s auf 3,054s im kontrollierten und auf 2,901s bis 3,087s im unterstützten Fahren, bei mittleren Belastungen von 2,127s auf 2,315s bzw. 2,136s bis 2,318s. Bei den hohen Belastungen ist die Verteilung wegen des Auftretens von Stauzuständen nach oben verzerrt. Der Mittelwert ist hier bei 0% Ausrüstung am höchsten und nimmt mit zunehmendem Ausrüstungs- und Befolgungsgrad und daher zurückgehender Anzahl Stauzuständen kontinuierlich ab.

Interessant ist, daß sich mit zunehmendem Ausrüstungsgrad nicht nur im unteren Teil der Zeitlückenverteilung Veränderungen ergeben, sondern daß die Verteilung auch im oberen Teil enger wird. Dadurch, daß es weniger ganz kleine Lücken gibt und der Mittelwert der Verteilung leicht ansteigt, verbleibt bei gleicher Anzahl Fahrzeuge weniger Zeit für große Lücken. Dies macht sich insbesondere bei den Läufen mit mittleren und hohen Zuflußbelastungen bemerkbar: die Maximalwerte und die 85%-Perzentilwerte entwickeln sich deutlich nach unten (z.B. das 85%-Perzentil bei mittleren Belastungen von 3,339s auf 2,747s bei kontrolliertem bzw. auf 2,856s bis 3,346s bei unterstütztem Fahren). Da die Verteilung wie gezeigt oben und unten enger wird, entwickelt sich selbstverständlich auch die Standardabweichung nach unten. Dies kann allerdings nicht als Sicherheitsgewinn bewertet werden.

Die Abbildungen 7-9 und 7-10 zeigen die Entwicklung der Kenngrößen der Zeitlückenverteilung für kontrolliertes bzw. unterstütztes Fahren beispielhaft für die mittleren Zuflußbelastungen.

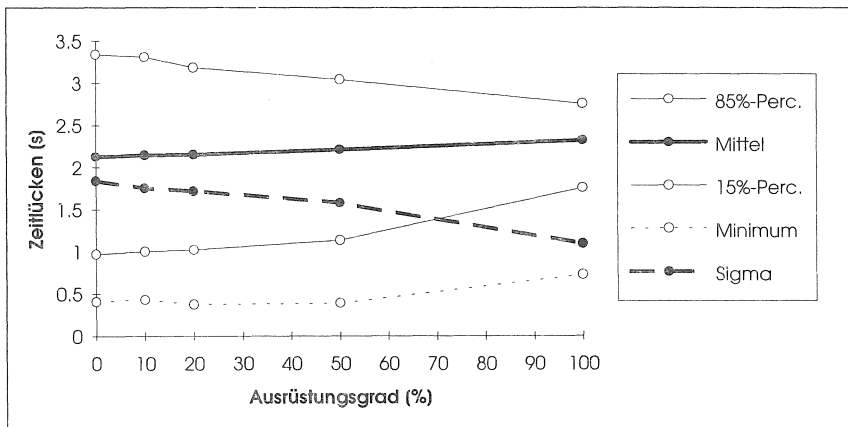


Abb. 7-9: Kenngrößen der Zeitlückenverteilung, kontrolliertes Fahren

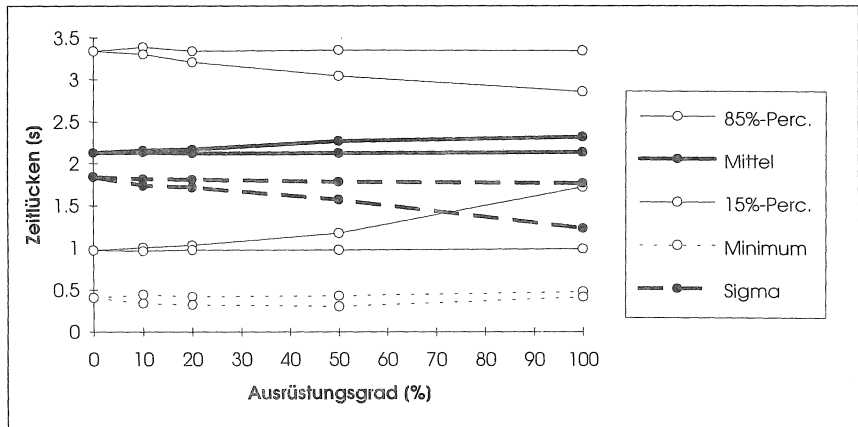


Abb. 7-10: Kenngrößen der Zeitlückenverteilung, unterstütztes Fahren

Auf die Sicherheit der nicht ausgerüsteten Fahrzeuge und der Fahrzeuge, bei denen die Fahrer Warnungen weitgehend ignorieren, kann nicht direkt Einfluß genommen werden. Allerdings kommt diesen Fahrzeugen genauso wie den ausgerüsteten zugute, daß die Anzahl Stauzustände reduziert wird. Das Auftreten von Störungen bis hin zum Stau ist ein nicht unwesentlicher Aspekt bei der Beurteilung der Verkehrssicherheit, sind doch plötzliche Geschwindigkeitswechsel, wie sie am Stauende auftreten, mit erheblichem Unfallrisiko behaftet. Insofern können Situationen als generell sicherer bewertet werden, bei denen es seltener als bei der 0%-Ausrüstung oder gar nicht zum Stau kommt.

Fahrkomfort

Zur Beurteilung der Regelmäßigkeit des Verkehrsflusses und des Fahrkomforts für die Fahrzeuginsassen wurde das Beschleunigungsverhalten der simulierten Fahrzeuge analysiert. Zur Einschätzung der Verteilung der Beschleunigungswerte wurden wiederum Mittelwert, Standardabweichung, 15%- und 85%-Perzentil betrachtet. Die Beschleunigungswerte wurden im beobachteten Streckenabschnitt im 1-Sekunden-Raster erfaßt und für alle Fahrzeuge zusammengefaßt. Dies erlaubt natürlich keine absoluten Aussagen über den Fahrkomfort, da keine Information über die Beschleunigungsprofile der Fahrzeuge vorliegen und damit über Amplitude und Frequenz der Änderungen der Beschleunigungswerte. Allerdings können die Kenngrößen der Verteilung genutzt werden, um verschiedene Simulationsszenarien miteinander zu vergleichen.

Bei niedrigen Zuflußbelastungen konnte mit zunehmendem Ausrüstungsgrad eine Zunahme der Standardabweichung der Beschleunigungswerte beobachtet werden: von $0,414 \text{ m/s}^2$ bei 0% Ausrüstung auf $0,624 \text{ m/s}^2$ bei kontrolliertem Fahren und

Werte zwischen $0,425 \text{ m/s}^2$ und $0,843 \text{ m/s}^2$ bei unterstütztem Fahren. Bei mittleren Belastungen blieb die Standardabweichung annähernd konstant. Bei hohen Zuflußbelastungen hingegen konnte zumindest für das kontrollierte Fahren und für das unterstützte Fahren mit hohem Befolungsgrad ein deutlicher Rückgang der Standardabweichung verzeichnet werden: von $0,994 \text{ m/s}^2$ auf $0,559 \text{ m/s}^2$ bzw Werte zwischen $0,783 \text{ m/s}^2$ und $1,03 \text{ m/s}^2$

Die Perzentile bleiben für das kontrollierte Fahren bei niedrigen und mittleren Belastungen annähernd konstant, bei den hohen Zuflußbelastungen bewegen sie sich jedoch deutlich in Richtung Mittelwert: das 15%-Perzentil von $-0,633 \text{ m/s}^2$ auf $-0,344 \text{ m/s}^2$, das 85%-Perzentil von $0,932 \text{ m/s}^2$ auf $0,306 \text{ m/s}^2$. Im unterstützten Fahren bleiben die Perzentile für niedrige Befolungsgrade durchweg konstant. Bei hohen Befolungsgraden steigen sie mit zunehmendem Ausrüstungsgrad kontinuierlich an, bei niedrigen Belastungen stark, bei hohen Belastungen nur noch wenig.

Abbildungen 7-11 und 7-12 verdeutlichen die Entwicklung der Kenngrößen beispielhaft für kontrolliertes Fahren für niedrige und für hohe Zuflußbelastungen.

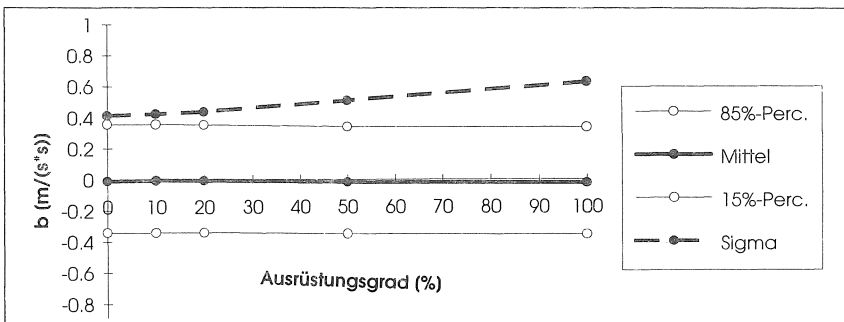


Abb. 7-11: Kenngrößen der Beschleunigungsverteilung, niedrige Belastungen

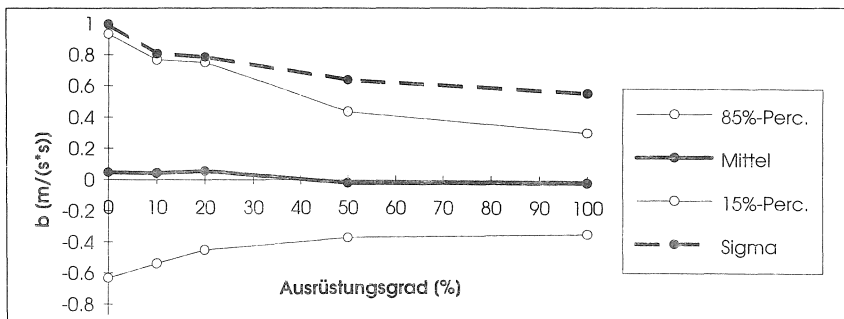


Abb. 7-12: Kenngrößen der Beschleunigungsverteilung, hohe Belastungen

7.3.2 Das System Geschwindigkeitskontrolle

Das System Geschwindigkeitskontrolle beeinflusst ausschließlich die Geschwindigkeit in Längsrichtung und zwar in Hinblick auf eine sichere Geschwindigkeit für Annäherungs- und Folgevorgänge, auf etwaige Tempolimits (für LKW 80 km/h), auf eine sichere Geschwindigkeit zum Aufschliessen zu großer Lücken und auf eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen. Die wesentlichen Veränderungen, die durch die Einführung dieses Systems hervorgerufen werden, ergeben sich demzufolge im Bereich der Geschwindigkeitsverteilung. Dennoch werden ähnlich wie bei der Bewertung der Abstandswarnung auch die anderen Aspekte diskutiert.

Auch hier wird jeweils unterschieden zwischen kontrolliertem und unterstütztem Fahren. Da die Funktion des Systems sich, wie in Kapitel 6 beschrieben, aber auf die Angabe eines optimalen Geschwindigkeitsintervalls beschränkt, besteht die Kontrolle der Bewegungen im kontrollierten Fahren lediglich aus Begrenzung der Geschwindigkeit nach oben und eventuell sogar nach unten (Tempomat-Funktion). Es fehlen hier die regelnden Fahrprozeduren, die es rechtfertigen würden, von echtem automatischem Fahren zu sprechen, wie beim System Abstandswarnung. Sinnvoll wird das System Geschwindigkeitskontrolle im kontrollierten Fahren erst in Kombination mit dem System Abstandswarnung. Insofern sind die Ergebnisse des kontrollierten Fahrens hier häufig identisch mit denjenigen des unterstützten Fahrens bei hohem Befolungsgrad und werden dann nicht explizit dargestellt.

Leistungsfähigkeit und Verkehrszustände

Erwartungsgemäß hat die Geschwindigkeitskontrolle keinen wesentlichen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit. Ebenso bewirkt die Ausrüstung der Fahrzeuge mit diesem System keine merkliche Reduktion der Stauzustände. Die entsprechenden Fundamentaldiagramme, die die Szenarien des Fahrens unter Einfluß der Geschwindigkeitskontrolle bei verschiedenen Ausrüstungsgraden repräsentieren, finden sich im Anhang. Mit zunehmendem Ausrüstungsgrad ist keine Verbesserung der Verkehrszustände zu verzeichnen. Abbildung 7-13 zeigt, daß die Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem System Geschwindigkeitskontrolle praktisch keinen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit der Strecke hat.

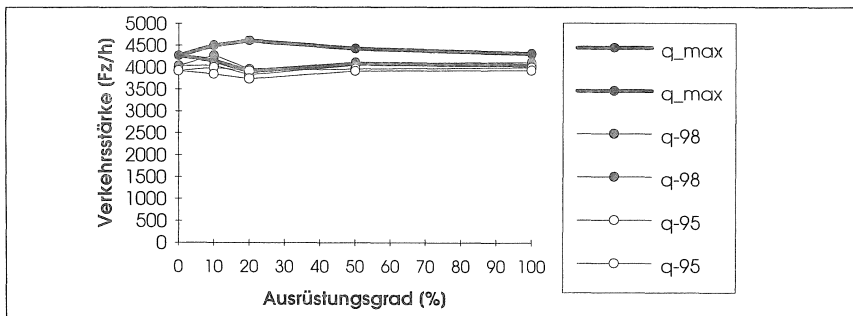


Abb. 7-13: Maximale Verkehrsstärken und Perzentile

Reisegeschwindigkeit

Bei der Analyse der Verteilung der Reisegeschwindigkeiten unter Einfluß der Geschwindigkeitskontrolle können deutliche Veränderungen beobachtet werden.

Der Mittelwert der Verteilung steigt bei allen Zuflußbelastungen bei kontrolliertem Fahren oder bei unterstütztem Fahren mit hohem Befolungsgrad spürbar an, und zwar kontinuierlich mit zunehmendem Ausrüstungsgrad: bei niedrigen Belastungen von 117,4 km/h auf 125,0 km/h, bei mittleren Belastungen von 103,2 km/h auf 112,4 km/h und bei hohen Belastungen von 87,5 km/h auf 100,1 km/h. Bei niedrigerem Befolungsgrad bleibt der Mittelwert praktisch unverändert.

Gleichzeitig wird die Verteilung mit zunehmendem Ausrüstungsgrad enger. Die Werte des 15%-Perzentils steigen in denselben Situationen ebenfalls deutlich an: bei niedrigen Belastungen von 92,4 km/h auf 104,5 km/h, bei mittleren Belastungen von 83,3 km/h auf 94,8 km/h und bei hohen Belastungen von 57,4 km/h auf 81,3 km/h. Dies bedeutet, daß es weniger Fahrzeuge mit niedrigen Geschwindigkeiten gibt. Auf der anderen Seite steigen die Werte des 85%-Perzentils weniger stark an (von 139,3 auf 144,4, von 123,2 auf 129,4 und von 112,9 auf 117,9). Insgesamt führt dies bei allen Zuflußbelastungen zu einem Absinken der Standardabweichung der Geschwindigkeiten: bei niedrigen Belastungen von 21,4 auf 18,2, bei mittleren Belastungen von 18,3 auf 15,2 und bei hohen Belastungen von 24,9 auf 22,2. Der absolute Betrag der Reduktion bei den verschiedenen Belastungen ist vergleichbar. Bei hohen Belastungen bleibt die Standardabweichung allerdings auch bei voller Ausrüstung recht hoch. Das liegt daran, daß, wie schon erwähnt, die Anzahl der Stauzustände nicht merklich reduziert wird, die daraus resultierenden niedrigen Geschwindigkeiten daher nicht vermieden werden können und somit die Breite der Verteilung im Bereich der Geschwindigkeiten unterhalb des Mittelwerts erhalten bleibt.

Die gemessenen Maximalwerte verändern sich nur geringfügig nach unten. Die Minimalwerte können hingegen bei niedrigen und mittleren Belastungen leicht angehoben werden. Bei den hohen Belastungen entstehen die Minimalwerte der Geschwindigkeit durch Stausituationen, die auch mit hohem Ausrüstungsgrad nicht vermieden werden. Die Minimalwerte bleiben hier daher praktisch unverändert.

Abbildungen 7-14 bis 7-16 zeigen den Verlauf der Kenngrößen der Geschwindigkeitsverteilung für die verschiedenen Zuflußbelastungen.

Sicherheit

Die beiden Aspekte der Verkehrssicherheit, die beim System Abstandswarnung diskutiert wurden, kritische Zeitlücken und Anzahl Stauzustände, werden vom System Geschwindigkeitskontrolle nicht direkt beeinflußt. Bei der Verteilung der erfaßten Zeitlücken zeigt sich keine wesentliche Veränderung mit zunehmendem Ausrüstungsgrad. Zwar nimmt der Mittelwert bei niedrigen Zuflußbelastungen leicht zu (von 2,886s auf maximal 3,011s) und die Standardabweichung sinkt leicht ab (von

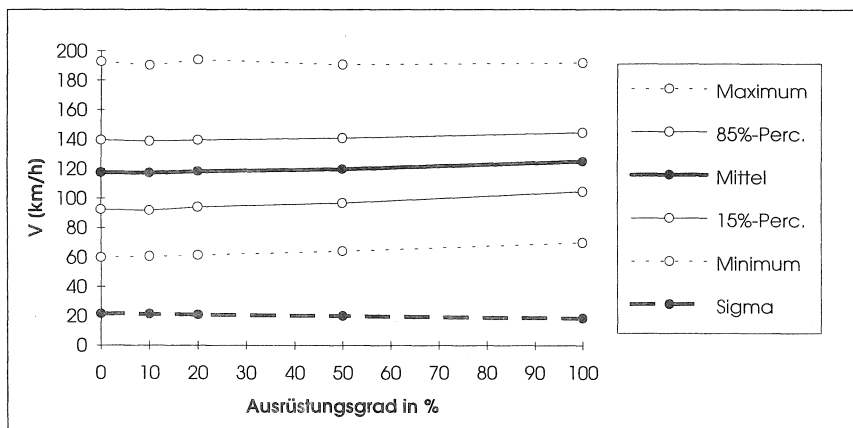


Abb. 7-14: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, niedrige Belastung

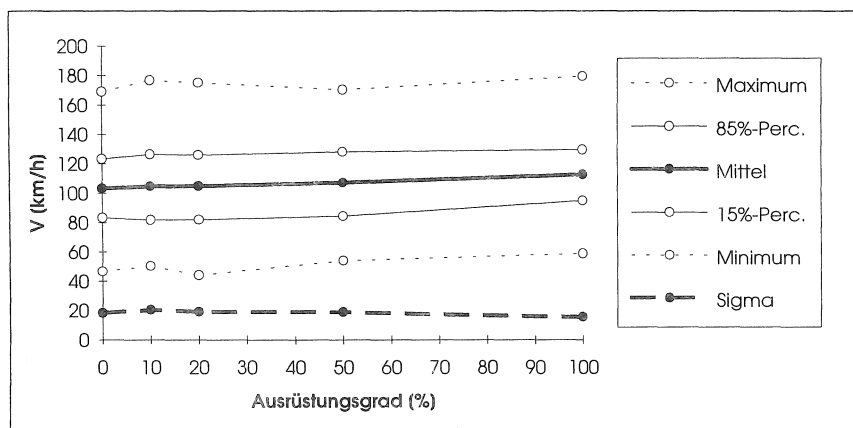


Abb. 7-15: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, mittlere Belastung

2,542s auf 2,32s bei hohem Befolgungsgrad). Allerdings bleiben die Werte bei mittleren und hohen Belastungen annähernd konstant. Die wesentlichen Kenngrößen zur Beurteilung einer Veränderung der Verkehrssicherheit bleiben jedoch bei allen Zuflußbelastungen weitgehend unverändert: die Minimalwerte und die 15%-Perzentile.

Wie bereits diskutiert, kann die Anzahl kritischer Verkehrszustände mit zunehmendem Ausrüstungsgrad kaum reduziert werden. Hier ist daher auch kein Sicherheitsgewinn zu erwarten.

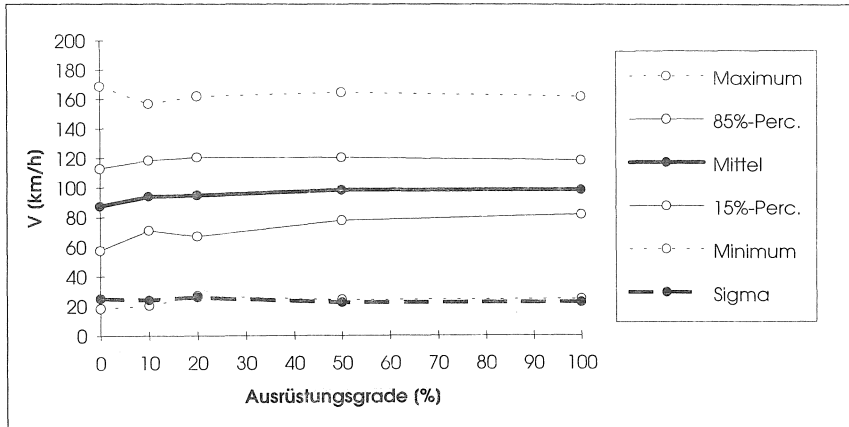


Abb. 7-16: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, hohe Belastung

Lediglich die Abnahme der Streuung der Geschwindigkeiten, insbesondere bei niedrigen und mittleren Zuflußbelastungen, kann als positiv in Hinblick auf die Verkehrssicherheit bewertet werden.

Fahrkomfort

Bei der Analyse der Verteilung der erfaßten Beschleunigungswerte konnte mit zunehmendem Ausrüstungsgrad ein leichter Rückgang der Standardabweichung bei niedrigen und mittleren Zuflußbelastungen verzeichnet werden, bei hohen Belastungen hingegen eine leichte Zunahme. Die anderen Kenngrößen, Mittelwert und Perzentile bleiben im wesentlichen unverändert.

Hier scheint ein Zusammenhang zu bestehen zu den Veränderungen der Geschwindigkeitsverteilung: dort wo das System ein Absenken der Streuung der Geschwindigkeiten auf niedrige Werte bewirkt, nämlich hauptsächlich bei niedrigen und mittleren Zuflußbelastungen, führt dies gleichzeitig zu einer geringfügigen Senkung der Streuung der Beschleunigungswerte.

7.3.3 Der kombinierte Einsatz von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle

Beim kombinierten Einsatz wird das Zusammenspiel von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle analysiert. Ausgerüstete Fahrzeuge sind jetzt mit beiden Systemen gleichzeitig ausgestattet. Wünschenswert wäre es, daß sich die positiven Effekte beider Systeme beim kombinierten Einsatz ergänzen. Das System Geschwindigkeitskontrolle wird im kontrollierten Fahren erst in Kombination mit den

Regelalgorithmen der Abstandswarnung zu einem System, das die Fahrzeugbewegungen tatsächlich automatisch regelt.

Im folgenden werden wieder alle Aspekte möglichen Einflusses auf den Verkehrsfluß diskutiert, wie das für den separaten Einsatz der beiden Systeme oben schon geschehen ist.

Leistungsfähigkeit und Verkehrszustände

Bei der Analyse der Leistungsfähigkeiten kann beobachtet werden, daß sich bei Ausrüstung der Fahrzeuge mit beiden Systemen der longitudinalen Beeinflussung fast dieselben Maximal- und Perzentilwerte einstellen, wie bei der Ausrüstung der Fahrzeuge nur mit der Abstandswarnung: nach anfänglichem leichten Anwachsen sinkt die Leistungsfähigkeit mit steigendem Ausrüstungsgrad für kontrolliertes und unterstütztes Fahren mit hohem Befolgungsgrad schließlich spürbar ab. Die Begründung dafür ist wie oben die Anhebung der minimalen Zeitlücken auf über 1,5s. Abbildung 7-17 verdeutlicht die Entwicklung der maximalen Verkehrsstärken und der 98%- und 95%-Perzentile.

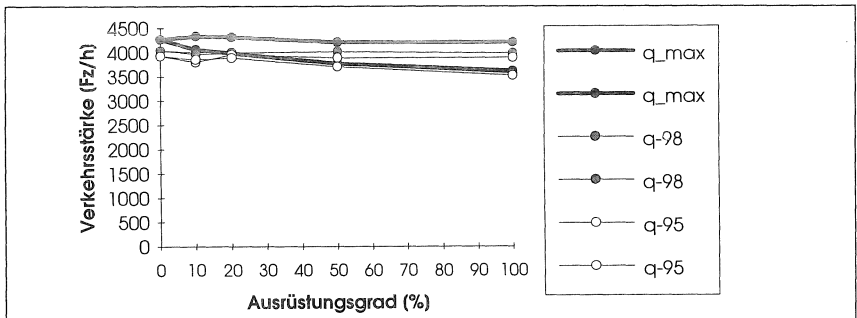


Abb. 7-17: Maximale Verkehrsstärken und Perzentile

Bei der Betrachtung der Verkehrszustände fällt auf (Abbildungen 7-18 und 7-19), daß gegenüber dem Einsatz nur der Abstandswarnung, hier auch im unterstützten Fahren eine deutlicherer Rückgang der Stausituationen stattfindet. Bei hohem Befolgungsgrad können bei 100% Ausrüstung Verkehrsstörungen mit deutlichem Geschwindigkeitsrückgang gänzlich vermieden werden (schraffierter Bereich im letzten Diagramm). Für das kontrollierte Fahren ist die Entwicklung ähnlich wie beim Einsatz nur der Abstandswarnung.

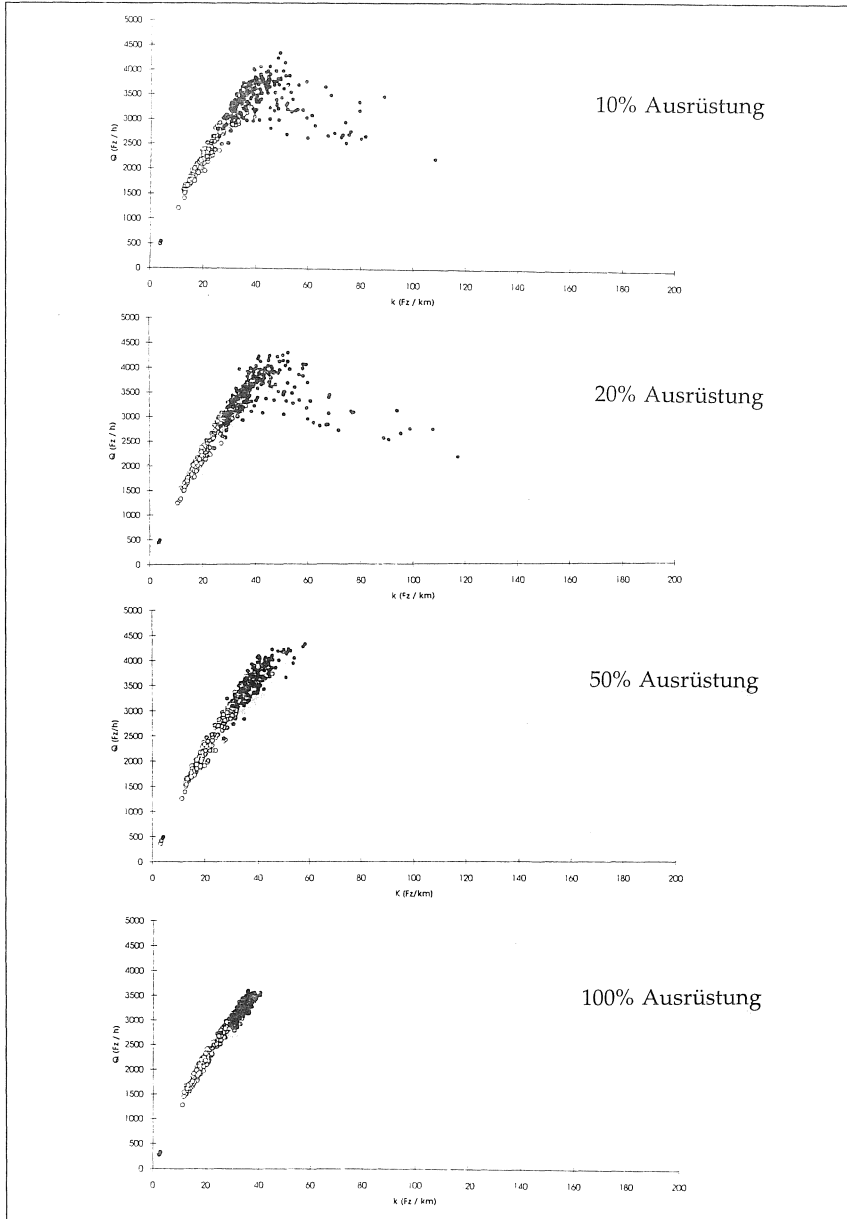


Abb. 7-18: Fundamentaldiagramme, kontrolliertes Fahren

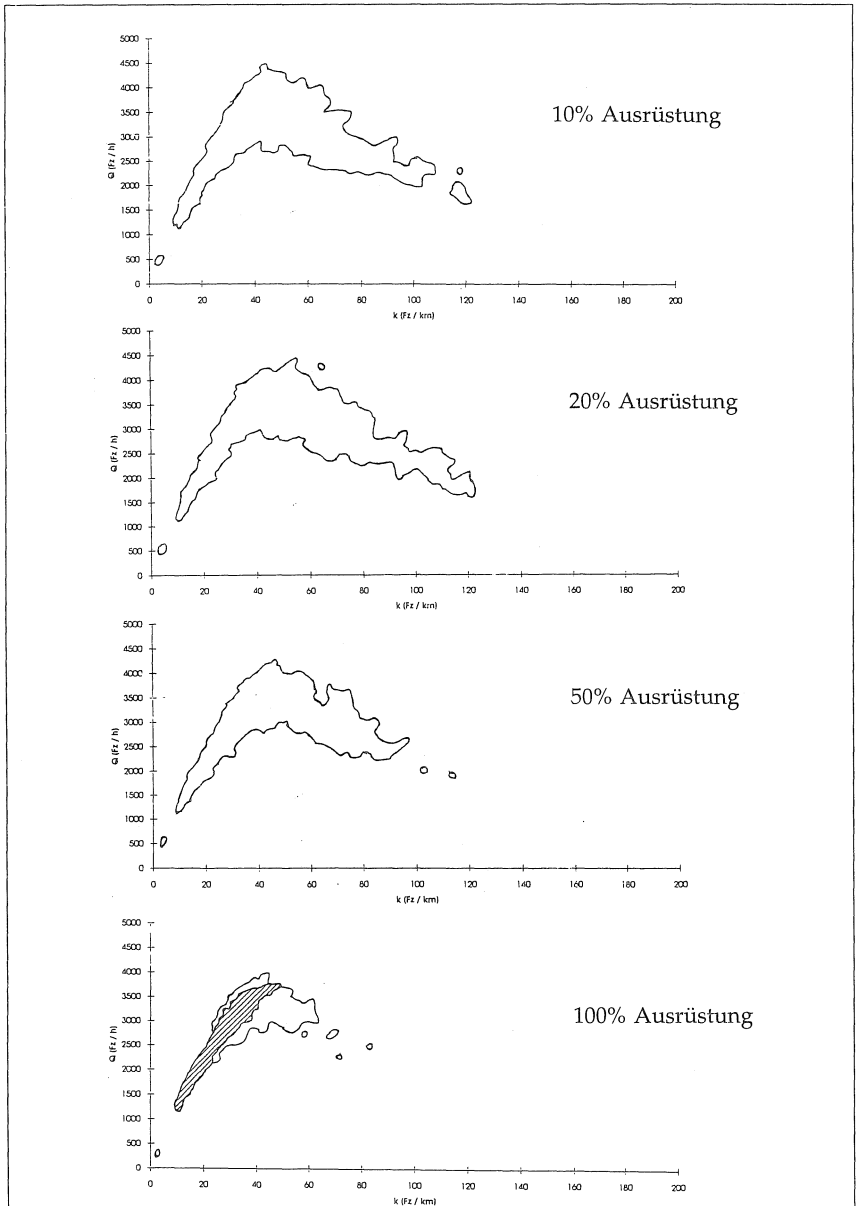


Abb. 7-19: Fundamentaldiagramme, unterstütztes Fahren

Reisegeschwindigkeit

Die Analyse der Geschwindigkeitsverteilungen verdeutlicht, daß sich hier die positiven Effekte beider Systeme ergänzen: bei niedrigen und mittleren Belastungen wirken hauptsächlich diejenigen der Geschwindigkeitskontrolle, bei den hohen Belastungen kommen noch die Effekte der Reduktion von Stauzuständen durch die Abstandswarnung hinzu. Die Beträge der Veränderungen sind meist größer als die Summe der Einzelveränderung durch separaten Einsatz der Systeme.

Bei niedrigen und mittleren Zuflußbelastungen bleibt der Mittelwert anders als bei Ausrüstung der Fahrzeuge nur mit der Geschwindigkeitskontrolle mit zunehmendem Ausrüstungsgrad annähernd konstant. Allerdings nähern sich bei diesen Belastungen die beiden Perzentile dem Mittelwert stark an: Bei niedrigen Belastungen steigt das 15%-Perzentil von 92,421 km/h auf 97,519 km/h bei kontrolliertem bzw. auf 95,667 km/h bei unterstütztem Fahren mit hohem Befolgungsgrad, das 85%-Perzentil sinkt von 139,319 km/h auf 134,242 bzw. 133,394 km/h. Bei mittleren Belastungen steigt das 15%-Perzentil von 83,274 km/h auf 89,243 bzw. 87,22 km/h, das 85%-Perzentil sinkt von 123,179 auf 113,007 bzw. 113,78 km/h.

Bei den hohen Belastungen steigt der Mittelwert spürbar an, stärker als bei der Ausrüstung nur mit Abstandswarnung, etwas weniger als bei Ausrüstung nur mit Geschwindigkeitskontrolle. Die Perzentile nähern sich dem Mittelwert noch stärker als bei den anderen Belastungen: das 15%-Perzentil steigt von 57,435 km/h auf 87,468 bzw. 86,684 km/h, das 85%-Perzentil sinkt von 112,865 km/h auf 108,475 bzw. 110,465 km/h.

Dies führt zu einer mit zunehmender Zuflußbelastung deutlicher werdenden Abnahme der Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung. Die Reduktion der Standardabweichung ist in allen Belastungssituationen größer als beim separaten Einsatz der Beeinflussungssysteme: bei niedrigen und mittleren Belastungen größer als durch Einsatz der Geschwindigkeitskontrolle, bei hohen Belastungen größer als die Summe der beiden separaten Einsätze. Die Standardabweichung sinkt bei niedrigen Belastungen von 21,387 auf 17,283 bzw. 17,596, bei mittleren Belastungen von 18,298 auf 11,091 bzw. 12,459 und bei hohen Belastungen von 24,894 auf 9,543 bzw. 11,173. Bei allen oben genannten Kenngrößen blieben die Werte für niedrige Befolgungsgrade annähernd konstant.

Die Minimalwerte der Geschwindigkeiten können überall dort deutlich angehoben werden, wo Stausituationen vermieden werden. In allen anderen Situationen steigen sie ähnlich wie beim alleinigen Einsatz der Geschwindigkeitskontrolle leicht an. Die Maximalwerte sinken bei mittleren und hohen Belastungen mit zunehmendem Ausrüstungsgrad.

Die Entwicklung der diskutierten Kenngrößen verdeutlichen Abbildungen 7-20 bis 7-22.

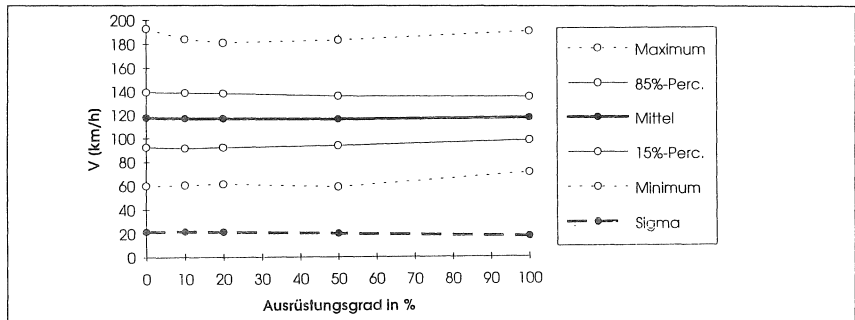


Abb. 7-20: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, niedrige Belastung

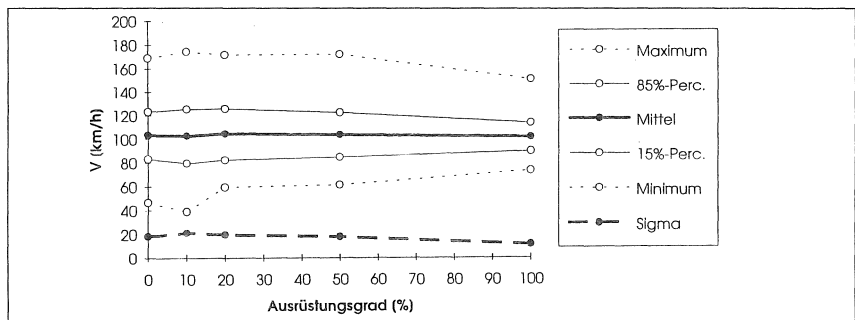


Abb. 7-21: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, mittlere Belastung

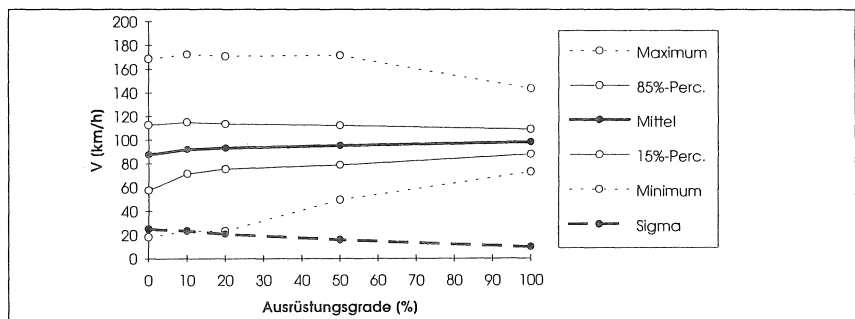


Abb. 7-22: Kenngrößen der Reisegeschwindigkeitsverteilung, hohe Belastung

Sicherheit

Als sicherheitsrelevant kann beim kombinierten Einsatz beider Systeme zum einen die deutliche Reduzierung der Streuung der Geschwindigkeiten bewertet werden.

Die Verteilung der Zeitlücken entwickelt sich ähnlich wie beim Einsatz nur der Abstandswarnung: die Mittelwerte und 15%-Perzentile haben praktisch dieselbe Ausprägung wie dort. Auch hier gilt für die Minimalwerte, daß sie erst bei vollem Ausrüstungsgrad und hoher Befolgung ansteigen. Die 85%-Perzentile sinken etwas weniger stark. Dies ist für eine Beurteilung der Sicherheit jedoch nicht interessant.

Wie schon bei der Abstandswarnung gilt auch hier, daß durch die Reduktion der Anzahl Stauzustände eine Erhöhung der Verkehrssicherheit erwartet werden kann.

Fahrkomfort

Die zur Beurteilung des Fahrkomforts untersuchten Veränderungen der Verteilung der Beschleunigungswerte ergeben ähnliche Resultate wie bei der Abstandswarnung: im Bereich niedriger Belastungen nimmt die Standardabweichung geringfügig zu, bei mittleren Belastungen bleibt sie annähernd konstant und bei hohen Belastungen nimmt sie ab.

7.3.4 Das System Fahrstreifenwechselhilfe

Mit der Fahrstreifenwechselhilfe wird als einziges ein System untersucht, das die lateralen Bewegungen der Fahrzeuge beeinflusst. Entsprechend unterscheidet sich auch die Form der Auswertung. Es werden hauptsächlich fahrstreifenbezogene Größen betrachtet. Die Betrachtung der bei den Systemen longitudinaler Beeinflussung diskutierten Aspekte brachte hier keine wesentlichen Veränderungen. Die Leistungsfähigkeiten blieben weitgehend unverändert, in den Fundamentaldiagrammen konnte kein Rückgang von Stauzuständen beobachtet werden. Auch die Analyse der Verteilung der Zeitlücken und der Beschleunigungswerte zeigte keinen spürbaren Einfluß dieses Systems. Im folgenden werden die Ergebnisse der fahrstreifenbezogenen Untersuchungen vorgestellt. Wie weiter oben motiviert, wurde der Einfluß des Systems nur als unterstützend modelliert. Eine echte Kontrolle der lateralen Bewegungen ist z.Zt. nicht realisierbar.

Anzahl Fahrstreifenwechsel

Zunächst wurde untersucht, welchen Einfluß das System Fahrstreifenwechselhilfe auf die Anzahl durchgeführter Fahrstreifenwechsel hat. Betrachtet wurden die Fahrstreifenwechsel auf der ganzen Länge der simulierten Strecke (3 km), also in diesem Fall auch auf der Vor- und der Nachlaufstrecke. Fahrstreifenwechsel sind eher seltene Ereignisse verglichen mit der Vielzahl Entscheidungen im Fahrzeugfolgeverhalten.

Deswegen schien die Betrachtung der Fahrstreifenwechsel nur auf der Beobachtungsstrecke von 1/2 km eine zu kleine Stichprobe zu liefern. Problematisch ist, daß mit Wegfall der Vorlaufstrecke auch solche Fahrstreifenwechsel mit erfaßt werden, die als Folge ungünstigen Einsetzens der Fahrzeuge am Streckenanfang durchgeführt werden. Die ermittelten Zahlenwerte können daher nicht dazu verwendet werden, absolute Aussagen über das Fahrstreifenwechselverhalten zu treffen, wohl aber zum Vergleich verschiedener Szenarien, die unter gleichen Bedingungen simuliert wurden.

Die absolute Anzahl durchgeführter Fahrstreifenwechsel ist belastungsabhängig. Ebenso ist die Veränderung der Anzahl Fahrstreifenwechsel durch Einsatz des Systems Fahrstreifenwechselhilfe von der Streckenbelastung abhängig. Bei niedrigen Belastungen nimmt die Anzahl bei hohem Befolgungsgrad monoton zu (von 1249,7 auf 1364,3 Fahrstreifenwechsel/km), wobei die größte Steigerung bis zum Szenario mit 50% Ausrüstung erreicht wird. Bei niedrigen Befolgungsgraden bleibt die Anzahl praktisch unverändert. Bei mittleren Belastungen nimmt die Anzahl Fahrstreifenwechsel bei hohem Befolgungsgrad ab (von 1330,5 auf 1233,9 Wechsel/km), bei niedrigem Befolgungsgrad bleibt sie weitgehend unverändert. Bei den hohen Belastungen sind die Veränderungen nicht so eindeutig. Die Anzahl Fahrstreifenwechsel schwanken zwischen Werten, die leicht niedriger und Werten, die leicht höher sind als der Wert bei Ausrüstung 0% (von 1143,75 auf Werte zwischen 1068,5 und 1241,3 Wechsel/km).

Fahrstreifenaufteilung

Zur Beurteilung der Fahrstreifenaufteilung und deren Veränderung durch Einsatz der Fahrstreifenwechselhilfe wurden oben zwei räumlich-zeitliche Kenngrößen definiert: der Verkehrsstärke-Anteil und der Verkehrsdichte-Anteil der einzelnen Fahrstreifen. Diese werden im folgenden auf die Beobachtungsstrecke von 1/2 km bezogen.

Generell kann bei zunehmendem Ausrüstungsgrad eine monotone Erhöhung des Stärke- und Dichte-Anteils auf Fahrstreifen 1 beobachtet werden: Bei niedrigen Belastungen steigt der Verkehrsstärke-Anteil von durchschnittlich 46,82% auf 52,18%, der Verkehrsdichte-Anteil von 51,29% auf 55,64%. Bei mittleren Belastungen steigt der Stärke-Anteil von 45,01% auf maximal 50,35%, der Dichte-Anteil von 49,54% auf maximal 53,08%. Bei den hohen Belastungen schließlich steigt der Stärke-Anteil von 45,32% auf bis zu 49,9% und der Dichte-Anteil von 49,06% auf 53,18%. Bei niedrigen Befolgungsgraden bleiben die Werte der Fahrstreifenaufteilung weitgehend unverändert. Die Entwicklung der Fahrstreifenaufteilung bei verschiedenen Zuflußbelastungen ist in Abbildung 7-23 dargestellt.

Es fällt auf, daß die Werte des Verkehrsdichte-Anteils generell höher sind als die des Verkehrsstärke-Anteils. Bei niedrigen Belastungen sind sie bei allen Ausrüstungsgraden, auch bei 0%, größer als 50%, bei den anderen Belastungen steigen sie mit zunehmendem Ausrüstungsgrad über 50%. Das liegt an der Definition der beiden Größen: da $AK(j)$ definiert ist als Anteil des Fahrstreifens j an der zur Durchfahrung benötigten Zeiten, gehen bei dieser Größe die langsamen Fahrzeuge stärker ein als

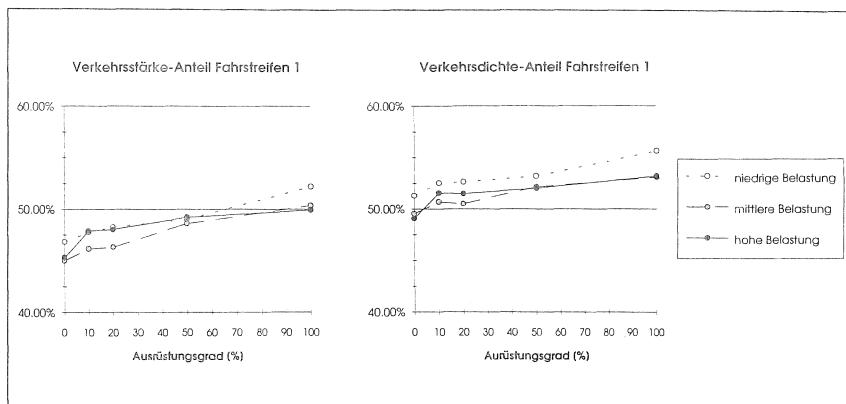


Abb. 7-23: Verkehrsstärke- und Verkehrsdichte-Anteil des rechten Fahrstreifen

die schnellen, da diese längere Zeit zur Durchfahrung der Beobachtungsstrecke benötigen. Auf Fahrstreifen 1 fahren mehr langsame Fahrzeuge, z.B. LKW, der Dichte-Anteil ist daher höher.

Der Verkehrsstärke-Anteil von Fahrstreifen 1 liegt in den nicht ausgerüsteten Situationen unter 50%, bei niedrigen Belastungen bei 46,8%, bei mittleren und hohen um 45%. Dies entspricht nur annähernd der realen Verkehrssituation. Bei Belastungen um 2000 Fz/h entsprechen die Simulationsergebnisse real meßbaren Fahrstreifen-Aufteilungen, bei hohen Belastungen sinkt in der Realität der Anteil von Fahrstreifen 1 jedoch z.T. unter 40%. Das Modell menschlichen Fahrstreifenwechselverhaltens, so wie es von SPARMANN (1978) entwickelt, kalibriert und validiert wurde, liefert jedoch keine besseren Werte für hohe Belastungen. Auch bei SPARMANN (1978), dort Abbildung 9.6, sinken die Anteile von Fahrstreifen 1 nicht unter 45%.

Bemerkenswert an den Ergebnissen ist, daß der Einsatz des Systems Fahrstreifenwechselhilfe dazu führt, daß mehr Fahrzeuge den rechten Fahrstreifen benutzen. Dies gilt bei allen Belastungen, bei mittleren bis hohen Verkehrsstärken werden bei voller Ausrüstung Verkehrsstärke-Anteile des rechten Fahrstreifens von 50% erreicht, bei niedrigen Belastungen steigt der Anteil sogar auf über 52%. Das globale Ziel der Beeinflussung, eine bessere Auslastung aller Fahrstreifen, kann bei hoher Ausrüstung und hohem Befolungsgrad daher erreicht werden.

Geschwindigkeiten auf den Fahrstreifen

Die mittlere Geschwindigkeit auf dem rechten Fahrstreifen geht bei niedrigen bis mittleren Belastungen geringfügig zurück (von 104,4 auf 103,8 km/h, bzw. von 93,4 auf 92,0 km/h), auf dem linken Fahrstreifen geht sie bei niedrigen Belastungen leicht hoch (von 125,0 auf 127,2 km/h), bei mittleren Belastungen bleibt sie annähernd

unverändert. Diese sehr geringfügigen Veränderungen sind Ergebnis der besseren Auslastung des rechten Fahrstreifens: mehr Fahrzeuge fahren rechts, weniger langsame Fahrzeuge bleiben auf dem linken Fahrstreifen.

Bei den hohen Belastungen gehen die mittleren Geschwindigkeiten auf beiden Fahrstreifen nach oben: rechts von 86,5 auf 89,4, links von 95,4 auf 98,2 km/h. Da bei diesen Belastungen Verkehrsstörungen mit erheblichem Geschwindigkeitsrückgang auftraten, führt schon die geringfügig verbesserte Fahrstreifenaufteilung zu einer Verbesserung der Verkehrssituation der Gesamtfahrbahn.

Die Streuung der Geschwindigkeiten bleibt bei niedrigen Belastungen mit zunehmendem Ausrüstungsgrad annähernd gleich niedrig, bei mittleren Belastungen wird die Streuung leicht größer, bei hohen Belastungen sinkt sie mit zunehmendem Ausrüstungsgrad. Entsprechend ist bei den Perzentilwerten keine eindeutige Entwicklung zu erkennen.

Sicherheit

Eine mögliche Veränderung der Sicherheit durch das System Fahrstreifenwechselhilfe kann sich nur auf die Bewertung lateraler Bewegungen beziehen, sowie auf Veränderungen fahrstreifenspezifischer Größen, z.B. die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen. Größen der longitudinalen Bewegung, wie Zeitlücken, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen in Längsrichtung werden durch die Fahrstreifenwechselhilfe nicht beeinflusst.

Fahrstreifenwechsel können generell als Fahrmanöver betrachtet werden, die mit Unfallrisiko verbunden sind. Insofern würde eine Erhöhung der Anzahl Fahrstreifenwechsel eine Senkung der Verkehrssicherheit bedeuten. Andererseits kann davon ausgegangen werden, daß alle Fahrstreifenwechsel, die mit Unterstützung der Fahrstreifenwechselhilfe durchgeführt werden, sicher sind, wenn von einem Aussetzen der Meßsensorik abgesehen wird. Daher können die lateralen Fahrbewegungen von ausgerüsteten Fahrzeugen mit hohem Befolungsgrad als sicherer bewertet werden.

Die Geschwindigkeitsunterschiede auf den Fahrstreifen nehmen nicht einheitlich ab. Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen verändern sich auch nicht stark genug, als daß daraus eine Veränderung der Verkehrssicherheit abgeleitet werden könnte.

8. Zusammenfassung

Eine Ausrüstung der derzeitigen Fahrzeugflotte mit Systemen individueller Fahrbeeinflussung, die geeignet sind, den Fahrer in seiner Aufgabe der Fahrzeugkontrolle zu unterstützen, sei es durch Angabe von Informationen und Warnungen, sei es durch direkten Eingriff in die Fahrzeugbewegung, ist mit erheblichem finanziellen, organisatorischen und gesetzgeberischen Aufwand verbunden. Wie bei anderen Systemen, die nicht notwendigerweise zur Fahrzeugfortbewegung benötigt werden, wie z.B. ABS oder Katalysator, wird deren Einführung nicht schlagartig zu einem Zustand voller Ausrüstung führen. Vielmehr wird man sich über Jahre hinweg mit einer Situation abfinden müssen, in dem ein stetig wachsender Anteil Fahrzeuge mit derartigen Systemen ausgestattet ist, in dem aber weiterhin ein nicht unbedeutender Anteil nicht ausgerüsteter Fahrzeuge im Straßennetz unterwegs sein wird.

Zur Abschätzung der Auswirkungen wurde daher in dieser Arbeit ein Modell entwickelt, mit dem das Fahrverhalten nachgebildet werden kann, und zwar sowohl das vom Menschen kontrollierte, als auch das von verschiedenen Fahrbeeinflussungssystemen unterstützte Fahrverhalten. Ziel war die Untersuchung der Veränderungen, die sich im Verkehrsfluß durch Einsatz der Beeinflussungssysteme ergeben, zum einen der Vergleich der aktuellen Situation mit der Situation voller Ausrüstung aller Fahrzeuge, zum anderen aber gerade auch die Analyse verschiedener Zwischenstufen vor Erreichung der vollen Ausrüstung der Fahrzeugflotte.

Das Vorgehen bei dieser Arbeit wird nun abschließend noch einmal kurz umrissen. Daran anschließend werden die erzielten Ergebnisse im einzelnen bewertet und interpretiert. Abgeschlossen wird die Arbeit schließlich mit einem Ausblick auf künftigen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

8.1 Vorgehen

Die Nachbildung des Einflusses von individuellen Fahrbeeinflussungssystemen auf das Fahrverhalten erforderte ein Modell, das die Fahrzeugbewegungen und die diesen Bewegungen zugrundeliegenden Fahrerentscheidungen hinreichend detailliert repräsentiert. Es wurde daher ein mikroskopisches Verkehrsflußmodell ausgewählt, in dem die Fahrzeugbewegungen als Reaktion auf menschliche Wahrnehmung und Einschätzung von Verkehrssituationen definiert sind. In diesem Modell werden Bewegungen in Longitudinal- und in Lateral-Richtung getrennt behandelt.

Ein Schwerpunkt der Arbeit bestand darin, dieses mikroskopische Modell in seinem grundlegenden Modellteil, nämlich der Nachbildung der Longitudinalbewegung, dem sog. Fahrzeugfolgeverhalten, erneut zu kalibrieren und anschließend zu validieren. Die letzten echt kalibrierfähigen Daten, die für das Fahrzeugfolgemodell erhoben worden waren, stammten aus dem Jahre 1972. Es wurden daher Messungen mit einem Fahrzeug durchgeführt, das mit Abstands-Sensoren zunächst am Fahrzeugbug, später auch am Fahrzeugheck ausgerüstet war, und mit dem das Fahrzeugfolge-

verhalten von Fahrern im Fahrzeug, bzw. von Fahrern nachfolgender Fahrzeuge erfaßt werden konnte. Diese Meßdaten wurden zur Kalibrierung der Modellparameter des Folgeverhaltens genutzt. Das kalibrierte Modell wurde mit an lokalen Meßstellen erhobenen makroskopischen Daten validiert.

Dieses Modell menschlich gesteuerten Fahrverhaltens bildete die Grundlage für die Modellierung des Einflusses von Fahrbeeinflussungssystemen. Es wurden zwei Grundformen des Einflusses modelliert: ein kontrolliertes oder automatisches Fahren, bei dem die Fahrzeugbewegungen vom System geregelt werden, und ein unterstütztes Fahren, bei dem der Fahrer die Kontrolle über die Fahrbewegungen behält, jedoch vom System durch Anzeige von Informationen unterstützt wird. Modelliert wurden drei grundlegende Systeme der Fahrbeeinflussung: Abstandswarnung, Geschwindigkeitskontrolle und Fahrstreifenwechselhilfe.

Es wurde ein Simulationsplan entworfen, bestehend aus 93 Szenarien, mit dem für die verschiedenen Systeme verschiedene Ausrüstungsgrade simuliert werden sollten. Jedem Szenario waren 4 Simulationsläufe zugeordnet, die jeweils verschiedene Verkehrssituationen repräsentierten. Die Ergebnisse der Simulationen wurden ausgewertet und miteinander verglichen.

Im folgenden werden diese Ergebnisse nun bewertet und interpretiert. Dabei werden die potentiellen Effekte der drei untersuchten Systeme sowie der Kombination aus Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle dargestellt.

8.2 Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Die Effekte der Systeme der longitudinalen Beeinflussung, Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle können unterschieden werden nach Auswirkungen auf Leistungsfähigkeit, Reisegeschwindigkeit, Sicherheit und Fahrkomfort. Diese Systeme hatten keinen spürbaren Einfluß auf fahrstreifenbezogene Größen. Umgekehrt konnte beim System Fahrstreifenwechselhilfe keine Veränderung der oben genannten Aspekte festgestellt werden. Bei diesem System wurden Veränderungen nur fahrstreifenbezogen erkennbar. Diese Effekte werden im Abschnitt Fahrstreifenaufteilung diskutiert.

8.2.1 Leistungsfähigkeit und Verkehrszustände

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit und zum Vergleich zwischen den verschiedenen Szenarien wurden die Verkehrsstärken nach EDIE und COERS in einem räumlich-zeitlichen Beobachtungsfenster mit räumlicher Ausdehnung von 1/2 Kilometer und zeitlicher Ausdehnung von 1 Minute errechnet. Dabei wurden, um statistisch nicht repräsentative 1-Minuten-Werte herauszufiltern, neben den maximalen Werten der Verkehrsstärke noch zwei Perzentile analysiert, das 98%- und das 95%-Perzentil.

Die zu 1-Minuten-Intervallen aggregierten makroskopischen Daten der Beobachtungsstrecke von 1/2 km wurden außerdem verwendet, um die Verkehrszustände in den simulierten Szenarien zu schätzen.

Folgende Ergebnisse konnten beobachtet werden:

- Die Leistungsfähigkeit wird praktisch nur vom System Abstandswarnung beeinflusst, bzw. von der Kombination aus Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle. Die Geschwindigkeitskontrolle als alleinstehendes System sowie die Fahrstreifenwechselhilfe haben keinen meßbaren Einfluß auf die Leistungsfähigkeit.
- Die Leistungsfähigkeit sinkt bei voller Ausrüstung aller Fahrzeuge mit dem System Abstandswarnung spürbar ab. Dies gilt sowohl für das kontrollierte Fahren, als auch für unterstütztes Fahren bei hohem Befolgungsgrad der Fahrer. Der Grund hierfür ist das Einhalten eines Sicherheitsabstandes, der einer Netto-Zeitlücke von $\tau=1,5$ Sekunden entspricht. Durch unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten und ungünstige Fahrstreifenwechsellvorgänge entstehen z.T. größere Lücken, bei voller Ausrüstung jedoch nie Lücken kleiner als 1,5s. Daher sinkt die Leistungsfähigkeit gegenüber der nicht beeinflussten Situation, sie sinkt auch unter den theoretisch erreichbaren Wert von $1/\tau$.
- Zum Vergleich wurden die beiden Szenarien mit 100% Ausrüstung einmal bei kontrollierendem Einfluß und einmal bei unterstützendem Einfluß mit hohem Befolgungsgrad mit einer auf 1 Sekunde reduzierten Zeitlücke simuliert. Bei kontrollierendem Einfluß ergab sich eine deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit gegenüber der nicht ausgerüsteten Situation, beim unterstützten Fahren lag die Leistungsfähigkeit zwar höher als beim vergleichbaren Szenario mit $\tau=1,5$ s, jedoch immer noch niedriger als beim nicht beeinflussten Fahren. Beim automatisch geregelten Fahren kann demnach durch Senken der eingestellten Zeitlücke eine Kapazitätssteigerung erreicht werden. Allerdings geht dies auf Kosten der Sicherheit: bei Zeitlücken im Bereich oder unterhalb der menschlichen Reaktionszeit kann der Fahrer in Notfällen, z.B. bei Ausfall eines Meßsensors, nicht mehr schnell genug reagieren. Eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit beim vom Fahrer geregelten aber von der Abstandswarnung unterstützten Fahrverhalten ist nicht zu erwarten.
- Mit zunehmender Ausrüstung der Fahrzeuge kann die Anzahl Verkehrsstörungen mit erheblich reduzierten Geschwindigkeiten kontinuierlich gesenkt werden, wenn die Fahrzeugbewegungen vom System Abstandswarnung automatisch geregelt sind. Die Anzahl 1-Minuten-Intervalle im Bereich des gebundenen und teilgebundenen Verkehrs nimmt mit wachsendem Ausrüstungsgrad kontinuierlich ab, der Verkehrsfluß wird stabiler.
- Beim unterstützten Fahren nimmt bei hohem Befolgungsgrad der Fahrer die Anzahl Verkehrsstörungen ebenfalls ab, allerdings weniger als beim automatisch geregelten Fahren. Auch bei 100% Ausrüstung mit dem System Abstandswarnung kann es noch zu geringfügigen Störungen kommen, der Verkehrsfluß ist weniger

stabil als beim kontrollierten Fahren.

- Beim kombinierten Einsatz von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle stellen sich bezüglich Leistungsfähigkeit und Verkehrszuständen ähnliche Effekte ein, wie beim alleinigen Einsatz der Abstandswarnung. Der Grund hierfür ist, daß bei Verkehrsstärken im Bereich der Leistungsfähigkeit der Einfluß der Abstandswarnung groß ist, derjenige der Geschwindigkeitskontrolle jedoch eher untergeordnet.

8.2.2 Reisegeschwindigkeit

Auch bei der Analyse des Einflusses der Systeme auf die Geschwindigkeiten wurde statt der in der Realität üblichen querschnittbezogenen Betrachtung ein räumlich-zeitlicher Ansatz gewählt: es wurde die Verteilung der Reisegeschwindigkeiten auf der Beobachtungsstrecke untersucht. Dabei wurde die Entwicklung des Geschwindigkeitsniveaus in Form des Mittelwerts, sowie die Veränderung der Breite der Verteilung mittels Standardabweichung, 15%- und 85%-Perzentilen, Minimal- und Maximalwerten analysiert. Dabei wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Der Einsatz des Systems Geschwindigkeitskontrolle bewirkt bei hohem Befolgungsgrad ein kontinuierliches Ansteigen des Geschwindigkeitsniveaus in allen Verkehrssituationen. Der Mittelwert der Verteilung steigt insbesondere deswegen an, da weniger Fahrzeuge mit niedrigen Geschwindigkeiten fahren.
- Dies wird bei der Betrachtung der 15%-Perzentile deutlich: die Werte steigen mit zunehmendem Ausrüstungsgrad stärker an als die Mittelwerte. Die 85%-Perzentile steigen jedoch weniger deutlich an als die Mittelwerte. Dies führt zu einer mit wachsender Ausrüstung enger werdenden Geschwindigkeitsverteilung. Tatsächlich sinkt die Standardabweichung in allen Verkehrssituationen spürbar. Sie bleibt bei den hohen Belastungen dennoch recht hoch, da durch alleinigen Einsatz der Geschwindigkeitskontrolle die Anzahl Stauzustände nicht merklich reduziert werden kann.
- Durch Einsatz der Abstandswarnung werden bei hohen Zuflußbelastungen im kontrollierten Fahren sowie im unterstützten Fahren mit hohem Befolgungsgrad Verkehrsstörungen zunehmend vermieden. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion der Standardabweichung der Reisegeschwindigkeiten, zu einem Anheben der Minimalwerte auf Werte, wie sie bei niedrigen Zuflußbelastungen beobachtet wurden, sowie zu einer geringfügigen Erhöhung auch des 15%-Perzentils. Auch der Mittelwert der Verteilung steigt hier leicht an. Bei allen anderen Zuflußbelastungen hat das System Abstandswarnung jedoch keinen relevanten Einfluß auf die Geschwindigkeitsverteilung.
- Beim kombinierten Einsatz von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle ergänzen sich die positiven Effekte beider Systeme: bei niedrigen und mittleren Zuflußbelastungen ist in erster Linie der Einfluß der Geschwindigkeitskontrolle

spürbar (sinkende Standardabweichung), bei hohen Belastungen kommt der Einfluß der Abstandswarnung hinzu (Vermeidung von Stauzuständen).

- Die Fahrstreifenwechselhilfe bewirkt, daß mehr langsame Fahrzeuge den rechten Fahrstreifen benutzen. Dies führt zu einer leichten Geschwindigkeitserhöhung auf dem linken und zu einer leichten Geschwindigkeitssenkung auf dem rechten Fahrstreifen.

8.2.3 Sicherheit

Bei der Simulation des Verkehrsflusses können keine direkten Aussagen über die Verkehrssicherheit aus den Simulationsergebnissen gewonnen werden, da z.B. Unfälle nicht in der Form nachbildbar sind, wie sie in der Realität auftreten. Es gibt allerdings verschiedene Möglichkeiten, indirekt die Verkehrssicherheit aus der Analyse verschiedener Ausgabegrößen zu schätzen. Dies sind z.B. die Anzahl kritischer Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen, die Anzahl Verkehrszustandswechsel, die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrzeugen, die Anzahl Fahrstreifenwechsel und die Unterschiede in den Geschwindigkeitsniveaus der verschiedenen Fahrstreifen.

- Die Anzahl kritischer Zeitlücken wird nur durch das System Abstandswarnung bzw. den kombinierten Einsatz von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle beeinflusst. Hier steigt das 15%-Perzentil der Brutto-Zeitlücke mit zunehmendem Ausrüstungsgrad kontinuierlich von Werten um 1 Sekunde auf Werte um 1,75 Sekunden. Dabei geht ebenfalls der Mittelwert leicht nach oben. Die Minimalwerte steigen erst bei voller Ausrüstung und vollem Befolungsgrad spürbar an.
- Ebenfalls ausschließlich das System Abstandswarnung bewirkt eine Reduktion der Anzahl Verkehrsstörungen und damit der Anzahl Verkehrszustandswechsel. Damit kann die Anzahl plötzlicher Geschwindigkeitswechsel, wie sie z.B. am Stauende auftreten, verringert werden. Die Reduzierung oder Vermeidung dieser mit erheblichem Unfallrisiko verbundenen Situationen bedeutet eine Erhöhung der Verkehrssicherheit.
- Die Streuung der Geschwindigkeiten und damit die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrzeugen, wird bei allen Zuflußbelastungen durch das System Geschwindigkeitskontrolle reduziert. Dies bedeutet generell eine Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die Reduktion der Streuung durch die Abstandswarnung bei hohen Zuflußbelastungen resultiert ausschließlich aus der Verringerung der Anzahl Stauzustände. Die hieraus resultierende Erhöhung der Verkehrssicherheit ist oben schon genannt. Der kombinierte Einsatz beider Systeme verstärkt die Wirkungen des separaten Einsatzes.
- Fahrstreifenwechsel können generell als Manöver eingeschätzt werden, die mit erhöhtem Unfallrisiko verbunden sind. Allerdings können Fahrstreifenwechsel, die unter Einfluß vom System Fahrstreifenwechselhilfe durchgeführt werden, unter

Annahme der Funktionsfähigkeit aller Sensoren als sicherer bewertet werden als nicht unterstützte Fahrstreifenwechsel. Einzig das System Fahrstreifenwechselhilfe beeinflusst die Anzahl durchgeführter Wechsel. Bei niedrigen Belastungen steigt die Anzahl leicht an, bei mittleren sinkt sie leicht, bei hohen Belastungen ist keine eindeutige Entwicklung erkennbar. Ein eindeutiger Einfluß auf die Verkehrssicherheit kann aus der Veränderung der Häufigkeit daher nicht abgeleitet werden.

- Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen verändern sich mit Einsatz der Fahrstreifenwechselhilfe geringfügig: die mittleren Geschwindigkeiten entwickeln sich leicht auseinander. Dies kann bedeuten, daß im Durchschnitt ein nach links wechselndes Fahrzeug höhere Geschwindigkeitsunterschiede zu Fahrzeugen auf diesem Fahrstreifen hat. Dies würde eine Erhöhung des Unfallrisikos und damit eine Verringerung der Verkehrssicherheit bedeuten.

8.2.4 Fahrkomfort

Zur Beurteilung der Veränderungen des Fahrkomforts durch Einsatz der Beeinflussungssysteme wurde die Verteilung der in 1-Sekunden-Abständen von allen Fahrzeugen in der Beobachtungsstrecke erfaßten Beschleunigungswerte verwendet.

- Durch Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem System Abstandswarnung steigen die Standardabweichung und die Beträge der 15%- und 85%-Perzentile bei niedrigen Belastungen leicht an, bei mittleren Belastungen bleiben diese Kenngrößen annähernd unverändert, bei hohen Belastungen sinken sie hingegen deutlich mit zunehmendem Ausrüstungsgrad.
- Beim kombinierten Einsatz von Abstandswarnung und Geschwindigkeitskontrolle sind annähernd dieselben Effekte spürbar.
- Bei alleiniger Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem System Geschwindigkeitskontrolle konnte bei niedrigen und mittleren Belastungen ein leichter Rückgang, bei hohen Belastungen eine leichte Zunahme der Standardabweichung beobachtet werden. Es kann ein Zusammenhang zur Streuung der Geschwindigkeiten festgestellt werden: dort wo die Geschwindigkeitsunterschiede durch Einsatz des Systems gering werden, nämlich bei niedrigen und mittleren Belastungen, verringert sich ebenfalls die Streuung der Beschleunigungswerte.
- Das System Fahrstreifenwechselhilfe hat keinen Einfluß auf die Streuung der Werte der Longitudinalbeschleunigung.

8.2.5 Fahrstreifenaufteilung

Zur Beurteilung der Fahrstreifenaufteilung wurden zwei räumlich-zeitliche Kenngrößen definiert, der Verkehrsstärke-Anteil und der Verkehrsdichte-Anteil der Fahrstreifen, die in Analogie zur Berechnung der Verkehrsstärke und Verkehrsdichte

nach EDIE und COERS als Anteil der Fahrstreifen an den im Beobachtungsbereich zurückgelegten Wegen bzw. als Anteil der dafür benötigten Zeiten berechnet werden. Spürbare Veränderungen der Fahrstreifenaufteilung konnten nur bei Einsatz der Fahrstreifenwechselhilfe festgestellt werden.

- Der Einsatz des Systems Fahrstreifenwechselhilfe führt mit wachsendem Ausrüstungsgrad zu einem monotonen Anstieg der Auslastung des rechten Fahrstreifens. Es gelingt in allen Belastungssituationen mehr Fahrzeuge, insbesondere langsame Fahrzeuge, zur Benutzung des rechten Fahrstreifens zu bewegen. Beide Kenngrößen steigen monoton an.
- Die Werte des Verkehrsdichte-Anteils des rechten Fahrstreifens sind generell höher als die des Verkehrsstärke-Anteils. Sie liegen in fast allen Situationen über 50%. Das liegt an der Definition der Größen: beim Verkehrsdichte-Anteil werden langsame Fahrzeuge stärker berücksichtigt, der Anteil langsamer Fahrzeuge ist aber auf dem rechten Fahrstreifen höher als auf dem linken.
- Der Verkehrsstärke-Anteil des rechten Fahrstreifens sinkt im nicht ausgerüsteten Fall auch bei hohen Belastungen nicht unter 45%. Das Fahrstreifenwechselmodell nach SPARMANN repräsentiert das Fahrverhalten bei hohen Belastungen nicht exakt.

Die Veränderungen, die durch Einsatz des Systems Fahrstreifenwechselhilfe im Modell festgestellt werden können, sind nur gering. Das liegt daran, daß das Modell menschlichen Fahrstreifenwechselverhaltens eine Struktur aufweist, die derjenigen der Fahrstreifenwechselhilfe und deren Modellierung sehr ähnlich ist. Auch bei der Modellierung menschlichen Verhaltens wird geprüft, ob ein Fahrstreifenwechsel wünschenswert, sinnvoll und möglich ist. Unterschiede zur Fahrstreifenwechselhilfe bestehen i.w. nur in der Definition wünschenswerter, sinnvoller und möglicher (sicherer) Fahrstreifenwechsel. Das Ergebnis des modellierten menschlichen Fahrstreifenwechselverhaltens liegt schon recht nahe am Optimierungsziel gleichmäßiger Fahrstreifenaufteilung, näher als in der Realität. Entsprechend gering fallen im Modell die Verbesserungspotentiale durch Einsatz des Systems aus.

8.3 Ausblick

Mit dem vorgestellten Modell konnten Auswirkungen der Einführung verschiedener Fahrbeeinflussungssysteme auf den Verkehrsfluß abgeschätzt werden.

Dabei wurden für das unterstützte Fahren unterschiedliche Aufteilungen der Fahrer auf die verschiedenen Formen des Adaptationsverhaltens untersucht. Es ist damit gelungen, den Bereich potentieller Veränderungen einzugrenzen. Für eine genauere Schätzung der Veränderungen müßte das menschliche Adaptationsverhalten genauer untersucht werden. Dazu sind kurz-, mittel- und langfristige Lernprozesse des Menschen im Umgang mit Fahrbeeinflussungssystemen zu analysieren und in einer modellierbaren Form zu beschreiben.

Bei den modellierten Systemen handelt es sich ganz bewußt um nicht existierende oder in Entwicklung befindliche Fahrbeeinflussungssysteme, sondern um auf theoretischen Überlegungen (z.B. kinematischer Sicherheitsansatz) aufbauenden Funktionsbeschreibungen. Das Modell bleibt damit flexibel. Eine konkrete Anwendung des Modells könnte die Integration von Funktionsbeschreibungen solcher Systeme sein, die tatsächlich entwickelt werden.

Forschungsbedarf besteht noch bei der Modellierung des Fahrstreifenwechselverhaltens. Es hat sich gezeigt, daß, ähnlich wie bei der Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens, die Modellentwicklung und Kalibrierung schon viel zu lange zurückliegt. Der Detaillierungsgrad der zur Modellkalibrierung 1978 auf einer Meßstrecke von etwa einem Kilometer Länge an 11 Querschnitten erhobenen Daten war höchstens so groß wie der Detaillierungsgrad der damit kalibrierten Modellgrößen. Bei der Erfassung von neuen Daten wäre es nötig, wie auch schon beim Modell des Fahrzeugfolgeverhaltens, Messungen mit einem bewegten Meßverfahren durchzuführen. Allerdings müssen dabei sehr viel mehr Parameter erfaßt werden, nämlich auch die Abstände und Geschwindigkeitsdifferenzen zu Fahrzeugen auf benachbarten Fahrstreifen. Dies stellt hohe Anforderungen an die einzusetzende Meßsensorik. Vermutlich bildet die Messung mit Hilfe der Videotechnik die einzige Möglichkeit, hinreichend viele der den Fahrstreifenwechsellvorgang beeinflussenden Größen erfassen zu können. Die Auswertung der auf Videobändern aufgezeichneten Messungen ist dann allerdings mit hohem Aufwand verbunden.

9. Literatur

- Becker, U., 1989 *Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus: Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität
Karlsruhe, Heft 41, ISSN 0341-5503
- Bleher, W.G., 1987 *Messung des Verkehrsablaufs - Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität
Karlsruhe, Heft 38, ISSN 0341-5503
- Brackstone, M.,
McDonald, M.,
Reiter, U., 1992 *Interurban Control and Road Utilisation Simulation - Final Report*
E.C. DRIVE Contract No. V 1052, Work Package 10, Vol. I and II, Brüssel
- Breuning, S.M., 1962 *Entwicklungsstand und Zukunftsaussichten der automatischen Straße*
Straße und Autobahn, Heft 12/1962, S. 478-485
- Busch, F.,
Leutzbach, W., 1984 *Spurwechselvorgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*
Forschungsauftrag 1.082 G 81H des Bundesministers für
Verkehr
- Chandler, R.E.,
Herman, R.,
Montroll, W., 1958 *Traffic Dynamics: Studies in Car Following*
Operations Research, Vol. 6, No. 2, March-April,
S. 165 - 184
- Charlesworth, G.,
Wardrop, J.G., 1954 *A Method of Estimating Speed and Flow of Traffic from a Moving Vehicle*
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London
- Coers, H.G., 1970 *Die internationale Forschungsentwicklung und das räumlich-zeitliche Prinzip mikroskopischer und makroskopischer Untersuchung des Verkehrsflusses*
Die Straße, 10. Jahrgang, Heft 7
- Cosgriff, R.L.,
English, J.J.,
Roeca, W.B., 1966 *An Automatic System for Longitudinal Control of Individual Vehicles*
Highway Research Record, Number 122, Road User Characteristics

- Cremer, M., 1979** *Der Verkehr auf Schnellstraßen*
Springer Verlag, Berlin
- DRIVE '91, 1991** *The DRIVE Programme in 1991*
Commission of the European Communities, DG XIII - Telecommunications, Information Industries and Innovation, Brüssel
- EC - DG XIII, 1993** *Transport Telematics 1993*
Commission of the European Communities, DG XIII - Telecommunications, Information Industries and Innovation, Brüssel
- Edie, L.C., 1961** *Car-Following on Steady-State-Theory for Noncongested Traffic*
Operations Research, Vol. 9, No. 1, January-February, S. 66-76
- Edie, L.C., 1963** *Discussion of traffic stream measurements and definitions*
2nd International Symposium on Theory of Traffic Flow
- Gazis, D.C., Herman, R., Potts, R.B., 1959** *Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow*
Operations research, Vol. 7, No. 4, July-August, S.499-505
- Gazis, D.C., Herman, R., Rothery, R.W., 1961** *Nonlinear Follow-The-Leader Models of Traffic Flow*
Operations Research, Vol. 9, No. 4, July-August, S.545-567
- HCM, 1985** *Highway Capacity Manual*
Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 209, Washington D.C.
- Heidemann, D., 1989** *Typisierung und Analyse von Dauerlinien*
in: Straßenverkehrstechnik, Heft 2/1989
- Heintz, F., 1987** *Informationssysteme im Kraftfahrzeug*
in "Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr", Band 1, Springer-Verlag, ISBN 3-540-16269-0, S. 84-98
- Herman, R., Montroll, W., Potts, R.B., Rothery, R.W., 1959** *Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following*
Operations Research, Vol. 7, No. 1, January-February, S. 86 - 106
- Herman, R., Potts, R.B., 1961** *Single-Lane Traffic Theory and Experiment*
Theory of Traffic Flow, Elsevier, Amsterdam, S. 120-146
- Herman, R., Rothery, R.W., 1963** *Car Following and Steady State Flow*
Proceedings 2nd International Symposium Theory of Road Traffic Flow, OECD Paris, S. 1-11

- Hoefs, D.H., 1972 *Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen*
Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik",
Heft 140, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau,
Bonn
- Hoefs, D.H.,
Leutzbach, W., 1971 *Entwicklung einer Meßmethode über den Bewegungsablauf des
Kolonnenverkehrs*
Unveröffentlichter Bericht über den F.A. 10.25 des Bun-
desministers für Verkehr
- Hubschneider, H., 1983 *Mikroskopische Simulation für Individualverkehr und Öffent-
lichen Personennahverkehr,*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Uni-
versität Karlsruhe, Heft 26, ISSN 0341-5503
- Jahnke, C.-D., 1982 *Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Ab-
standswarnsystemen*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Uni-
versität Karlsruhe, Heft 23, ISSN 0341-5503
- Jürgensohn, T.,
Raupach, Ch., 1992 *Über den Einsatz von Fuzzy-logic in der Modellierung
menschlichen Regelverhaltens*
VDI-Berichte 948, "Das Mensch-Maschine-System im Ver-
kehr", Tagung in Berlin, 19. und 20. März 1992
- Keller, H., 1993 *Europäische Feldversuche für Verkehrsleitsysteme in Deutsch-
land*
in: Straßenverkehrstechnik, Heft 1/1993
- Keller, H.,
Sachse, T., 1992 *Einfluß des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf
die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Stra-
ßenabschnitten*
FA 01.125 G 89 F des Bundesministers für Verkehr
- Köhler, U., 1974 *Stabilität von Fahrzeugkolonnen*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Uni-
versität Karlsruhe, Heft 9, ISSN 0341-5503
- Kühne, R., 1991 *Traffic patterns in unstable traffic flow on freeways*
Proceedings of the International Symposium on Highway
Capacity, Karlsruhe, July 1991, ISBN 9054100117
- Lehmann, A., 1986a *Methoden und Werkzeuge zur Leistungsanalyse*
Vorlesungsmanuskript, Institut für Informatik IV, Univer-
sität Karlsruhe

- Lehmann, A., 1986b** *Simulation von Rechensystemen*
Vorlesungsmanuskript, Institut für Informatik IV, Universität Karlsruhe
- Leutzbach, W., 1972** *Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses*
Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, ISBN 3-540-05724-2
- Leutzbach, W., 1993** *Auswertung bisheriger deutscher praktischer und theoretischer Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsvorschriften*
Heusch-Boesefeldt, FE 3.251 G921 des Bundesministers für Verkehr
- Leutzbach, W.,
Bexelius, S., 1966** *Probleme der Kolonnenfahrt*
Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 44, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- Leutzbach, W.,
Egert, Ph., 1954** *Geschwindigkeitsmessungen vom fahrenden Fahrzeug aus*
In: Straßenverkehrstechnik, Heft 3/1959
- Leutzbach, W.,
Jahnke, C.-D., 1981** *Stabilitätsuntersuchungen von Kolonnenfahrten mit autarken Abstandswarnsystemen*
Forschungsauftrag TV 8003/9 des Bundesministers für Forschung und Technologie
- Leutzbach, W.,
Steierwald, G.,
Köhler, U.,
Zackor, H., 1975** *Verkehrstechnische Voraussetzungen zur Entwicklung eines Abstandswarngerätes*
Gutachten für das Bundesministerium für Forschung und Technologie
- Leutzbach, W.,
Steierwald, G.,
Zackor, H.,
Jahnke, C.-D., 1981** *Felderprobung autarker Abstandswarngeräte - verkehrstechnische Untersuchung*
Forschungsauftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie
- Meinefeld, P., 1976** *Untersuchung des Verkehrsablaufs an Ausfahrten von planfreien Knotenpunkten mit Spursubtraktion*
Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 213, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- Michaels, R.M., 1965** *Perceptual Factors in Car Following*
Proceedings 2nd International Symposium Theory of Road Traffic Flow 1963, OECD Paris 1965, S.44-59

- Michaels, R.M.,
Cozan, L.W., 1963 *Perceptual and Field Factors Causing Lateral Displacement*
Highway Research Board, Highway Research Record
Number 25, S. 1-13
- OECD, 1990 *Behavioural Adaptations to Changes in the Road Transport System*
Road Transport Research, Organisation for Economic Co-
Operation and Development, Paris
- Persaud, B.N.,
Hurdle, V.F., 1991 *Freeway Capacity: Definition and measurement issues*
in: Highway Capacity and Level of Service, Proceedings
of the First International Symposium on Highway Capacity,
Karlsruhe, Juli 1991, ISBN 9054100117
- Querejeta Iraola, A.,
Reiter, U., 1992 *Interurban Control and Road Utilisation Simulation - Calibration, Validation and Testing of the Multi-Lane Model*
E.C. DRIVE Contract No. V 1052, Deliverable of Work
Package 6.1, Brüssel
- Reiter, U., Theis, C.,
Vortisch, P., 1994 *Verkehrsflußsimulation*
Abschlußbericht des FuE-Auftrages B 2418, Auftraggeber
Robert Bosch GmbH
- Rekersbrink, A., 1994 *Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität
Karlsruhe, Heft 51, ISSN 0341-5503
- Reuschel, A., 1950 *Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug*
Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins, Wien
- Roeca, W., Todosiev, E.,
Barbosa, L., 1962 *Development of an Electronic Highway System*
Highway Research Board, Bulletin 338, Electronics in
Traffic Operation
- Roeca, W.,
Thomas, A., 1963 *An Anti-Rear-End Collision System*
Highway Research Record, Number 10, S. 1-9
- Schnittger, S., 1991 *Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 45,
ISSN 0341-5503

- Schlums, J., 1955** *Untersuchung des Verkehrsablaufs auf Landstrassen*
Lehrstuhl und Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der TH Hannover
- Schwerdtfeger, T., 1987** *Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen*
Forschungsberichte des Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg
- Sparmann, U., 1978** *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*
Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 263, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- Todosiev, E.P., 1963** *The Action Point Model of the Driver-Vehicle System*
Engineering Experiment Station, The Ohio State University Columbus, Report No. 202A-3
- Ullmann, W., 1979** *Ein Beitrag zur regelungstheoretischen Analyse dynamischer Vorgänge in Fahrzeugkolonnen*
Dissertation an der Fakultät für Technik und Naturwissenschaften der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" in Dresden
- Vortisch, P., 1992a** *Erweiterung eines mikroskopischen Straßenverkehrsflußmodells um Komponenten taktischen Fahrverhaltens*
Studienarbeit am Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe
- Vortisch, P., 1992b** *Verkehrsflußsimulation zur Verkehrsvorhersage*
Diplomarbeit am Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe
- White, W., 1957** *Backward Waves in Highway Traffic Jams*
Proceedings of the IRE 1957
- Wiedemann, R., 1968** *Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen*
Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 74, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- Wiedemann, R., 1974** *Simulation des Straßenverkehrsflusses*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, ISSN 0341-5503

- Wiedemann, R., 1987 *Wie sicher ist ein Fundamentaldiagramm?*
in: 25 Jahre Institut für Verkehrswesen, Schriftenreihe des
Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe,
Heft 36, ISSN 0341-5503
- Wiedemann, R., 1992 *Simulationstechnik I und II*
Vorlesung am Institut für Verkehrswesen, Universität
Karlsruhe
- Wiedemann, R.,
Querejeta Iraola, A.,
1989 *Untersuchung der Auswirkung einer Geschwindigkeitsbe-
schränkung für PKW ohne geregelten Katalysator auf den
Verkehrsablauf auf Autobahnen durch Simulation*
Untersuchungsauftrag Nr. 89/2061/V 1.2 der Bundes-
anstalt für Straßenwesen
- Willmann, G., 1978 *Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen*
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität
Karlsruhe, Heft 19, ISSN 0341-5503
- Young, W., Taylor,
M.A.P., P.G. Gipps, 1989 *Microcomputers in Traffic Engineering*
Research Studies Press Ltd., ISBN 0 86380 084X
- Zackor, H., 1993 *Der Beitrag von PROMETHEUS zur intelligenten Straße*
in "Die intelligente Straße - Möglichkeiten und Grenzen",
Schriftenreihe der DVWG, B 159, S. 59-74
- Zimmermann, H.-J., 1993 *Prinzipien der Fuzzy-Logic*
Spektrum der Wissenschaft, März 3/1993, S. 90-95

A. Anhang

Dieser Anhang enthält Diagramme und Abbildungen, die im fortlaufenden Text der Arbeit nicht enthalten sind. Es handelt sich dabei um beispielhafte Darstellungen von Zusammenhängen oder Sachverhalten, die für den Haupttext zu detailliert wären, bzw. um Darstellungen, die wegen des geringen Informationsgehalts im Haupttext nicht gezeigt wurden, die der Vollständigkeit halber aber hier nun angefügt sind. Der Anhang teilt sich in zwei Hauptabschnitte: der erste Abschnitt behandelt Verfahren und Ergebnisse im Zusammenhang mit der Auswertung der empirischen Meßdaten, der zweite enthält zusätzliche Diagramme aus den Ergebnissen der Simulationsläufe.

A1. Abbildungen und Diagramme der Auswertung der empirischen Daten

In den Kapiteln 4 und 5 sind die Ergebnisse der Auswertung der Messungen dargestellt worden. Die Verfahren der Meßdatenaufnahme und der Datenauswertung wurden dort vorgestellt, Probleme und Meßfehler oder -ungenauigkeiten wurden kurz diskutiert. Im folgenden finden sich noch einige ergänzende Darstellungen, die die Verarbeitung der Rohdaten hin zu verwertbaren Daten veranschaulichen und einige der bei der Verarbeitung auftretenden Schwierigkeiten aufzeigen, sowie beispielhafte Darstellungen des Parameters Eigenbeschleunigung, die wegen des geringen Informationsgehalts im Prozeß der Modellkalibrierung und -validierung nicht verwendet werden konnten.

A1-1 Beispiel für ein Meßprofil und Diskussion der darin enthaltenen Meßfehler und Ungenauigkeiten

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft ein Meßprofil im Rohformat. Dargestellt sind 5 Minuten aus einer Meßdatei und zwar die Meßgrößen eigene Geschwindigkeit und Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs, erstere als dickere Linie, letztere als dünnere.

Deutlich zu erkennen sind die starken Schwankungen bei den gemessenen Geschwindigkeitswerten beim Vorausfahrenden: kleine Schwankungen resultieren aus Meßungenauigkeiten, größere Meßwertsprünge rühren daher, daß der Sensor das Objekt verliert bzw. ein anderes Objekt erfaßt. Zu erkennen ist das kurzzeitige Erfassen eines anderen Objekts (bezeichnet mit a), Meßaussetzer, in denen das vorausfahrende Fahrzeug vom Sensor verloren wird und kurz darauf wieder erfaßt wird (bezeichnet mit b), sowie Situationen, in denen nicht das Fahrzeug erfaßt wird, auf das der Fahrer reagiert: die mit c bezeichnete Reaktion bezieht sich auf ein Vorderfahrzeug, das erst ab d eindeutig erfaßt wird.

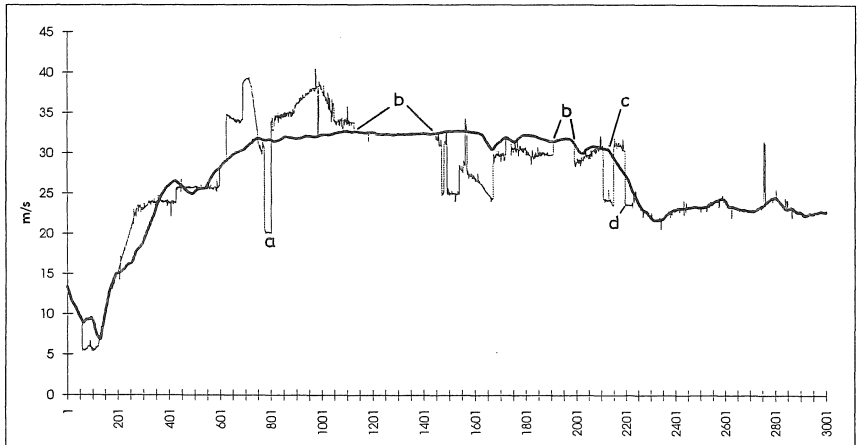


Abb. 1: 5-Minuten-Ausschnitt aus einer Meßdatei: eigene Geschwindigkeit und Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs im Rohformat

In den folgenden Abbildungen wird die Wirkung des für die Meßauswertung entwickelten Software-Filters veranschaulicht. Mit diesem Filter werden Meßwertsprünge erkannt (einstellbar über Schwellenwerte), und falls durch einen späteren Sprung die Meßwerte wieder in einen ähnlichen Bereich zu liegen kommen, wie vor dem ersten Sprung, so wird geprüft, ob es sich ggf. um die Wiedererfassung desselben Objekts wie vor dem ersten Sprung handelt. Es wird geprüft, ob die Situationen vor dem ersten und nach einem späteren Sprung kinematisch ineinander überführbar sind, auch dies kann durch Angabe von Grenzen, z.B. der möglichen Beschleunigungswerte, eingestellt werden. Zusätzlich kann eine maximal zulässige zeitliche Unterbrechung eingestellt werden. Falls der Rücksprung zu kinematisch erklärbaren Werten innerhalb dieses zulässigen Zeitintervalls geschieht, werden die Meßwerte zwischen den Sprüngen ersetzt durch zwischen den beiden Situationen linear interpolierte Werte.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft an einer Meßwertkurve, die die Geschwindigkeit des Vorausfahrenden beschreibt, die Wirkung des Filters bei unterschiedlichen zulässigen Intervalllängen des Unterbrechung: 1s, 2s, 3s und 5s.

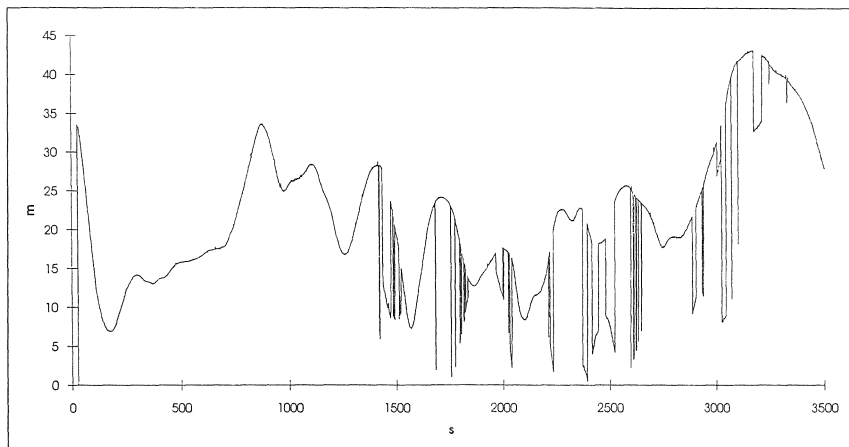


Abb. 2: Rohform einer Meßwertkurve

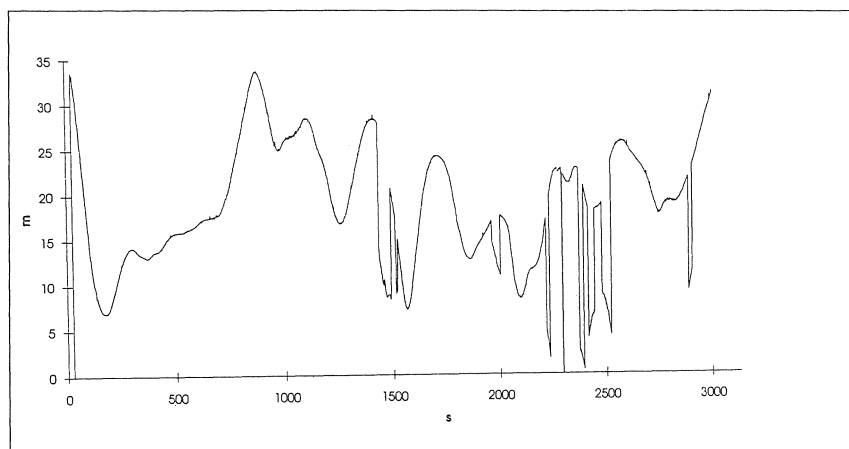


Abb. 3: Meßwerte gefiltert, zulässiges Intervall: 1 Sekunde

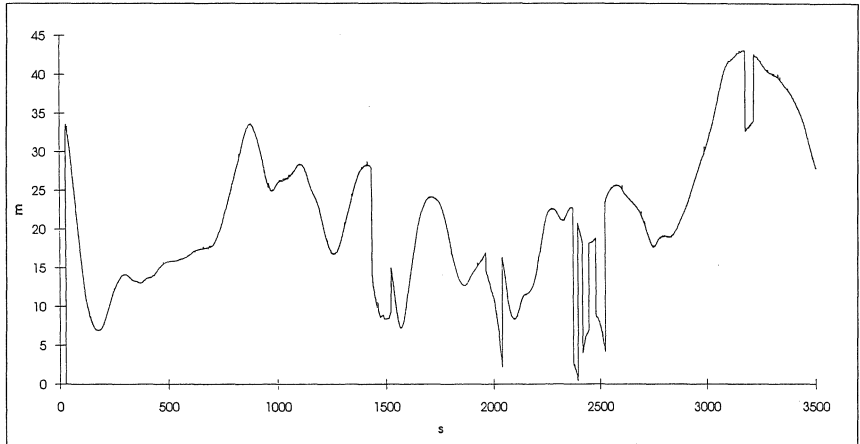


Abb. 4: Meßwerte gefiltert, zulässiges Intervall: 2 Sekunden

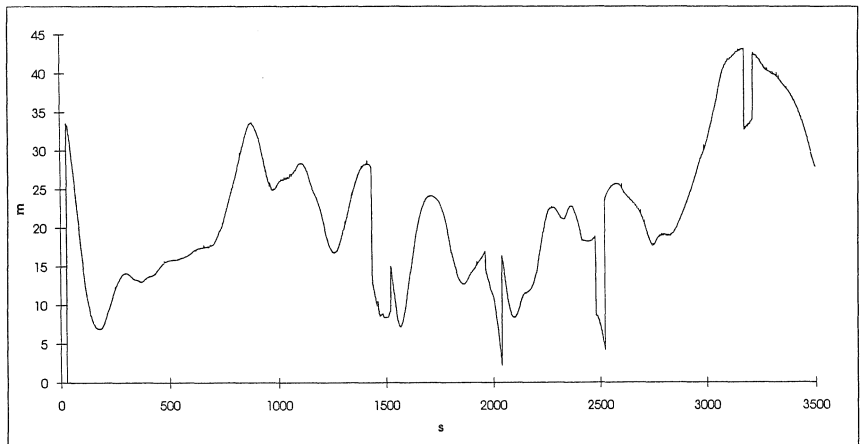


Abb. 5: Meßwerte gefiltert, zulässiges Intervall: 3 Sekunden

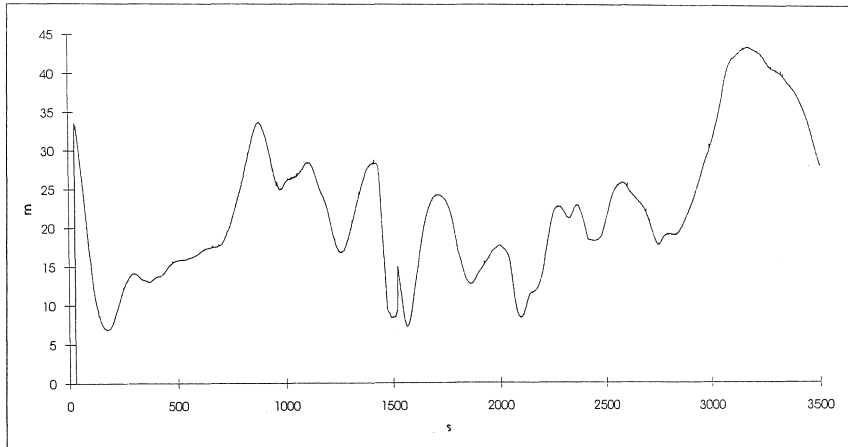


Abb. 6: Meßwerte gefiltert, zulässiges Intervall: 5 Sekunden

A1-2 Beispiel für sofortige Reaktion bei erzwungenen Annäherungsvorgängen

In Kapitel 4 der Arbeit wurde diskutiert, in welcher Form Annäherungsvorgänge bei den ersten beiden Meßserien herbeigeführt wurden, und wie diese in der dritten Serie erzwungen wurden. Ebenfalls wurde dort diskutiert, welche Auswirkungen dies auf die Meßergebnisse hatte: oftmals konnte die Reaktion des Fahrers unmittelbar nach Eintreten der Änderung bzw. nach Erfassen des Vorderfahrzeugs durch den Sensor festgestellt werden. Derartige Reaktionen konnten als Aktionspunkte zur Bestimmung der Modellschwellen nicht verwendet werden.

Die folgende Abbildung zeigt ein typisches Beispiel für eine derartige sofortige Reaktion: dargestellt sind wiederum die Profile der eigenen Geschwindigkeit (dicke Linie) und der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden (dünnere Linie) aus einer Messung der zweiten Serie. Gut 5 Sekunden nach Beginn des dargestellten Ausschnitts kann ein kinematisch nicht erklärbarer Sprung in den Meßwerten der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden festgestellt werden, der auf einen Wechsel des vorausfahrenden Fahrzeugs hindeutet (Geschwindigkeiten vor dem Sprung über 45 m/s und nach dem Sprung um 35 m/s). Ob es sich hier um einen Wechsel zum langsameren Fahrstreifen handelt oder um das Herüberwechseln eines langsameren Fahrzeugs auf den eigenen Fahrstreifen, kann aus den Meßprofilen nicht entnommen werden. Es spielt auch keine Rolle in der Bewertung des Geschehenen: der Fahrer hat unmittelbar nach Eintreten der Änderung mit dem Beginn der Geschwindigkeitsreduzierung begonnen (Knick im Profil: Pfeil). Derartige erzwungene Annäherungsvorgänge finden sich mehrfach in den Meßprotokollen.

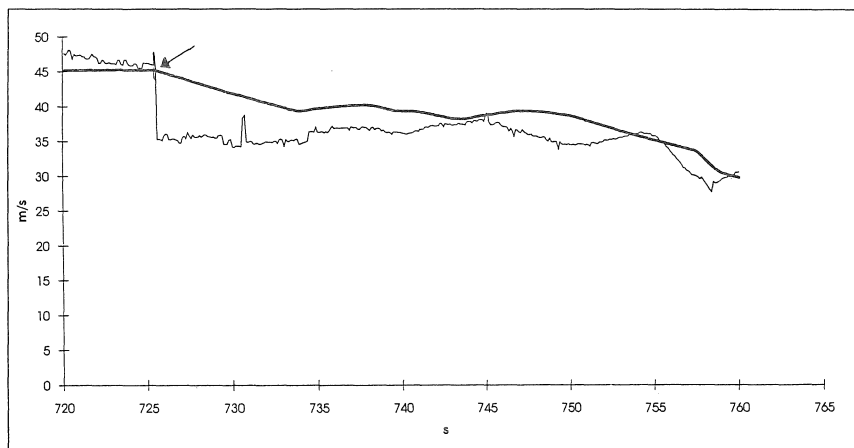


Abb. 7: Sofortige Reaktion nach Eintreten einer Änderung beim Vorausfahren-

A1-3 Beispiel für Verfahren zur Auffindung von Aktionspunkten im Annäherungsverhalten

Ebenfalls in Kapitel 4 wurde beschrieben, in welcher Form die Aktionspunkte des Annäherungsverhaltens in den gemessenen Profilen identifiziert wurden. Diese Aktionspunkte konnten nicht direkt im Phasendiagramm bestimmt werden, sondern wurden als Knick im Geschwindigkeitsprofil erkannt. Der zu dieser Situation zugehörige Abstand wurde aus dem Abstandsprofil abgelesen und damit die Situation im Phasendiagramm bestimmt. Dieses Vorgehen zeigen die nächsten drei Abbildungen 8, 9 und 10. Die darauffolgenden Abbildungen 11 und 12 zeigen ein Beispiel dafür, daß durch direkte Bestimmung der vermeintlichen Verhaltensänderung aus dem Phasendiagramm, nicht die echten Aktionspunkte hätten bestimmt werden können. Die Aktionspunkte, in denen eine Verhaltensänderung im Geschwindigkeitsprofil ablesbar ist liegen bei **a** und **b**, nicht aber am Knick **c** im Phasendiagramm.

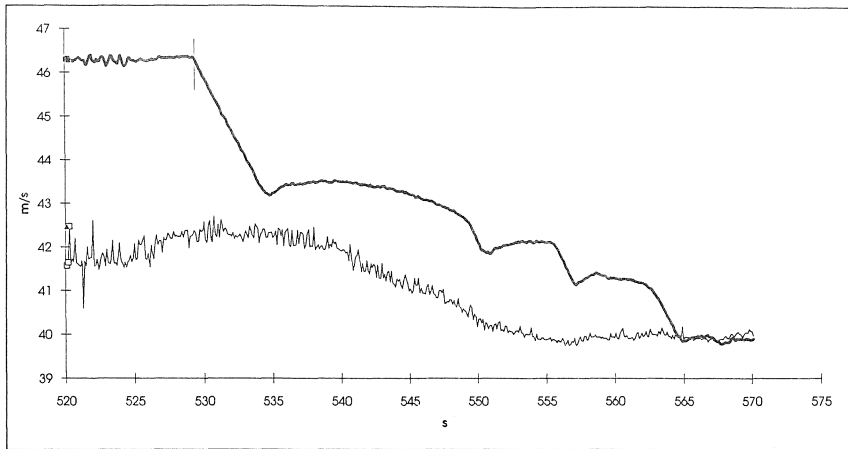


Abb. 8: Geschwindigkeitsprofile zur Bestimmung von Aktionspunkten im Annäherungsverhalten: Verhaltensänderung bei Sekunde 529

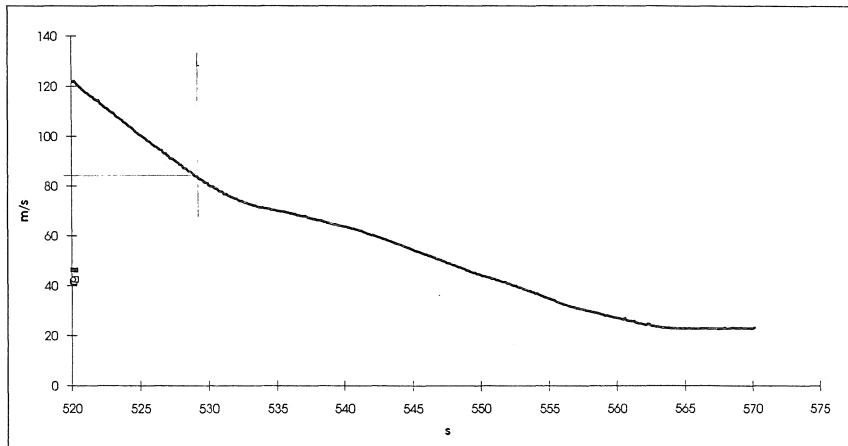


Abb. 9: Zugehöriges Abstandsprofil, in dem der Abstand bei der oben festgestellten Verhaltensänderung bestimmt wird

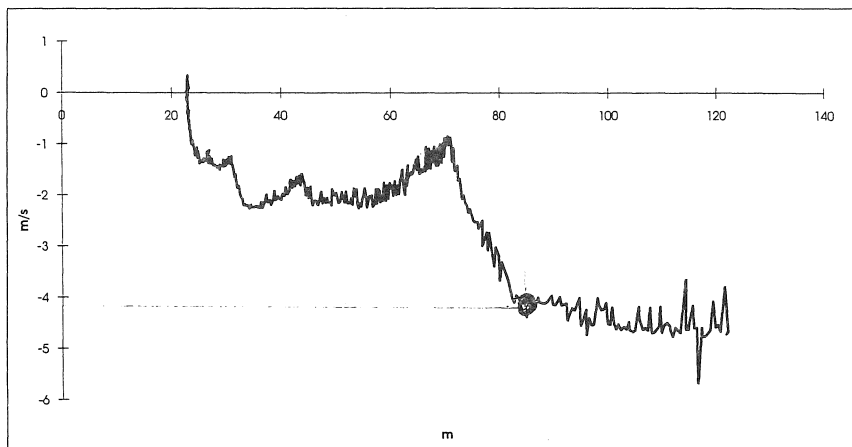


Abb. 10: Bestimmung der festgestellten Situation im Phasendiagramm

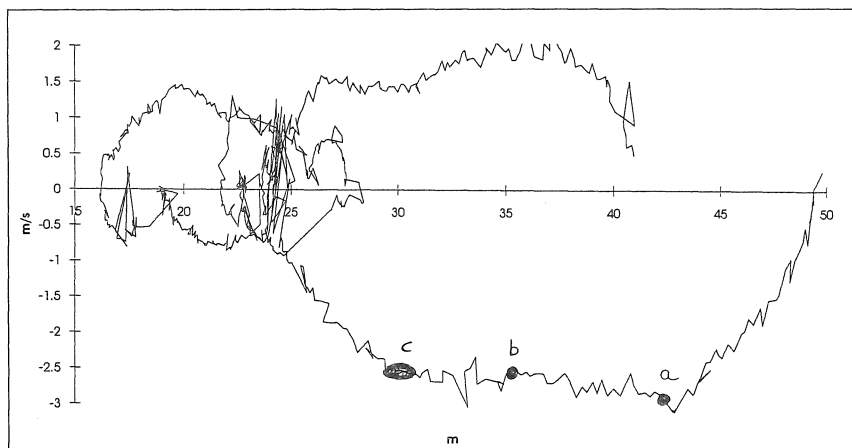


Abb. 11: Ein anderes Phasendiagramm. Aktionspunkte liegen nicht bei Situation c, sondern bei a und b

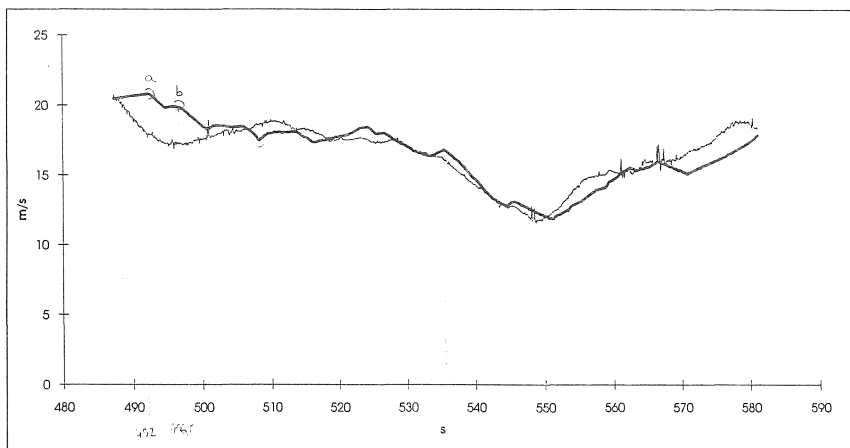


Abb. 12: Dazugehöriges Geschwindigkeitsprofil mit Aktionspunkten a und b. Situation c ist nicht als Verhaltensänderung im Profil erkennbar

A1-4 Beispielhaftes Beschleunigungsprofil

Die erhobenen Werte eigener Beschleunigung konnten, wie im Haupttext bereits dargestellt, zu einer Kalibrierung des Modells nicht verwendet werden. Ursache hierfür sind zum einen die starken Schwankungen der gemessenen Werte, zum anderen die recht grobe Quantisierung der abgespeicherten Werte ($1/8 \text{ m/s}^2$), die eine Bestimmung z.B. der Modellgröße b_{null} unmöglich machen.

In diesen beiden Abschnitten soll dies veranschaulicht werden. Die folgende Abbildung 13 zeigt ein Beispiel eines 1-minütigen Meßprofils der Rohdaten eigener Beschleunigungswerte. Die starke Streuung der Meßgröße ist zu erkennen. Es wird deutlich, daß aus diesen Rohdaten kaum Information für die Modellkalibrierung gewonnen werden kann.

Abbildung 14 zeigt ein anderes Beispiel eines 1-minütigen Meßprofils, bei dem allerdings die Beschleunigungswerte mittels gleitender Mittelwerte geglättet wurden. Hier ist das Beschleunigungsverhalten deutlicher zu erkennen: zunächst fährt der Fahrer mit leicht positiver bzw. leicht negativer Beschleunigung, erst in den letzten 10 Sekunden findet eine stärkere Verzögerung statt. Obwohl hier die verschiedenen Fahrverhalten deutlich werden (Pendeln um Beschleunigung null, stärkere Verzögerung), können die Werte dieser Darstellungen nicht für die Modellierung verwendet werden, da durch die Glättung gerade die fürs Modell benötigten Extremwerte herausgemittelt werden. Denkbar wäre ein Verfahren, in dem die geglätteten und die ungegätteten Werte parallel betrachtet werden. Meßungenauigkeiten und

Meßfehler sowie die Quantisierung von $1/8 \text{ m/s}^2$ könnten damit aber nicht umgangen werden. Nötig wäre ein Verfahren, in dem die Beschleunigung in kürzeren Intervallen durch Ermittlung der Geschwindigkeitsänderung errechnet wird. Dies wurde in dieser Arbeit aber nicht weiter verfolgt.

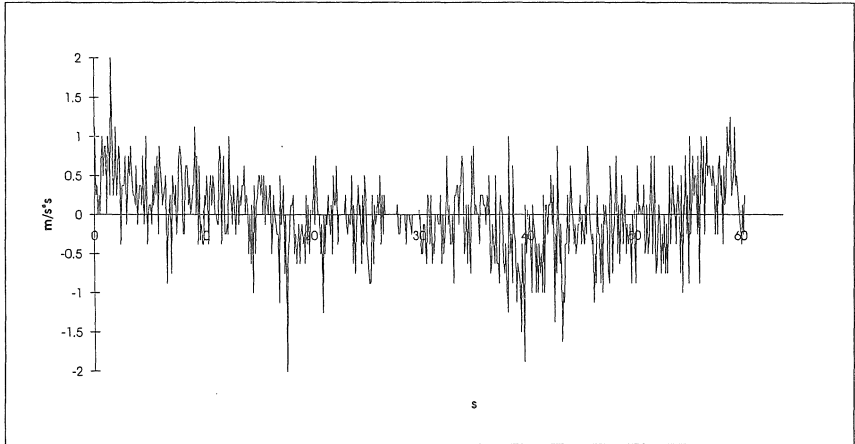


Abb. 13: Beispiel eines 1-minütigen Meßprofils von Rohdaten der Beschleunigung des Meßfahrzeugs

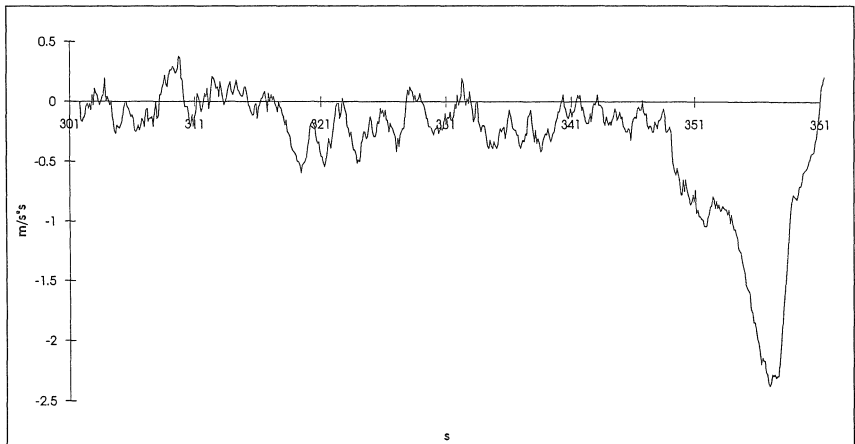


Abb. 14: Beispiel eines geglätteten Meßprofils der Beschleunigung

A1-5 Beispiele für gemessene Häufigkeitsverteilungen des Parameters Beschleunigung

Eine andere Form der Darstellung der gemessenen Beschleunigungswerte ist die der Häufigkeitsverteilung. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft Verteilungen, die jeweils ganze Meßdateien repräsentieren. Hier wird nochmal besonders deutlich, daß durch die grobe Quantisierung, die sich in der Klasseneinteilung der dargestellten Diagramme wiederfindet, keine Information zur Modellkalibrierung gewonnen werden kann.

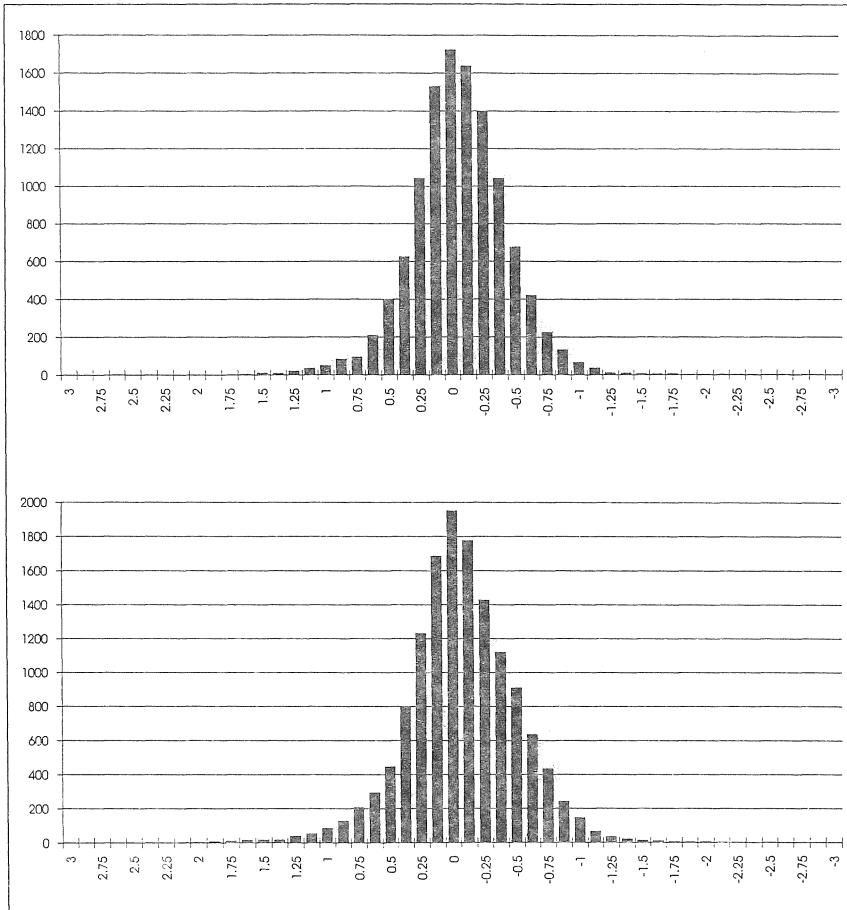


Abb. 15: Häufigkeitsverteilungen der Beschleunigung (ganze Meßdateien)

A2. Abbildungen und Diagramme der simulierten Daten

Bei der Vorstellung der Simulationsergebnisse im Kapitel 7 des Haupttextes wurden im wesentlichen nur die Abbildungen und Diagramme gezeigt, bei denen eine deutliche Veränderung der dargestellten Größen mit zunehmendem Ausrüstungsgrad der simulierten Fahrzeuge feststellbar war. Ergaben sich keine oder nur geringfügige Veränderungen an den ausgewerteten Ergebnisgrößen, wurden diese Veränderungen im Haupttext nur kurz andiskutiert. Aus allen Unterkapiteln von Abschnitt 7.3 des Haupttextes könnten noch fehlende Abbildungen hier angefügt werden. Da aus den meisten jedoch keine neue Information gewonnen werden kann, werden im folgenden ausschließlich die im Haupttext fehlenden Fundamentaldiagramme des Einsatzes der Geschwindigkeitskontrolle dargestellt.

A2-1 Fundamentaldiagramme beim Einsatz der Geschwindigkeitskontrolle

In ähnlicher Weise wie bei den Darstellungen im Haupttext werden im folgenden die Fundamentaldiagramme angefügt, die die Verkehrszustände unter Einfluß des Systems Geschwindigkeitskontrolle charakterisieren. Dargestellt sind in der ersten Abbildung die Ausrüstungsgrade 10%, 20%, 50% und 100% für kontrolliertes Fahren. In der letzten Abbildung sind diesselben Ausrüstungsgrade für unterstütztes Fahren dargestellt, wobei hier wiederum die Bereiche eingetragen sind, die jeweils alle Simulationen mit den verschiedenen Befolungsgraden der Fahrer repräsentieren. Eine deutliche Veränderung, wie z.B. beim System Abstandswarnung oder auch beim kombinierten Einsatz beider Systeme, kann wie bereits angesprochen aus diesen Diagrammen nicht abgelesen werden.

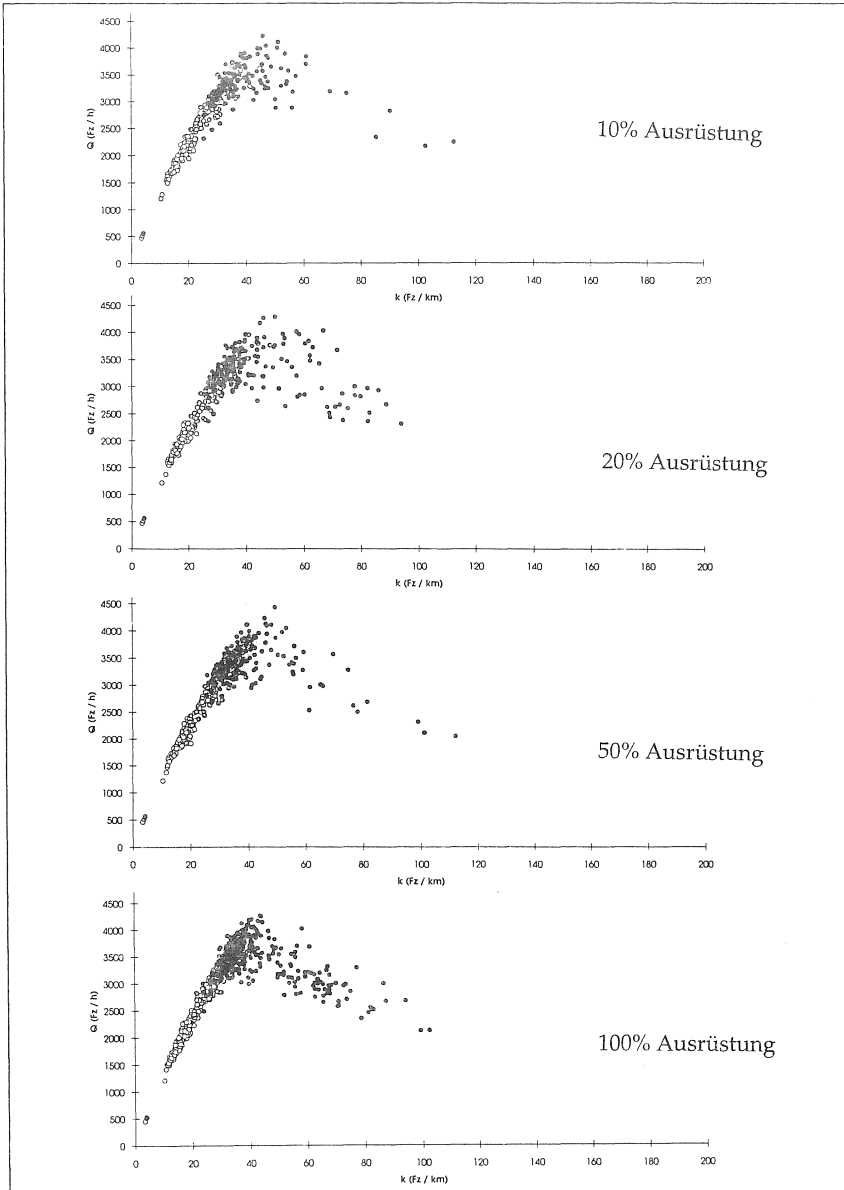


Abb. 16: Fundamentaldiagramme, kontrolliertes Fahren, Geschwindigkeitskontrolle

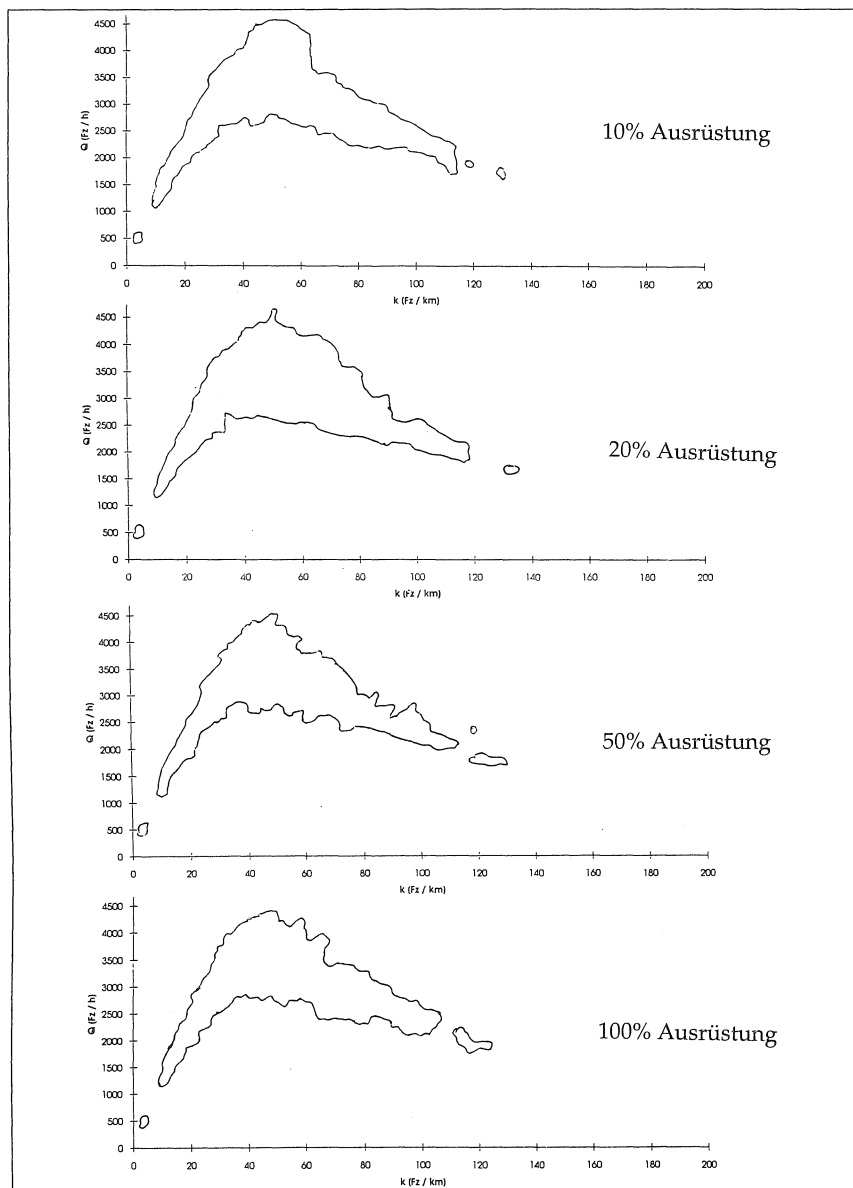


Abb. 17: Fundamentaldiagramme, unterstütztes Fahren, Geschwindigkeitskontrolle

Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

(Die mit * versehenen Veröffentlichungen sind vergriffen)

- Heft 1** **BARON, P.S. (1967): ***
Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen
- Heft 2** **STOFFERS, K.E. (1968): ***
Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen
- Heft 3** **KOEHLER, R. (1968): ***
Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung
- Heft 4** **BÖTTGER, R. (1970): ***
Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signal-gesteuerten Straßenkreuzungen
- Heft 5** **DROSTE, M. (1971):**
Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs
- Heft 6** **10 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESSEN (1972) ***
- Heft 7** **BEY, I. (1972): ***
Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung
- Heft 8** **WIEDEMANN, R. (1974): ***
Simulation des Straßenverkehrsflusses
- Heft 9** **KÖHLER, U. (1974):**
Stabilität von Fahrzeugkolonnen
- Heft 10** **THOMAS, W. (1974):**
Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungsmodells
- Heft 11** **PAPE, P. (1976):**
Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung

- Heft 12** **KOFFLER, TH. (1977):**
Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg
- Heft 13** **HAENICKE, W. (1977): ***
Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit
- Heft 14** **BAHM, G. (1977): ***
Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme
- Heft 15** **LAUBERT, W. (1977):**
Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnhöfen
- Heft 16** **SAHLING, B.-M. (1977): ***
Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren
- Heft 17** **ZAHN, E.M. (1978):**
Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze
- Heft 18** **HANDSCHMANN, W. (1978): ***
Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers
- Heft 19** **WILLMANN, G. (1978): ***
Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen
- Heft 20** **SPARMANN, U. (1980): ***
ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose
- Heft 21** **ALLSOP, R.E. (1980): ***
Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen
- Heft 22** **ADOLPH, U.-M. (1981): ***
Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen

- Heft 23** **JAHNKE, C.-D. (1982): ***
Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstands-
warnsystemen
- Heft 24** **LEUTZBACH, W. (1982): ***
Verkehr auf Binnenwasserstraßen
- Heft 25** **20 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN (1982) ***
- Heft 26** **HUBSCHNEIDER, H. (1983): ***
Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und
Öffentlichen Personennahverkehr
- Heft 27** **MOTT, P. (1984): ***
Signalsteuerungsverfahren zur Priorisierung des Öffentlichen
Personennahverkehrs
- Heft 28** **MAY, A.D. (1984):**
Traffic Management Research at the University of California
- Heft 29** **HAAS, M. (1985):**
LAERM - Mikroskopisches Modell zur Berechnung des
Straßenverkehrslärms
- Heft 30** **BOSSERHOFF, D. (1985):**
Statistische Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen
im Öffentlichen Personennahverkehr - Ein Vergleich
- Heft 31** **BAASS, K. (1985): ***
Ermittlung eines optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrs-
straßen
- Heft 32** **BENZ, TH. (1985):**
Mikroskopische Simulation von Energieverbrauch und Abgas-
emission im Straßenverkehr (MISEVA)
- Heft 33** **STUCKE, G. (1985):**
Bestimmung der städtischen Fahrtenmatrix durch Verkehrs-
zählungen

- Heft 34** **YOUNG, W. (1985):**
Modelling the Circulation of Parking Vehicles - A Feasibility Study
- Heft 35** **GIPPS, P.G. (1986):**
Simulation of Pedestrian Traffic in Buildings
- Heft 36** **25 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESSEN (1987) ***
- Heft 37** **MÖLLER, K. (1986): ***
Signalgruppenorientiertes Modell zur Optimierung von Festzeitprogrammen an Einzelknotenpunkten
- Heft 38** **BLEHER, W.G. (1987):**
Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug - Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation
- Heft 39** **MAIER, W. (1988):**
Bemessungsverfahren für Befragungszählstellen mit Hilfe eines Warteschlangenmodells
- Heft 40** **AXHAUSEN, K. (1989):**
Eine ereignisorientierte Simulation von Aktivitätenketten zur Parkstandswahl
- Heft 41** **BECKER, U. (1989): ***
Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus: Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen
- Heft 42** **HEIDEMANN, D. (1989):**
Ein mathematisches Modell des Verkehrsflusses
- Heft 43** **ALY, M.S. (1989):**
Headway Distribution Model and Interrelationship between Headway and Fundamental Traffic Flow Characteristics
- Heft 44** **ZOELLMER, J. (1991):**
Ein Planungsverfahren für den ÖPNV in der Fläche

- Heft 45** **SCHNITTGER, ST. (1991):**
Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen
- Heft 46** **HSU, T.P. (1991):**
Optimierung der Detektorlage bei verkehrsabhängiger Lichtsignalsteuerung
- Heft 47** **GRIGO, R. (1992):**
Zur Addition spektraler Anteile des Verkehrslärms
- Heft 48** **30 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN (1992)**
- Heft 49** **LIU, Y. (1994):**
Eine auf FUZZY basierende Methode zur mehrdimensionalen Beurteilung der Straßenverkehrssicherheit
- Heft 50** **HÖFLER, F. (1994):**
Leistungsfähigkeit von Ortsdurchfahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen - untersucht mit Hilfe der Simulation
- Heft 51** **REKERSBRINK, A. (1994):**
Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten
- Heft 52** **NICKEL, F. (1994)**
Stationsmanagement von Luftverkehrsgesellschaften - Eine systemanalytische Betrachtung und empirische Untersuchung der Stationsmanagement-Systeme internationaler Luftverkehrsgesellschaften
- Heft 53** **REITER, U. (1994)**
Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrbeeinflussungssystemen

Im Buchhandel erhältlich:

LENZ, K.-H.; GARSKY, J. (1968):

Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg

LEUTZBACH, W. (1972):

Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses,
Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York,
ISBN 3--540-05724-2

BECKMANN, H.; JACOBS, F.; LENZ, K.-H.; WIEDEMANN, R.; ZACKOR, H. (1973):

Das Fundamentaldiagramm,
Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg,
ISBN 3-7812-0846X

HERZ, R.; SCHLICHTER, H.G.; SIEGENER, W. (1976):

Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner,
Werner-Ingenieur-Texte 42, Werner-Verlag, Düsseldorf,
ISBN 3-8041-1934-4

2., neubearbeitete und erweiterte Auflage (1992) ISB N 3-8041-1971-9

RUPPERT, W.-R.; LEUTZBACH, W.; ADOLPH, U.-M. et al. (1981):

Achslasten und Gesamtgewichte schwerer Lkw -
Nutzen-Kosten-Untersuchung der zulässigen Höchstwerte,
Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln,
ISBN 3-88585-035-4

WIEDEMANN, R.; HUBSCHNEIDER, H. (1987):

Simulationsmodelle
In: LAPIERRE, R; STEIERWALD, G. (Hrsg.) "Verkehrsleittechnik für
den Straßenverkehr", Band 1, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-
New York, ISBN 3-540-16850-8

LEUTZBACH, W. (1988):

Introduction to the Theorie of Traffic Flow,
Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-17113-4

Institut für Verkehrswesen (1991):

Fachwörterbuch terminus Traffic and Transport Systems - Verkehrswesen,
English - German - Deutsch - Englisch,
Verlag Ernst & Sohn, Berlin, ISBN 3-433-02824-9

ZUMKELLER, D. et al.(1993):

Part I: Europe: A Heterogeneous 'Single Market' und Part III: Germany:
On the Verge of a New Era,

In: SALOMON, I.; BOVY, P.; ORFEUIL, J.-P. (Hrsg.): "A Billion Trips
a Day - Tradition and Transition in European Travel Patterns",
Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, ISBN 0-7923-229-5

Sonderheft zum 20jährigen Jubiläum (1982) *

Ein Institut stellt sich vor.

Institut für Verkehrswesen (Hrsg.), Universität Karlsruhe

Abriß des Lebens- und Bildungsganges

- 1962 Geburt am 3. September 1962 in Sorengo (TI), Schweiz
- 1968 - 1980 Besuch der Europäischen Schule in Varese (Italien)
- 1980 Abschluß der Schulausbildung mit Abitur (Baccalauréat Européen) in der Studienabteilung Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Neusprachlich im Juli
- 1980 - 1989 Studium der Informatik an der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH) mit Studienschwerpunkten Datenbanksysteme / Informationssysteme, Dialogsysteme/Graphische Datenverarbeitung, Begriffliche und logische Grundlagen und Robotik sowie dem Ergänzungsfach Verkehrswesen
- 1986 - 1989 Im August und September 1986 Ausbildung zum Wagenführer für alle Schienenfahrzeuge bei den Verkehrsbetrieben Karlsruhe und von da an bis Juni 1989 tätig als Aushilfs-Wagenführer
- 1989 Abschluß des Studiums der Informatik mit der letzten Diplomprüfung am 22. Juni 1989
- 1989 - 1994 Ab 1. Juli 1989 als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Verkehrswesen, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe (TH)
- 1994 Am 8. Juli 1994 Doktorprüfung