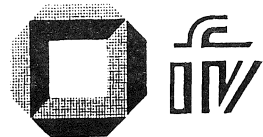


Andreas Rekersbrink

**Verkehrsflußsimulation
mit Hilfe der Fuzzy-Logic
und einem Konzept
potentieller Kollisionszeiten**

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



Schriftenreihe Heft 51/94 ISSN 0341-5503

Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

der Fakultät für

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

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.Wi.-Ing. Andreas Rekersbrink
aus Erlangen

Tag der mündlichen Prüfung: 18. April 1994
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Wiedemann
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brilon

Karlsruhe 1994

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe. Sie wurde durch Fördermittel der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermöglicht.

Mein herzlicher Dank gilt zunächst Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Wiedemann für die Übernahme des Referats. Durch seine Art der Betreuung, größtmögliche Freiheit bei der Projektrealisierung mit steter Bereitschaft zu wissenschaftlicher Diskussion zu verbinden, hat er den Rahmen für eine fruchtbare Arbeitsumgebung geschaffen. Danken möchte ich ebenso dem Korreferenten Herrn Professor Dr.-Ing. Werner Brilon, der eine weitere kritische Durchsicht der Arbeit besorgte.

Wertvolle Denkanstöße ergaben sich auch bei vielfältigen Diskussionen im Kollegenkreis, mit dem der Gedankenaustausch durch ein angenehmes Arbeitsklima stets gefördert wurde. Desgleichen möchte ich an dieser Stelle Peter Berlin, Hans-Georg Puls und Ludger Wetzel erwähnen, die mir bei den umfangreichen Programmierarbeiten und Meßauswertungen unverzichtbare Dienste geleistet haben.

Kurzfassung

Rekersbrink, Andreas:

**Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logik und einem
Konzept potentieller Kollisionszeiten**

147 Seiten, 57 Abbildungen, 15 Tabellen, 68 Quellen

Mikroskopische Verkehrssimulation beruht auf der Modellierung einzelner Fahrer-Fahrzeug-Elemente, die in der vorliegenden Arbeit als Fuzzy-Regler formuliert sind. Dabei finden wahrnehmungsphysiologische Möglichkeiten und Grenzen visueller Informationsaufnahme besondere Berücksichtigung. Dem Tatbestand, daß ein Fahrzeugführer zur Bewältigung verschiedener Fahraufgaben Entscheidungen auch bei ungenauen und z.T. unsicheren Informationen treffen muß, wird durch den Einsatz von Fuzzy-Variablen Rechnung getragen, die diese Unschärfe einer numerischen Bearbeitung leichter zugänglich machen. Ein solcher Fuzzy-Regler läßt sich durch Veränderung oder Erweiterung des zugehörigen Regelkatalogs komfortabel, relativ leicht verständlich und vor allem entkoppelt von der eigentlichen Reglerimplementation in seinen Eigenschaften anpassen.

Als zentrale Variable für die Modellierung des Fahrverhaltens bei Fahrzeugfolge und Fahrstreifenwechsel wird die "Potentielle Kollisionszeit" benutzt, die zu einem bestimmten Zeitpunkt einer verbleibenden Restzeit bis zur Kollision bei unveränderten kinematischen Verhältnissen entspricht. Diese potentielle Kollisionszeit ist unmittelbar aus den dynamischen Änderungen im Gesichtsfeld eines Fahrzeugführers ableitbar und erlaubt im Zusammenhang mit ihrer zeitlichen Veränderung die Bewältigung auch anspruchsvoller Fahrsituationen. Verschiedene empirische Messungen von potentiellen Kollisionszeiten unterstreichen die besondere Bedeutung dieser Größe, auf deren formale Eigenschaften ausführlich eingegangen wird.

Die Arbeit beschreibt die notwendigen Fuzzy-Variablen und die Positionierung und Gestaltung der entsprechenden Fuzzy-Mengen sowie Kon-

trollinstrumente zur Überwachung der Eigenschaften des Fuzzy-Reglers. Für eine zweistreifige Richtungsfahrbahn (Schnellstraße) wird anhand von Verteilungen einzelner Parameter (z.B. potentielle Kollisionszeiten beim Fahrstreifenwechsel) und durch makroskopische Kenngrößen (z.B. q-v-Diagramm, Fahrstreifenwechsel-Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke) im Vergleich mit empirischen Daten die Qualität des Modells überprüft. Es erlaubt unter Berücksichtigung physiologischer Wahrnehmungsgrenzen eine realitätsnahe Fahrer-Modellierung, deren Komponenten auf Simulationsmodelle ähnlicher Thematik übertragbar sind.

Summary

Rekersbrink, Andreas:

Traffic Flow Simulation Using Fuzzy-Logic and a "Time-to-Collision" Concept

147 pages, 57 figures, 15 tables, 68 references

Microscopic traffic flow simulation is based on a model of single driver-car-elements which are implemented in this approach as fuzzy-controllers. This model takes into account the possibilities and limits of physiological perceptions. Under normal conditions a driver must make decisions with uncertain information and varying driving tasks. This condition may be more easily expressed with a computer by using fuzzy variables to describe the relevant parameters of a driver model. A fuzzy-controller may be comfortably optimized by modifying or extending the affiliated control catalogue.

To improve the modeling of driver behaviour in car-following and lane-changing processes a "time-to-collision" concept is introduced. On the one hand "time-to-collision" may be calculated as a quotient of actual following distance and actual speed difference. On the other hand it may be directly obtained from dynamic changes in the driver's angle of vision. Using this variable in combination with its first derivative the implemented driver model is capable of managing even critical traffic situations. Some actual traffic condition measurements verify the significance of this new variable of which some peculiarities are discussed in detail.

A description of all implemented fuzzy variables, of shape and position of the corresponding fuzzy sets, and of interdependencies between these variables is given, as are some tools to monitor the controller performance. The model is applied to simulate traffic flow on a two-lane carriageway. Performance and quality of the model are shown by microscopic distributions (e.g. time-to-collision distribution for lane-changing situations) and by macroscopic flow parameters (e.g. flow-

density-diagram, frequency of lane-changing due to traffic volume). A realistic driver model is presented which respects physiological perception limits and whose components are transferable to other similar simulation models.

Sommaire

Rekersbrink, Andreas:

Simulation du débit de circulation avec l'aide de la logique Fuzzy et un concept des temps de collision potentiels

147 pages, 57 illustrations, 15 tableaux, 68 références

La simulation microscopique du débit de circulation repose sur le modèle de différents éléments de véhicules et de conduite qui sont mis en examen comme le définit le régulateur Fuzzy. Là se trouvent des possibilités de perception physiologiques et des limites de réception d'informations visuelles à prendre en considération. Qu'un conducteur doit prendre différentes décisions de conduite, aussi lors d'informations inexactes et parfois incertaines, lors de cette état de chose, seront portées par l'intervention à l'ordinateur des données variables Fuzzy, qui rendent plus facilement accessible cette indécision qu'un traitement numérique. Un tel régulateur peut être optimisé aisément par modification ou extension des règles de base du catalogue.

Le temps de collision potentiel sera utilisé comme variable centrale pour modeler le comportement du conducteur, lors de suite de véhicules et de changement de voie de circulation. Il correspond jusqu'à un certain moment à un temps intermédiaire jusqu'à la collision lors de conditions cinématique inchangées. Ce temps de collision potentiel est immédiatement dérivable par les changements dynamiques dans le champs de vision de conducteur et permet en liaison avec sa fluctuation temporelle de dompter des situations particulières. Différentes mesures empiriques de temps de collision potentiel font ressortir la signification particulière de cette ampleur pour lesquelles de qualités formelles sont traitées en détail.

Ce travail décrit les variables Fuzzy nécessaires, le positionnement et la réalisation de la multitude des paramètres Fuzzy, ainsi que des instruments de contrôle pour la surveillance des propriétés du régulateur Fuzzy. La qualité et la performance de ce modèle seront contrôlées en plus lors

de la répartition de différents paramètres (p.ex., temps de collision potentiel lors de changement de voie) et par l'ampleur d'identifications macroscopiques (p.ex., diagramme de densité de débit, fréquence de changement de voie due à l'affluence du trafic) en comparaison avec des données empiriques. Il permet en tenant compte des limites de perception physiologiques un modelé du conducteur très près de la réalité dont les constituants sont transmissible sur les modèles de simulation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	4
2.1	Elemente mikroskopischer Verkehrssimulationsmodelle: Fahrzeugfolge und Fahrstreifenwechsel	4
2.2	Einführung in die Theorie unscharfer Mengen (Fuzzy Sets Theory)	9
2.3	Beispiel für einen einfachen Fuzzy-Regler	12
2.4	Konzept der potentiellen Kollisionszeiten	17
2.5	Potentielle Kollisionszeiten und physiologische Grenzen der Wahrnehmung	24
2.6	Konzept der inter- und intrapersonell variierenden Reak- tionszeiten	30
3	Das Modell: Fahrer-Fahrzeug-Elemente als Fuzzy- Regler	34
3.1	Eingangs- und Ausgangsvariable des Fuzzy-Reglers	36
3.2	Interaktionspartnerwahl	38
3.3	Reaktionsfrequenz und Organisation aufeinanderfolgender Reaktionszeiten	43
3.4	Beschreibung des Fahrverhaltens	46

4	Implementierung des Modells und Datengrundlage	51
4.1	Generierung von Fahrer-Fahrzeug-Elementen, Berechnung von Reaktionszeiten und Beschleunigungsgrenzwerten	53
4.2	Messung potentieller Kollisionszeiten	59
4.2.1	Messung potentieller Kollisionszeiten durch Entfer- nungsmessung mit Radarsensoren	59
4.2.2	Messung potentieller Kollisionszeiten durch Video- bild-Auswertung	63
4.3	Ausgestaltung der Modellvariablen	68
4.3.1	Funktionale Zusammenhänge zwischen den Eingangs- variablen	69
4.3.2	Mengendefinitionen der Modellvariablen	72
5	Anwendung und Kontrolle des Modells	86
5.1	Visualisierung des simulierten Verkehrsablaufs	89
5.2	Funktionsüberprüfung des Fuzzy-Reglers	91
5.3	Simulationsergebnisse	96
5.3.1	Verteilungen ausgewählter Modellparameter	97
5.3.2	Makroskopische Kenngrößen	101
6	Zusammenfassung und Interpretation	106
6.1	Fahrgerechte Informationsaufnahme als Modellkern . . .	107
6.2	Vorteile der Fuzzy-Logic für die Modellformulierung . . .	111
6.3	Erweiterungsmöglichkeiten des Modells, Forschungsbedarf	113

7.	Literaturverzeichnis	117
8	Anhang	125
8.1	Herleitungen zur potentiellen Kollisionszeit	125
8.1.1	Äquivalenznachweis für die beiden Definitionen - dx/dv und r/\dot{r} für die potentielle Kollisionszeit	126
8.1.2	Äquivalenznachweis für die beiden Definitionen - dx/dv und $\alpha/\dot{\alpha}$ für die potentielle Kollisionszeit:	127
8.1.3	Herleitung für eine minimale potentielle Kollisionszeit tk_{\min} bei vorgegebener Beschleunigungsdifferenz	128
8.1.4	Herleitung des Grenzwerts tk_g für maximal wahrnehmbare potentielle Kollisionszeiten:	129
8.1.5	Zeitliche Änderung der potentiellen Kollisionszeit (1.Ableitung nach der Zeit)	130
8.2	Messung potentieller Kollisionszeiten mit Hilfe von Videoaufnahmen	131
8.3	Messung visueller Wahrnehmungsgrenzen im Straßenverkehr	136
8.4	Herleitung der Beschleunigungsgrenzwerte $a_{\max}(v)$, $a_{Gw}(v)$ und der geschwindigkeitsabhängigen Verlustleistung	141
8.5	Beispiel für einen Regelkatalog	145

1 Einleitung

Simulation ersetzt die Empirie dort, wo diese aus Aufwandsgründen nur eingeschränkt möglich ist oder wo sie bei der vorausschauenden Untersuchung zukünftiger Entwicklungen bzw. Systemzustände nicht zur Anwendung gelangen kann. Simulation setzt die vereinfachende Modellierung der realen Welt voraus. Dabei legt der Kompromiß zwischen erreichbarer bzw. geforderter Genauigkeit einerseits und überschaubarer sowie mit angemessenem Aufwand darstellbarer Komplexität andererseits den Grad der Vereinfachung fest.

Im Bereich des Verkehrswesens führte die stark zunehmende Motorisierung der letzten Jahrzehnte zu einem wachsenden Interesse an der modellhaften Beschreibung des Straßenverkehrs und damit zu einer Vielzahl von Modellimplementationen, die Verkehrsabläufe für unterschiedlichste Bedingungen nachbilden. Speziell auf dem Gebiet der mikroskopischen Verkehrssimulation, die zur Darstellung des Verkehrsgeschehens auf die Beschreibung einzelner Fahrer-Fahrzeug-Elemente¹ zurückgreift, führte dies parallel zur Evolution rechentechnischer Möglichkeiten zu einem Anstieg der Modellkomplexität. Daraus resultierte ein zunehmender Arbeitsaufwand, die Auswirkungen beteiligter Modellparameter auf das Simulationsergebnis sowie die Wechselwirkungen einzelner Modellparameter untereinander nachvollziehen zu können.

Begreift man Fahrer-Fahrzeug-Elemente als Regelkreise, liegt es nahe, neuere Methoden der Regelungstechnik auf eine Eignung für mikroskopische Verkehrssimulation hin zu untersuchen. Ein erfolgversprechender Ansatz auf dem Gebiet der Regelungstechnik ist die Anwendung der

¹ Ein Fahrer-Fahrzeug-Element (FFE) entspricht einem Modell von Fahrer- und Fahrzeugeigenschaften, die zur Interaktion mit der Straßenumgebung und mit anderen Verkehrsteilnehmern notwendig sind.

Theorie unscharfer Mengen (Fuzzy Sets Theory) zur Beschreibung komplexer Regelkreise. Das grundlegende Konzept dieser Theorie besteht grob skizziert darin, die Kluft zwischen der dem Menschen eigenen, verbalen (und damit kontextabhängigen und unpräzisen) Beschreibungsform von Systemeigenschaften oder Prozeßabläufen und dem Konzept der klassischen Logik zugrundeliegenden Trennschärfe zu überbrücken und mittels geeigneter Verrechnungsmethoden der numerischen Bearbeitung zugänglich zu machen.

Das Ziel der Arbeit ist es zu zeigen, daß die Anwendung der Theorie unscharfer Mengen in Verkehrssimulationssystemen in Form eines Fuzzy-Reglers für jedes zu simulierende Fahrer-Fahrzeug-Element sinnvoll realisierbar ist. Dabei sollen die Eigenschaften von Fuzzy-Reglern, Regelvorgänge verhältnismäßig transparent darstellen und das Reglerverhalten anhand sprachnah formulierter Regelkataloge festlegen zu können, dazu genutzt werden, den Grad der Modellkomplexität so gering wie möglich zu halten. Es wird ein Simulationsmodell entwickelt, das Pkw-Verkehrsabläufe auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen darstellen kann und sich insbesondere auf fahrergerechte Informationsaufnahme zur realitätsnahen Nachbildung menschlichen Fahrverhaltens stützt. Zu diesem Zweck wird insbesondere die Größe "Potentielle Kollisionszeit" eingeführt, die aus physiologischen Rahmenbedingungen visueller Wahrnehmung abgeleitet wird.

Kapitel 2 umfaßt Einführungen in die Gebiete der mikroskopischen Verkehrssimulation und der Theorie unscharfer Mengen sowie Teilaspekte des Fahrverhaltens, die für die Modellformulierung von Bedeutung sind (Wahrnehmung potentieller Kollisionszeiten, Reaktionszeiten bei Fahrvorgängen).

In Kapitel 3 wird das Modell eines Fahrer-Fahrzeug-Elements als Fuzzy-Regler schrittweise entwickelt. Zunächst erfolgt die Spezifikation der notwendigen Modellvariablen und eine systematische Zuordnung von Interaktionspartnern zu einem betrachteten Fahrzeug. Daran schließt sich eine Betrachtung über die Reaktionsfrequenz und die Organisation der

Reaktionszeiten sowie eine Fahrverhaltensbeschreibung an, die als Grundlage für den Regelkatalog des Fuzzy-Reglers dient.

Die Beschreibung der Modellimplementation ist Inhalt von Kapitel 4, in dem auf die Algorithmen zur Berechnung von Reaktionszeiten und Grenzwerten der Beschleunigung und insbesondere auf erstmalig für diesen Zweck durchgeführte Messungen potentieller Kollisionszeiten eingegangen wird. Desweiteren werden die Einzelheiten des Fuzzy-Reglers, die verwendeten Modellvariablen und ihre zugehörigen Mengendefinitionen ausführlich dokumentiert.

Kapitel 5 präsentiert Ergebnisse der Modellanwendung und zeigt, wie die Eigenschaften und Wirkungszusammenhänge des Fuzzy-Reglers kontrolliert und zur modellverfeinernden Rückkopplung verwendet werden können. Vergleiche von empirischen mit durch Simulation gewonnenen Verteilungen einzelner Modellvariablen oder makroskopischer Kenngrößen erlauben eine Einschätzung der Realitätsnähe des vorgestellten Modells.

Die Interpretation der Entwicklungsarbeit und ihrer Ergebnisse faßt Kapitel 6 zusammen. Dort wird auf die Bedeutung einer "fahrergerichten" Informationsaufnahme als Grundvoraussetzung für die Nachbildung menschlichen Fahrverhaltens verwiesen. Anschließend werden die Vorteile angeführt, die sich dabei aus der Verwendung der Theorie unscharfer Mengen im Vergleich zu anderen Modellansätzen ergeben. Ein Abschnitt über zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten des Modells und über den daraus abzuleitenden Forschungsbedarf weist über den Entwicklungsstand des Modells hinaus.

Im Anschluß an die Literaturhinweise (Kapitel 7) finden sich im Anhang (Kapitel 8) unter anderem mathematische Herleitungen zur potentiellen Kollisionszeit, Anmerkungen zur Messung solcher Kollisionszeiten mit Hilfe von Videoaufnahmen, zur Messung visueller Wahrnehmungsgrenzen im Straßenverkehr, die Herleitung zu den im Modell verwendeten Beschleunigungsgrenzwerten sowie ein Beispiel für einen Regelkatalog.

2 Grundlagen

Die in diesem Kapitel zusammengestellten Abschnitte sollen die Nachvollziehbarkeit der eigentlichen Modellentwicklung erleichtern, indem wesentliche Punkte der in dieser Arbeit verknüpften Forschungsinhalte und Ideen in knapper Form präsentiert werden. Zunächst wird ein kurzer Hinweis auf in der Literatur zu findende Modelle der mikroskopischen Verkehrssimulation und den beiden dabei wesentlichen Fahraktionen (Fahrzeugfolge, Fahrstreifenwechsel) gegeben. Einer Einführung in die Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy Sets Theory) folgt ein einfach gehaltenes Beispiel für einen Fuzzy-Regler, an dem die Funktionsweise und die Elemente eines solchen Reglers erläutert werden. Die für die Modellbildung wichtige Größe "Potentielle Kollisionszeit" wird bezüglich ihrer "Vorläufer" in der Literatur und in ihren verschiedenen Darstellungsformen diskutiert und in einem gesonderten Abschnitt unter dem Aspekt menschlicher Wahrnehmungsfähigkeit behandelt. Der letzte Abschnitt weist auf Forschungsergebnisse über Reaktionszeiten im Straßenverkehr hin, die die Grundlage für eine sehr differenzierte Behandlung der Reaktionszeiten im Simulationsmodell liefern.

2.1 Elemente mikroskopischer Verkehrssimulationsmodelle: Fahrzeugfolge und Fahrstreifenwechsel

Bei mikroskopischen Fahrzeugfolgemodellen sind Verhaltensparameter einzelner Fahrer und die beschreibenden Parameter der einzelnen Fahrzeuge Kernbestandteile der Simulationsmodelle. Die Modellierung beschreibt die Interaktion zwischen einzelnen einander folgenden Fahrer-Fahrzeug-Elementen (FFE). Darauf aufbauend ergeben sich mathematische Zusammenhänge für ganze Fahrzeugkolonnen und deren Verhalten bei Störungen. Ausgehend von einer verbal gefaßten Grundgleichung der Fahrzeugfolgetheorie (vgl. HOEFS, 1972)

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

wurden verschiedene mathematische Modelle zur Beschreibung der Fahrzeugfolge aufgestellt. Die Reaktion besteht dabei aus Geschwindigkeit oder Beschleunigung als Antwort auf Reize wie Geschwindigkeitsdifferenz oder Abstand.

Die erste mathematische Formulierung dieser Art geht auf REUSCHEL (1950) zurück, in der die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs zum Nettoabstand (Bruttoabstand, vermindert um einen Ruheabstand L_R und die Fahrzeuglänge L_F des vorausfahrenden Fahrzeugs, $L=L_R+L_F$) zwischen den beiden Fahrzeugen proportional sein sollte:

$$k * \dot{x}_{n+1}(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) - L$$

Dieser Zusammenhang erwies sich als unrealistisch, da er die Geschwindigkeit anstelle der ihr wirkungsmäßig übergeordneten Beschleunigung als Reaktion annahm und Reaktionszeiten nicht miteinbezog. Andere einfache Ansätze von WHITE (1957) und CHANDLER, HERMAN und MONTROLL (1958) teilten zunächst diese Unzulänglichkeiten.

Weitere Verfeinerungen erfuhren diese Ansätze durch die Arbeiten von GAZIS, HERMAN und POTTS (1959), HERMAN und POTTS (1961) sowie EDIE (1961). Die meisten bekannten Fahrzeugfolgemodelle lassen sich mit der allgemeinen Formel beschreiben, die von GAZIS, HERMAN und ROTHERY (1961) aufgestellt und analysiert wurde:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = a \cdot \frac{\dot{x}_{n+1}^m(t + T)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$$

Die Modelle unterscheiden sich damit nur in der Wahl der Exponenten m und l sowie des konstanten Faktors a . Diese Modelle erfuhren noch Erweiterungen, in denen das Fahrverhalten in Abhängigkeit von mehr als einem (unmittelbar) vorausfahrenden Fahrzeug betrachtet wurde (LEUTZBACH, BEXELIUS, 1966); der Einfluß von mehr als einem

Fahrzeug schien aber so gering, daß sich diese Betrachtungsweise nicht durchsetzte.

Diese "deterministischen" Fahrzeugfolgemodelle haben aus mehreren Gründen nur eingeschränkt Gültigkeit. Zunächst vernachlässigen sie die Grenzen des kinematisch möglichen bzw. zulässigen Wertebereichs für die Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung². Dabei sind besonders den realisierbaren Beschleunigungen enge Grenzen gesetzt. Zum anderen ist die Wirkung von Abständen und insbesondere Geschwindigkeitsdifferenzen nur dann realistisch zu nennen, wenn diese Größen für einen Fahrer überhaupt (visuell) wahrnehmbar sind.

Die Erkenntnis, daß dem hauptsächlichen Rezeptor des Menschen für die Informationsgewinnung beim Fahren, dem Auge, psychophysische Grenzen gesetzt sind, jenseits derer die Zeitveränderlichkeit der oben genannten Größen für einen Fahrer erst wahrnehmbar werden, setzte als erster MICHAELS (1965) in der Form von Wahrnehmungsschwellen um. Diese Schwellen beziehen sich auf Änderungen von Winkeln, unter denen Objekte im Gesichtsfeld des Fahrers in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Fahrer und Objekt sowie der Größe desselben erscheinen. Unter Verwendung dieser Ergebnisse sowie der Arbeiten von TODOSIEV (1963) wurden dann von FOX und LEHMANN (1967) und WIEDEMANN (1968) rechnergestützte Simulationen realisiert. Letzterer Ansatz war Ausgangspunkt für eine ganze Reihe von Simulationsmodellen (vgl. z.B. LEUTZBACH, WIEDEMANN, 1986), die als Kern das wahrnehmungsbasierte Folgeverhalten von individualisierten Fahrer-Fahrzeug-Elementen (FFE) enthalten. Jedes FFE wird dabei durch stochastische (z.B. normalverteilte) Zufallsgrößen charakterisiert und in seinen Reaktionen durch Überschreiten verschiedener Wahrnehmungsschwellen gesteuert. In der Abbildung 2.1-1 sind verschiedene Schwellen qualitativ in einem Abstands-Geschwindigkeitsdifferenz-Diagramm dargestellt, in dem Bereiche unterschiedlicher Fahraktionen voneinander abgegrenzt sind.

² Das Modell von GIPPS (1981) beinhaltet dann solche Korrekturen.

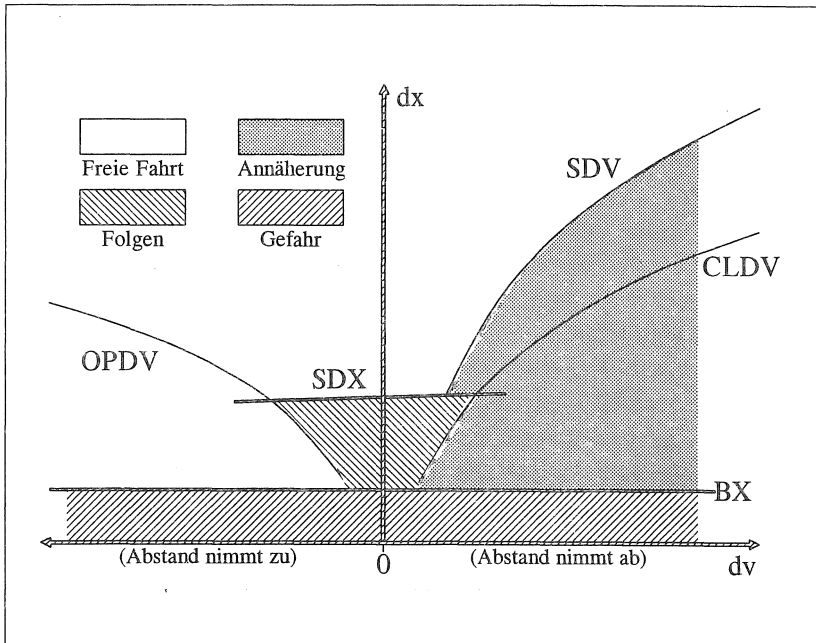


Abb. 2.1-1: Wahrnehmungsbasiertes Folgeverhaltensmodell: Wahrnehmungsschwellen und entsprechende Bereiche unterschiedlicher Fahrverhaltensweisen im Abstands-Geschwindigkeitsdifferenz-Diagramm

Neben der Anpassung an vorausfahrende Fahrzeuge durch Regelung der Beschleunigung ist als Reaktion auf als "störend" empfundene Fahrzeuge bei entsprechendem Straßentyp auch Überholen durch Fahrstreifenwechsel möglich. Der Unterschied zwischen Fahrbahnen mit Gegenverkehr und Richtungsfahrbahnen liegt prinzipiell nur in den stark unterschiedlichen Geschwindigkeitsdifferenzen, die in Bezug zu anderen Interaktionspartnern auftreten können. Beim Fahrstreifenwechsel ist dabei von grundsätzlich ähnlichen Wirkungszusammenhängen zwischen der Einschätzung von Relativbewegungen zu allen relevanten Interaktionspartnern und der Entscheidung zu einer Einleitung und Durchführung eines Fahrstreifenwechsels auszugehen wie bei der Beschreibung von Bewegungsabläufen bei der Fahrzeugfolge.

Empirische Messungen zur Beschreibung des Fahrstreifenwechselverhaltens sind aufgrund mehrerer relevanter Interaktionspartner und damit gleichzeitig zu erfassender Vorgänge sehr aufwendig. Dementsprechend rar sind empirische Untersuchungen von Fahrstreifenwechselvorgängen auf mehrstreifigen Schnellstraßen. Relativ umfangreiche Arbeiten hierüber lieferten SPARMANN (1978) und LEUTZBACH/BUSCH (1984), in denen sich detaillierte Angaben über Meßmethodik und Systematisierung der durch Fahrstreifenwechsel bedingten Verkehrssituationen finden lassen. SPARMANN klassifizierte den Fahrstreifenwechsel auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen in sechs (vier für den Wechsel nach links, zwei für den Wechsel nach rechts) Wechselsituationen, die sich an der Anzahl relevanter Interaktionspartner orientieren. Mit einer meßtechnisch aufwendigen Versuchsanordnung wurden dort für die verschiedenen Wechseltypen und die vier möglichen Paar-Kombinationen der Fahrzeugtypen Pkw und Lkw verschiedene Parameter zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechselbeginns erfaßt:

- Geschwindigkeit
- Abstand
- Nettozeitlücke (Zeitspanne zwischen der Überquerung eines Fahrbahnquerschnitts durch das Heck des vorausfahrenden und den Bug des nachfolgenden Fahrzeugs)

Zusätzlich wurden Fahrstreifenwechselzeiten und Behinderungen anderer Fahrzeuge durch Fahrstreifenwechsel ermittelt und Bezüge zu makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsablaufs wie Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Fahrstreifenaufteilung sowie Fahrstreifenwechselhäufigkeiten hergestellt.

Für die Nachbildung des Fahrstreifenwechsels existieren mehrere Simulationsmodelle für Richtungsfahrbahnen, die sich an Wahrscheinlichkeiten zur Annahme von Zeitlücken (VAUBEL, 1974) orientieren oder physiologische Wahrnehmungsschwellen mit rechtlichen Fahrvorschriften verknüpfen (HUBSCHNEIDER, LEUTZBACH, WIEDEMANN, 1977; WETTERLING, 1980). Allen Modellen ist mit Ansätzen aus dem

angelsächsischen Sprachraum (z.B. NEMETH/ROUPHAIL, 1982) gemein, daß über die Einhaltung von Grenzwerten bei Verwendung der kinematischen Bewegungsgleichungen auf "mechanistische" Weise ein funktionierender Verkehrsablauf garantiert wird. (Beispiel: Gradmesser für die Behinderung von Fahrzeugen auf dem linken Fahrstreifen beim Fahrstreifenwechsel eines Fahrzeugs von rechts nach links ist ein auf mehreren vereinfachenden Annahmen beruhender Grenzwert für eine maximale Bremsverzögerung, die dem sich von hinten nähernden Fahrzeug höchstens "zugemutet" wird.)

2.2 Einführung in die Theorie unscharfer Mengen (Fuzzy Sets Theory)

Fuzzy-Logic oder "Unscharfe Logik" hat in den letzten Jahren besonders in den Bereichen der Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik starke Bedeutung erlangt. Es handelt sich dabei um die Fortentwicklung und Anwendung einer mathematischen Theorie, die zuerst von ZADEH (1965) formuliert wurde. Der amerikanische Systemtheoretiker schlug vor, unscharf abgegrenzte Mengen für eine neuartige Modellbildungsstrategie zu verwenden, um vage (unscharfe) Begriffe einer mathematisch eindeutigen Behandlung zugänglich zu machen.

Hintergrund war die "Beengtheit", die sich aus dem Instrumentarium der klassischen Mathematik bei der mathematischen Modellierung von Systemen ergab. Diese verlangte im allgemeinen eine ganze Reihe von Idealisierungen, um von konkreten Problemen zu einem diesen Problemen angepaßten mathematischen Ansatz zu gelangen. Insbesondere Begriffe, die Systemzustände oder -variable von Modellen beschreiben, verlangen genaue Festlegungen. Daneben sind genaue Daten mit genau bestimmten Fehlergrenzen Voraussetzung für eine "klassische" Modellformulierung. Im Gegensatz dazu kommunizieren Menschen mit Hilfe "natürlicher Sprache", in der Wortbedeutungen oft ungenau und vage sind. Auch menschliches Denken und damit menschliches Urteilen, Bewerten oder Entscheiden beruht zu großen Teilen auf solch unschar-

fen Begriffen. Auch bei unvollständiger Information oder unter Unsicherheit können und müssen Menschen Entscheidungen herbeiführen.

Das grundlegende Konzept der Theorie unscharfer Mengen besteht nun knapp zusammengefaßt darin, die Kluft zwischen der dem Menschen eigenen, verbalen (und damit kontextabhängigen und unpräzisen) Kategorisierung von Systemeigenschaften oder Situationsbeschreibungen und der dem Konzept der klassischen Logik zugrundeliegenden Trennschärfe zu überbrücken und mittels geeigneter Verrechnungsmethoden der numerischen Bearbeitung zugänglich zu machen. Es ist damit möglich, auch Ungenauigkeiten von nicht-stochastischem Charakter mathematisch auszudrücken. Solche Ungenauigkeiten bzw. Unschärfen werden in zwei Arten unterschieden (vgl. ROMMELFANGER, 1988):

Intrinsische Unschärfe: Sie ist Ausdruck der Ungenauigkeit menschlicher Empfindung sowie der Kontextabhängigkeit sprachlicher Begriffe. Wird beispielsweise eine Geschwindigkeit als "hoch" beschrieben, ist die Verknüpfung dieses Begriffs mit einem konkreten Zahlenwert subjektiv. Dessen Verwendung als Grenzwert ist problematisch, weil nicht einsichtig ist, daß eine Geschwindigkeit, die den Grenzwert nur geringfügig unterschreitet, nicht mehr als "hoch" angesprochen werden kann. Darüberhinaus bestimmt der Kontext, welcher konkrete Wertebereich dem Begriff "hohe Geschwindigkeit" entspricht. Innerorts wird eine Geschwindigkeit von 70 km/h als "hoch", auf einer Schnellstraße dieselbe Geschwindigkeit eher als "niedrig" gelten.

Informationale Unschärfe: Ein sprachlicher Begriff mag exakt definierbar sein, bei der praktischen Handhabung kann es aber unmöglich sein, die dazugehörigen Informationen zu erfassen und zu einer klaren Beurteilung zu aggregieren. Der Begriff "Sicherer Abstand" ist unter kinematischen Gesichtspunkten mathematisch exakt formulierbar, im Fahrbetrieb stehen aber weder die dazu notwendigen Informationen (Abstand, Geschwindigkeits-, Beschleunigungsdifferenz) mit der notwendigen Genauigkeit zur Verfügung, noch ist die mathematische Evaluierung durch den Fahrer realistisch. Zur informationalen Unschärfe zählt auch

die Ungewißheit über das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, welches sich nur aufgrund von Erwartungen ungefähr prognostizieren läßt und stets unsicher bleibt.

Um solche Unschärfen der mathematischen Modellierung zugänglich zu machen, ist ein Umdenken bei den Begriffen der klassischen Logik (Bool'sche Logik) erforderlich. Als Beispiel dafür dient ein Paradoxon der klassischen Logik, das darauf beruht, einer Aussage A denselben (Bool'schen) Wahrheitswert zuzuweisen wie seiner Negation \bar{A} :

<u>Aussage A</u>		<u>Aussage \bar{A}</u>
Der nebenstehende Satz ist wahr !		Der nebenstehende Satz ist falsch !

Annahme: Aussage A sei wahr, d.h. $W(A) = 1$

Dies impliziert, daß die Aussage "Der nebenstehende Satz ist falsch" wahr ist: $W(\bar{A}) = 1$, also gelten soll:

$$W(A) = W(\bar{A}) \quad (1)$$

Nach den Axiomen der Bool'schen Logik gilt jedoch:

$$W(A) = 1 - W(\bar{A}) \quad (2)$$

Der entscheidende Schritt, den die unscharfe Logik zur Lösung diese Paradoxons beiträgt, besteht in der Erweiterung des zulässigen Wertebereichs für die Wahrheitswerte von Aussagen:

"Klassische" Logik		"Fuzzy"-Logik
$W(A) \in (0,1)$	\rightarrow	$W(A) \in [0,...,1]$

Die "Fuzzy-Lösung" des Paradoxons erhält man, wenn man (1) in (2) einsetzt:

$$\begin{aligned}
& W(A) = 1 - W(A) \\
& \Leftrightarrow 2 * W(A) = 1 \\
& \Leftrightarrow W(A) = 0.5 \quad (\text{ bzw. } W(\bar{A}) = 0.5) \quad (3)
\end{aligned}$$

Die Interpretation dieser Lösung kann lauten, daß sowohl Aussage A als auch deren Negation \bar{A} nicht ganz richtig, aber auch nicht ganz falsch sein können. Die Wahrheit liegt "irgendwo dazwischen" (vgl. KOSKO, 1992).

Die Literatur über Fuzzy-Set-Theory und deren Anwendungen ist inzwischen sehr zahlreich. Stellvertretend dafür seien hier die Arbeiten von ROMMELFANGER (1988); BANDEMER/GOTTWALD (1990); ZIMMERMANN(1990) und KOSKO (1992) mit ihren ausführlichen Einführungen in die Thematik und zum Teil sehr umfangreichen Bibliographien genannt.

2.3 Beispiel für einen einfachen Fuzzy-Regler

Ein Fuzzy-Regler setzt sich im wesentlichen aus drei Bestandteilen zusammen:

- Menge von Systemvariablen, die jeweils durch eine Anzahl unscharfer Mengen beschrieben werden.
- Regelkatalog: Die "Wissensbasis" des Reglers, bestehend aus Regeln der Form "Wenn A, dann B", aus den Mengennamen der Systemvariablen als "Sprachelementen" und aus Verknüpfungsooperatoren.
- Inferenzmethode: Anwendung des Regelkatalogs auf die aktuellen Werte der Systemvariablen und Berechnung der Zahlenwerte der resultierenden Variablen.

Anhand eines Beispiels (Abb. 2.3-1) soll das Zusammenwirken dieser drei Bestandteile erläutert werden. Für die Formulierung eines sehr

einfachen Fahrzeugfolgemodells werden vier Systemvariable benutzt (in Anlehnung an die deterministische Fahrzeugfolgleichung):

- Geschwindigkeit [m/s]; absolute Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs
- Abstand [m]; Nettoabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug
- Geschwindigkeitsdifferenz [m/s]; absolute Geschwindigkeit des vorausfahrenden abzüglich der des betrachteten Fahrzeugs. (Eine negative Geschwindigkeitsdifferenz bedeutet dabei eine Annäherung der Fahrzeuge.)
- Beschleunigung [m/s²]; resultierende Beschleunigung des betrachteten Fahrzeugs als Reaktion auf die aktuellen Werte der anderen Systemvariablen.

Jede dieser Variablen besitzt mehrere Mengen, die die zahlenmäßige Ausprägung der Variablen mit sprachnahen Attributen verknüpft. Die momentane Ausprägung der Variable Geschwindigkeit ist mit 25 m/s beispielsweise gleichzeitig Element der beiden Mengen "zu niedrig" und "ok". Die Zugehörigkeit zu einer Menge wird durch den entsprechenden Zugehörigkeitsgrad gekennzeichnet, der sich im Wertebereich [0,...,1] bewegen kann. Für das genannte Beispiel Geschwindigkeit soll gelten:

Zugehörigkeitsgrad (25 m/s , "zu_niedrig")	= 0,7
Zugehörigkeitsgrad (25 m/s , "ok")	= 0,3
Zugehörigkeitsgrad (25 m/s , "zu_hoch")	= 0

Die Zugehörigkeitsgrade sind dabei nicht als stochastische Wahrscheinlichkeiten anzusehen, sondern als Gradmesser für die Angemessenheit des Attributs der jeweiligen Menge ("überwiegend zu niedrig, kaum ok, keinesfalls zu hoch").

Die Variable Abstand besitzt drei Mengen, um den momentanen Nettoabstand zu bewerten ("zu_nah", "ok", "zu_weit"). Durch einen funktionalen Zusammenhang (z.B. Abhängigkeit der Abstandsbewertung vom Geschwindigkeitsniveau) ist hier festgelegt, daß bei der momentanen

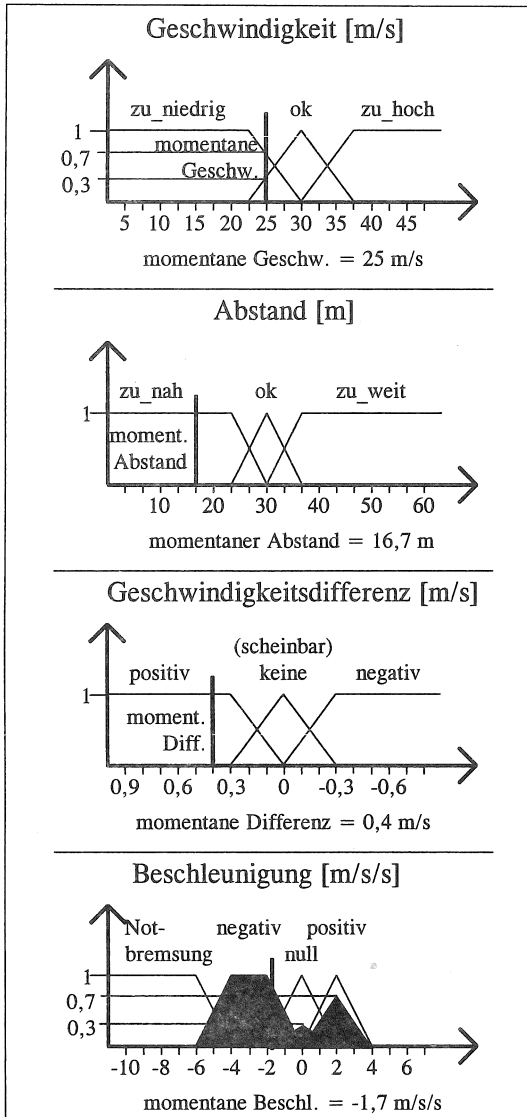


Abb. 2.3-1: Vier Systemvariable eines einfachen Fuzzy-Reglers zur Nachbildung von Fahrzeugfolgeverhalten

Geschwindigkeit von 25 m/s ein Abstand von 30 m mit einem Zugehörigkeitsgrad von 1 als "ok" bewertet wird, der momentane Abstand von 16,7 m jedoch mit einem Zugehörigkeitsgrad von 1 als "zu_nah" einzuordnen ist.

Für die Geschwindigkeitsdifferenz werden ebenfalls drei Mengen gewählt, wobei Bereiche eindeutig wahrnehmbarer Geschwindigkeitsdifferenzen mit den Attributen "positiv" (Auseinanderbewegen der Fahrzeuge) bzw. "negativ" (Annäherung der Fahrzeuge) durch einen Bereich "(scheinbar) keine" getrennt sind, dessen Breite beispielsweise vom momentanen Abstand abhängen kann.

Die resultierende Variable Beschleunigung umfaßt mit ihren vier Mengen ("Notbrem-

sung", "negativ", "null", "positiv") in sehr vereinfachter Form den Wertebereich, der durch kinematische Randbedingungen vorgegeben ist.

Das Fahrzeugfolgeverhalten des betrachteten Fahrzeugs wird durch einen Katalog von Regeln gesteuert, der grundsätzlich für alle möglichen Fahrzeugfolgesituationen eine zulässige und vernünftige Reaktion liefern können muß, in diesem Beispiel aber nur aus drei Regeln bestehen soll:

1. Wenn Abstand zu_nah
dann Beschleunigung negativ
2. Wenn Geschwindigkeit zu_niedrig
und Abstand zu_nah
und Geschwindigkeitsdifferenz positiv
dann Beschleunigung positiv
3. Wenn Geschwindigkeit ok
und Abstand zu_nah
und Geschwindigkeitsdifferenz positiv
dann Beschleunigung null

Aus der Menge der zahlreichen in der Literatur bekannten Verknüpfungsooperatoren für Fuzzy-Regler soll hier der verhältnismäßig einfache und häufig verwendete und-Operator verwendet werden. Dieser Verknüpfungsooperator und ist eine verallgemeinerte Form des Bool'schen "und"-Operators und bedeutet hier, daß der Erfülltheitsgrad der mit diesem Operator verknüpften Regelbestandteile im "Wenn"-Teil gerade dem Minimum der Zugehörigkeitsgrade der einzelnen Teile entspricht. Bei den drei genannten Regeln ergeben sich damit folgende Erfülltheitsgrade:

1. Regel: $\text{Min}(1,0) = 1,0$
2. Regel: $\text{Min}(0,7; 1,0; 1,0) = 0,7$
3. Regel: $\text{Min}(0,3; 1,0; 1,0) = 0,3$

In der Fuzzy-Logic geht man davon aus, daß die Schlußfolgerung einer Regel ("dann"-Teil) immer zum gleichen Grad erfüllt ist, wie ihre

Vorbedingung ("Wenn"-Teil). Aus den genannten Regeln ergibt sich damit, daß die Beschleunigung zu einem Grad von 1,0 auf "negativ", zu einem Grad von 0,7 auf "positiv" und zu einem Grad von 0,3 auf "null" gesetzt wird.

Das dritte Element eines Fuzzy-Reglers, die Inferenzmethode, beinhaltet die Übertragung der Erfülltheitsgrade auf die entsprechenden Mengen der resultierenden Variable und die Methode der "Defuzzifizierung", d.h. die Transformation der Mengen in einen konkreten Zahlenwert. Aus der Vielzahl möglicher Methoden wird eine Vorgehensweise gewählt, bei der die unscharfen Mengen der resultierenden Variable, die durch Regeln aktiviert werden, mit den Erfülltheitsgraden der entsprechenden Regeln in Ansatz gebracht werden. Dadurch entstehen die in Abb. 2.3-1 dunkel gefärbten Teilmengen der Variable Beschleunigung. Aus der durch die gefärbten Teilmengen entstehenden Gesamtfläche wird ein reeller Zahlenwert durch Flächenschwerpunktsermittlung bestimmt. Als Reaktion auf die aktuellen Werte der drei Variablen Abstand, Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsdifferenz ergibt sich damit unter Verwendung der angegebenen drei Regeln eine Bremsverzögerung von $-1,7 \text{ m/s}^2$.

Als besondere Eigenschaft dieses Fuzzy-Reglers gilt es festzuhalten, daß alle drei Regeln in ihrer Vorbedingung die Menge "zu_nah" der Variable Abstand enthalten, die Regeln jeweils unterschiedliche Schlußfolgerungen (Mengen der Variable Beschleunigung) ansprechen und die Inferenzmethode dennoch in der Lage ist, diese "Widersprüche" korrekt zu verarbeiten. Dies geschieht bei der oben angegebenen Inferenzmethode dadurch, daß bei der Flächenschwerpunktsermittlung ein Kompromiß für die unterschiedlichen Schlußfolgerungen ("dann"-Teile der Regeln) durch eine "gewichtete Mittelwertbildung" herbeigeführt wird. Dabei ist die Berechnung des Resultats eindeutig und methodisch keineswegs unscharf. Ob ein Fuzzy-Regler jedoch realistisches Systemverhalten zeigt, das sich empirisch belegen läßt, hängt nicht nur vom Regelkatalog, sondern vor allem auch von der Wahl der Variablenmengen und den funktionalen Beziehungen der Variablen untereinander ab.

Daß Fahrzeugfolgeverhalten mit den gezeigten Bestandteilen eines Fuzzy-Reglers für einfache Verhältnisse nachgebildet werden kann, belegen die Arbeiten von KIKUCHI und CHAKROBORTY (1992) und BEHM (1992). KIKUCHI und CHAKROBORTY verzichteten dabei auf funktionale Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und einer Bewertung des Abstands und erzielten dadurch ein plausibles Reglerverhalten nur für einen beschränkten Geschwindigkeitsbereich. In der Arbeit von BEHM wurden diese Zusammenhänge zwar berücksichtigt, aber nicht mit empirischem Datenmaterial verglichen. Beide Arbeiten zeigen jedoch die grundsätzliche Realisierbarkeit der Fahrzeugfolgemodellierung mit Hilfe einfacher Fuzzy-Regler.

2.4 Konzept der potentiellen Kollisionszeiten

Ein Fahrer bezieht die beim Führen eines Fahrzeugs benötigte Information hauptsächlich aus den dynamischen Veränderungen, die sich in seinem Gesichtsfeld abspielen. Wie bei jeder aktiven Fortbewegung sind Kollisionen mit anderen Objekten im Raum möglich und damit verbundene Gefahrenpotentiale durch Verarbeitung der visuellen Information zu erkennen und zu vermeiden, bevor diese Kollisionen eintreten. Rezeptor für diese Veränderungen im Gesichtsfeld ist die Netzhaut des Auges. In diesem Abschnitt wird gezeigt, daß ein Fahrer mit Hilfe der weiter unten präzisierten Größe "Potentielle Kollisionszeit" unmittelbar Informationen darüber beziehen kann, ob und wann er mit Objekten in seinem Gesichtsfeld unter Beibehaltung seiner momentanen kinematischen Verhältnisse (Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz) zusammenstoßen würde.

Kinematische Größen wie Nettoabstände, Geschwindigkeitsdifferenzen oder auch Beschleunigungsdifferenzen können Fahrzeugführer nur unvollkommen schätzen (vgl. GRIMM, 1988); die bewußte Umsetzung dieser Größen zur Situationseinschätzung (Entscheid über Zeitpunkt und Stärke von Bremsverzögerungen) scheint unwahrscheinlich. Selbst stark

simplifizierende Rechenregeln wie "Halber-Tacho-Abstand" oder "Methode-21-22" bedürfen bewußter Umsetzung und sind deshalb kaum Bestandteil üblicher Fahrpraxis, die überwiegend durch Verhaltensmuster bewältigt wird, welche durch Fahrerfahrung und Gewohnheit in das Unterbewußtsein verlagert worden sind. Im Gegensatz dazu ist potentielle Kollisionszeit eine direkter wahrnehmbare Größe, über die nicht "mechanistisch" reflektiert werden muß und die unmittelbar zur Situationseinschätzung herangezogen werden kann.

In einer frühen systematischen Untersuchung dieser Größe beschreibt SCHIFF (1965) eine Tendenz der systematischen Überschätzung potentieller Kollisionszeiten. Diese Tendenz kann Kraftfahrer eher in die Lage versetzen, der Kollision zu entgehen und sich notfalls noch verschiedene Verhaltensalternativen zur Abwehr der Kollision offen zu halten (vgl. GUSKI, 1989).

Im folgenden ist mit dem Begriff der potentiellen Kollisionszeit (tk) das Zeitintervall gemeint, nach dessen Ablauf ausgehend von einem momentanen Zeitpunkt t_0 sich zwei betrachtete Fahrzeuge (Abb. 2.4-1) gemäß ihrer vereinfachten Bewegungsgleichung in ihren Abmessungsgrenzen berühren würden. (Berücksichtigt werden nur Nettoabstand und Geschwindigkeitsdifferenz in t_0 ; eine etwaige Differenz der Beschleunigung wird vernachlässigt.)

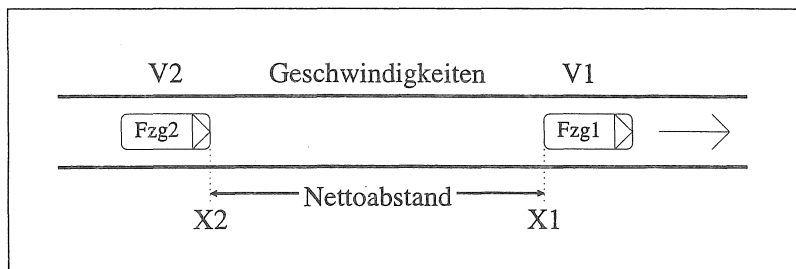


Abb. 2.4-1: Zur Definition von Abstand dx und Geschwindigkeitsdifferenz dv für die potentielle Kollisionszeit tk

$$tk = - \frac{(x_1 - x_2)}{(v_1 - v_2)}$$

Das negative Vorzeichen ergibt sich aus der Definition der Geschwindigkeitsdifferenz: Nur wenn $v_2 > v_1$ ist, ergibt sich eine Annäherung der Fahrzeuge und somit eine dem Betrag nach positive Kollisionszeit. Eine negative Kollisionszeit ist für Annäherungsprozesse nicht relevant und entspricht rein rechnerisch einem Zeitintervall endend in t_0 , zu dessen Beginn sich die Fahrzeuge unter gleichgebliebenen kinematischen Bedingungen berührt und von da an aufgrund der positiven Geschwindigkeitsdifferenz auseinanderbewegt hätten.

Im Verkehrswesen fand ein sehr ähnlicher Begriff unter dem Namen "Potentielle Zeit" schon früher Eingang (GREENSHIELDS, SCHAPIRO, ERICKSEN, 1947), in der die potentielle Zeit t_p als Quotient aus Abstand zu einem Konfliktpunkt und der Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs zu einem Zeitpunkt t_0 bestand:

$$t_p = \frac{\text{Abstand vom Konfliktpunkt in } t_0}{\text{Geschwindigkeit } v(t_0)}$$

Ein Fahrzeug benötigt also unter Beibehaltung seiner Geschwindigkeit die Zeit t_p , um die Strecke bis zum Konfliktpunkt zurückzulegen. Das grundlegende Problem bei diesem Ansatz war die eindeutige Festlegung eines Entscheidungszeitpunkts, der bei der Beschreibung des Verkehrsablaufs an nicht lichtsignalgesteuerten Knoten im städtischen Bereich den Zeitpunkt beschreiben sollte, an dem sich ein nicht bevorrechtigter Fahrer für das Überfahren des Konfliktpunkts bzw. zum Vorfahrtgewähren entscheidet.

Weitere Arbeiten von HOMBURGER (1951), RETZKO (1961) und ERNST (1967) haben den Begriff "Potentielle Zeit" weiter differenziert, indem das Beschleunigungsvermögen des Nichtbevorrechtigten miteinbezogen und die Beschreibung des Konfliktbereiches präzisiert wurden. Eine weitere Modellverfeinerung wird bei HANDSCHMANN (1978)

beschrieben, wo die potentielle (bislang rein kinematisch berechnete) Zeit um Reaktionszeiten des Nichtbevorrechtigten erweitert wird.

Eine Anwendung von potentiellen Zeiten zur Beschreibung des Fahrverhaltens zur Kontrolle der Lateralbewegungen beim Fahren auf einem Fahrstreifen findet sich bei GODTHELP, MILGRAM und BLAAUW (1984) bzw. GODTHELP und KÄPPLER (1988) unter dem Begriff "time-to-line-crossing" (TLC). Sie wiesen eine enge Korrelation zwischen empirisch erhobenen Daten und potentiellen Zeiten nach, die anhand der lateralen Position des Fahrzeugs auf einer vorgegebenen Fahrbahn, aus dem Winkel zur Fahrtrichtung, aus der Geschwindigkeit und dem Einschlagswinkel des Lenkrads für das Erreichen der Fahrbahnbegrenzungen errechnet werden konnten.

Ausgehend von einer Theorie der Abstandswahrnehmung für sich bewegende Beobachter (GIBSON, 1950) entwickelte LEE (1976) eine Theorie des Bremsverhaltens von Kraftfahrern. GIBSON's Theorie besagt knapp zusammengefaßt, daß bei der Abstandswahrnehmung nicht die Schätzung des absoluten Abstands, sondern eine Schätzung des "Zeitpunkts bis zum Zusammenstoß" (vgl. FÄRBER, 1986) die entscheidende Information ist. Diese Information bezieht der Fahrer aus dem Fluß des visuellen Feldes. Nach dem Ansatz von LEE errechnet sich die "Zeit bis zur Kollision" (time-to-collision) t_c nach der Formel:

$$t_c : = \frac{\text{Öffnungswinkel zwischen zwei Punkten eines Objekts}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit dieses Winkels}}$$

Eine Überprüfung dieses Konzepts des durch potentielle Kollisionszeiten gesteuerten Bremsverhaltens mit Hilfe empirischer Untersuchungen unter realen Fahrbedingungen ergab, daß bei der Entscheidung bzw. Abschätzung von angemessenen Bremsreaktionen in Fahrzeugfolgesituationen nicht nur die Parameter Abstand, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdifferenzen, die der Beschreibung der Kollisionszeiten nach LEE dienen, sondern auch das Gesichtsfeld sowie die Fahrerfahrung eine Rolle spielen (CAVALLO, LAURENT, 1988).

Um den Zugang zur neuen Größe tk zu erleichtern, wird ein einfacher Annäherungsvorgang sowohl in einem Abstands-Geschwindigkeitsdifferenz-Diagramm ($dx-dv$ -Diagramm) als auch in einem Diagramm illustriert, welches die potentielle Kollisionszeit tk und ihre zeitliche Änderung dtk in Sekundenschritten wiedergibt ($tk-dtk$ -Diagramm). Die Änderung der Kollisionszeit berechnet sich dabei als Differenzenquotient aus der Differenz zweier Kollisionszeitwerte ($tk_{i+1} - tk_i$) im Verhältnis zur Zeitdifferenz ($t_{i+1} - t_i$) zwischen diesen beiden Werten.

Tabelle 2.4-1 enthält die entsprechenden Zahlenwerte, die sich aus einer Anfangssituation mit einem Abstand von 80 m bei einer Geschwindigkeitsdifferenz von -14 m/s zum Zeitpunkt $t=0$ ergeben. Dabei besteht bis zum Zeitpunkt $t=2$ keine Beschleunigungsdifferenz da ($a_1 - a_2$), ab diesem Zeitpunkt aber eine Differenz von 2 m/s^2 , die bis zum Ausgleich der Geschwindigkeitsdifferenz ($dv=0$ in $t=9$) beibehalten wird. Man kann sich diese Fahrsituation als Annäherung an ein stehendes Hindernis (LSA, Fahrzeug) vorstellen, wobei im Moment des Stillstands ein Restabstand von 3 m verbleibt.

t [s]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
dx [m]	80	66	52	39	28	19	12	7	4	3
dv [m/s]	-14	-14	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0
tk [s]	5,71	4,71	3,71	3,25	2,8	2,36	2	1,75	2	∞
dtk [s/s]	(-1)	-1	-1	-0,46	-0,45	-0,44	-0,36	-0,25	0,25	∞

Tab. 2.4-1

Abbildung 2.4-2 zeigt die jeweils sich ergebenden Werte des Abstands und der Geschwindigkeitsdifferenz im Zeitverlauf. Für jeden Punkt in einem $dx-dv$ -Diagramm läßt sich die zugehörige potentielle Kollisionszeit angeben. Ausgehend vom Ursprung des Diagramms ergeben sich Geraden mit konstanter potentieller Kollisionszeit. In der Abbildung ist eine solche Gerade für den Wert 2 s eingetragen, die in etwa als eine

untere Schranke für realisierte Kollisionszeiten bei empirisch gemessenen Annäherungsvorgängen angesehen werden kann (vgl. Abb. 4.2.2-4).

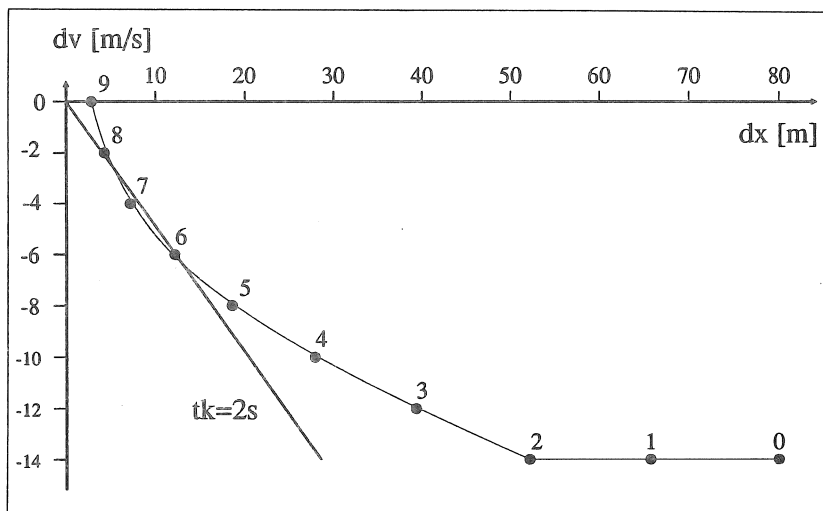


Abb. 2.4-2: Annäherungsvorgang in einem dx-dv-Diagramm

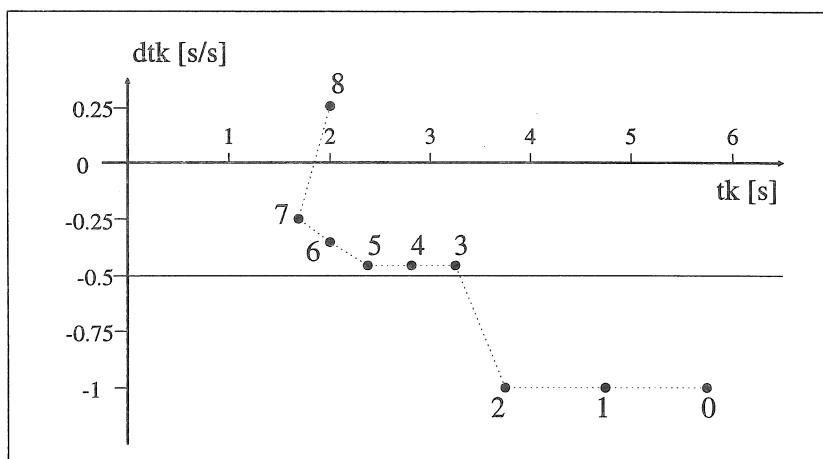


Abb. 2.4-3: Annäherungsvorgang in einem tk-dtk-Diagramm

Die diesem Fahrvorgang entsprechenden potentiellen Kollisionszeiten sind in Abbildung 2.4-3 mit ihren zeitlichen Änderungen aufgetragen. Für den in dieser Abbildung eingezeichneten Grenzwert für dtk von $-0,5$ gilt folgendes: Solange sich Kollisionszeitänderungen oberhalb dieses Grenzwertes bewegen, ist ein Annäherungsvorgang unkritisch, da keine Kollision droht (formale Begründung in Abschnitt 8.1.5). Für die Interpretation des Zahlenbeispiels heißt dies, daß schon ab Zeitpunkt $t=3$ ein sicherer Annäherungsvorgang stattfindet. Der zusätzliche Informationsgehalt eines t_k - dt_k -Wertepaares gegenüber einem dx - dv -Wertepaar besteht darin, daß die Betrachtung der Kollisionszeitänderung implizit den Effekt von Beschleunigungsdifferenzen mit berücksichtigt. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 2.4-4, wo unterschiedliche dt_k -Werte infolge unterschiedlicher Beschleunigungsdifferenzen (Tabelle 2.4-2) bei sonst gleichem dx -Wert (10m), dv -Wert ($-2,5\text{m/s}$) und t_k -Wert (4s) entsprechenden Bewegungsvektoren im dx - dv -Diagramm zugeordnet werden können.

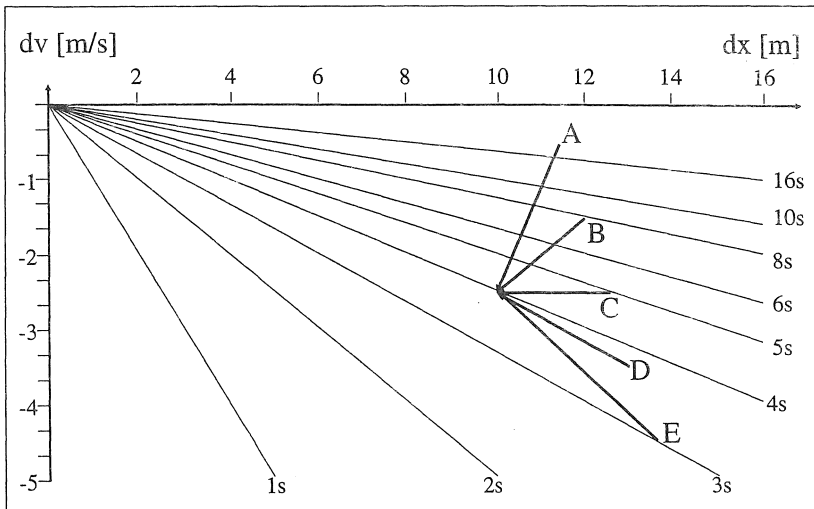


Abb. 2.4-4: Darstellung unterschiedlicher Kollisionszeitänderungen infolge verschiedener Beschleunigungsdifferenzen im dx - dv -Diagramm

Beispiel	A	B	C	D	E
da [m/s ²]	-2	-1	0	1	2
dtk [s/s]	-19	-4	-1	0,29	1

Tab. 2.4-2

Da die potentielle Kollisionszeit einem Fahrzeugführer unmittelbar durch die dynamischen Veränderungen in seinem Gesichtsfeld zur Verfügung steht, bekommt diese Größe im später beschriebenen Modell für die Steuerung der Fahrzeugfolge im Vergleich zu klassischen Parametern der Fahrzeugfolge theorie wie Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz ein größeres Gewicht.

2.5 Potentielle Kollisionszeiten und physiologische Grenzen der Wahrnehmung

Es läßt sich zeigen, daß die folgenden drei Definitionen für die potentielle Kollisionszeit ineinander überführt werden können:

$$tk = - \frac{\text{Nettoabstand zwischen zwei Fahrzeugen}}{\text{Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge}}$$

bzw.

$$tk = \frac{\text{Öffnungswinkel zwischen zwei Punkten eines Fahrzeugs}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit dieses Winkels}}$$

bzw.

$$tk = \frac{\text{Abstand der Abbildung zweier Punkte eines Fahrzeugs}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit des Abstands dieser Punkte}}$$

Die mathematischen Herleitungen hierzu finden sich im Anhang (8.1.1, 8.1.2). Daraus ergeben sich zwei wichtige Tatbestände: Zum einen leiten sich daraus Abschätzungen für maximal wahrnehmbare Kollisionszeiten ab, die durch kleinste wahrnehmbare Winkeländerungen ihre physiologische Grenze finden. Solche kleinste für das menschliche Auge wahrnehmbare Winkeländerungen sind auch zentraler Bestandteil des wahrnehmungsbasierten Folgeverhaltens (Abschnitt 2.1). Zum anderen eröffnet die Äquivalenz der ersten und der dritten Kollisionszeitdefinition die Möglichkeit, potentielle Kollisionszeiten aus Bildaufzeichnungen zu gewinnen, ohne daß meßtechnisch Abstände oder Geschwindigkeitsdifferenzen bei dieser Aufzeichnung erfaßt werden müssen (vgl. Abschnitte 4.2.2, 8.2).

Ausgangspunkt für diese Überlegungen ist ein einfaches Modell zur Abbildung von realen Objekten durch ein optisches System, das gleichermaßen für Abbildungen des Objekts im menschlichen Auge und in einer Kamera gelten soll (Abb. 2.5-1). Ein Objekt (z.B. Fahrzeug) mit der Breite R und dem momentanen Abstand dx von der Öffnung des abbildenden Mediums wird unter einem Öffnungswinkel α im abbildenden Medium der Brennweite DX mit der Ausdehnung r wiedergegeben. Sowohl die reale Ausdehnung des Objekts R als auch die Brennweite DX sind über die Zeit konstant. Zeitveränderlich sind somit der Abstand dx , der Öffnungswinkel α und die Abbildungsgröße r . Zusätzlich zu den schon eingeführten Größen Abstand dx und Geschwindigkeitsdifferenz dv wird im folgenden Text noch die Beschleunigungsdifferenz da (momentane Beschleunigung des vorausfahrenden abzüglich der momentanen Beschleunigung des nachfolgenden Fahrzeugs, $a_1 - a_2$) benötigt.

Wenn nun die potentielle Kollisionszeit das Fahrzeugfolgeverhalten oder das Verhalten bei Annäherung an stehende Hindernisse (z.B. Fahrzeuge vor LSA) oder auch den Entscheidungsprozeß bei Fahrstreifenwechselvorgängen steuern soll, ist zu klären, welche Wertebereiche für reale Verkehrsabläufe relevant sind und in welchem Bereich potentielle Kollisionszeiten für Kraftfahrer überhaupt wahrnehmbar sind.

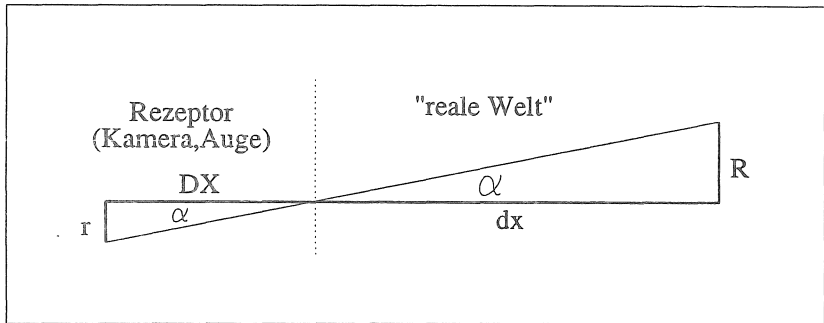


Abb. 2.5-1: Einfaches Modell für Abbildungseigenschaften optischer Rezeptoren

Ein Fahrzeug ist grundsätzlich dann auf "Kollisionskurs", wenn die potentielle Kollisionszeit positiv ist. Damit ist jedoch nicht der Zeitpunkt für den Beginn einer Aktion zur Kollisionsvermeidung festgelegt. Große Kollisionszeiten führen im praktischen Fahrbetrieb nicht automatisch zum Beginn einer Bremsverzögerung³. In Abhängigkeit von einer angestrebten (über den Zeitverlauf der Bremsung konstanten) Bremsverzögerung (bzw. Beschleunigungsdifferenz) da und von der Geschwindigkeitsdifferenz dv sowie einer Reaktionszeit t_r zur Adaptation der Bremsverzögerung läßt sich jedoch eine potentielle Kollisionszeit tk_{min} darstellen, zu der spätestens die gewählte Bremsverzögerung in Kraft gesetzt werden muß, um eine Kollision zu vermeiden (vgl. 8.1.3):

$$tk_{min} = t_r - \frac{dv}{2 da}$$

Dieser potentiellen Kollisionszeit tk_{min} kann eine potentielle Kollisionszeit tk_g gegenübergestellt werden, die die Wahrnehmungsschwelle für kleinste Öffnungswinkeländerungen α_g berücksichtigt. Geht man zunächst von einem konstanten Wert α_g aus (der jedoch inter- und intrapersonellen Schwankungen unterworfen ist), läßt sich eine maximal

³ Beispiel: Im Stadtverkehr bewegt sich ein Fahrzeug mit 15m/s (54km/h) auf ein Stoppschild zu und ist noch 150 m von der Haltelinie entfernt. Die potentielle Kollisionszeit beträgt damit 10 s; es ist aber unwahrscheinlich, daß der Fahrer schon bei diesem Abstand eine Bremsung einleitet.

wahrnehmbare Kollisionszeit tk_g als Funktion der Objektbreite R , des Schwellenwerts α_g und in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz dv folgendermaßen darstellen (vgl. 8.1.4):

$$tk_g = \sqrt{\frac{R}{\alpha_g} \cdot \frac{1}{-dv}}$$

In der Literatur finden sich folgende quantitative Angaben über Wertebereiche für α_g , die allerdings unter Laborbedingungen ermittelt wurden (Tab. 2.5-1):

Quelle	Untersuchungsziel, Versuchsanordnung	α_g [10^{-4} rad/s]
LEIBOWITZ (1955)	Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von der Wahrnehmungsdauer und der Beleuchtungsstärke Wahrnehmungsdauer 1s Wahrnehmungsdauer 2s	2,9 - 17,5 1,5 - 14,5
HARVEY, MICHON (1974)	Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von Objektwinkel α und der Wahrnehmungsdauer Wahrnehmungsdauer 1s Wahrnehmungsdauer 2s	1,2 - 15 1 - 9
LEE (1976)	Verweis auf andere Arbeiten, keine Beschreibung der Versuchsanordnung Gute Sichtverhältnisse Schlechte Sichtverhältnisse	5 60

Tab 2.5-1

Der Absolutwert der Schwelle α_g hängt dabei im wesentlichen von folgenden Faktoren ab (vgl. HOEFS, 1972):

- Sehvermögen, Erfahrung und Aufmerksamkeit des Fahrers
- Kontrast zwischen beobachtetem Fahrzeug und Umgebung
- Beleuchtungsstärke
- Struktur der Umgebung

Eigene Untersuchungen (vgl. 8.3) legen jedoch für die Wahrnehmbarkeit von Winkeländerungen einen anderen Zusammenhang nahe. Bei Messungen im realen Verkehrsablauf auf Schnellstraßen wurde der folgende funktionale Zusammenhang zwischen einer minimal wahrnehmbaren Öffnungswinkeländerung $\dot{\alpha}_g$ und dem zugehörigen Öffnungswinkel α festgestellt:

$$\frac{\alpha}{\dot{\alpha}_g} = c$$

Die Konstante c weist personenspezifisch unterschiedliche Werte auf; für den Annäherungsfall wurde unter günstigen Sichtverhältnissen ein Bereich von $c = 20; \dots; 50$ s ermittelt. Sie entspricht damit einer maximalen wahrnehmbaren potentiellen Kollisionszeit von

$$tk_g = 20, \dots, 50 \text{ s}$$

In Abbildung 2.5-2 sind für verschiedene Werte von da die entsprechenden Grenzwerte tk_{min} in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz den beiden beschriebenen Formen des Grenzwertes tk_g gegenübergestellt. Die erstgenannte Form des Grenzwertes tk_g beinhaltet dabei eine Fahrzeugbreite $R = 1,6\text{m}$ und eine Wahrnehmungsschwelle $\dot{\alpha}_g = 5 \cdot 10^{-4} \text{ rad/s}$. Bezüglich des Fahrzeugfolgeverhaltens lassen sich aus der Abbildung einige Schlußfolgerungen ableiten:

- Wenn größere Beschleunigungsdifferenzen ($>2\text{m/s}^2$) kinematisch möglich sind (auch das Vorderfahrzeug kann schon eine stärkere Verzögerung realisieren), ist tk_g über weite Bereiche der Geschwindigkeitsdifferenz erheblich größer als tk_{min} . Damit ist die potentielle Kollisionszeit bei guten Sichtverhältnissen ein visuell wahrnehmbarer Indikator, der auch bei sehr großen Geschwindigkeitsdifferenzen ein rechtzeitiges Erkennen der kinematischen Situation und das Einleiten von angemessenen Bremsmanövern erlaubt.

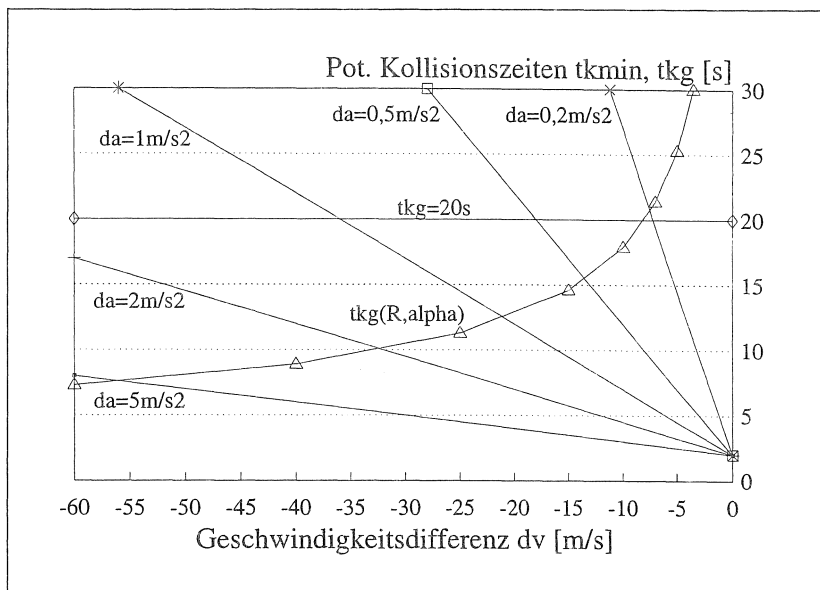


Abb. 2.5-2: Geschwindigkeitsabhängige Grenzwerte potentieller Kollisionszeiten tk_{min} und tk_g , Erläuterungen im Text

- Unter ungünstigen Umständen⁴ (z.B. $\alpha_g = 60 \cdot 10^{-4}$ rad/s bzw. $tk_g < 10s$ aufgrund schlechter Sichtverhältnisse) könnten hohe Geschwindigkeitsdifferenzen jedoch mit Hilfe der Wahrnehmung potentieller Kollisionszeiten möglicherweise nicht mehr beherrschbar sein.
- Bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen, wie sie für den Fahrzeugfolgevorgang im (relativ) ungestörten Verkehrsablauf typisch sind ($\pm 3m/s$), ermöglicht die Wahrnehmbarkeit der potentiellen Kollisionszeit auch unter ungünstigen Sichtverhältnissen eine Feinsteuerung der Beschleunigungsdifferenz zur kontrollierten und

⁴ Entsprechende Messungen unter realen Verkehrsbedingungen beispielsweise bei Nacht sind bislang nicht bekannt geworden; die Beleuchtungsverhältnisse sowie die Gestaltung von Fahrzeugrückleuchten dürften jedoch einen großen Einfluß auf die Wahrnehmbarkeit von Öffnungswinkeländerungen haben.

"weichen" Abstandregelung. Hierzu sind Beschleunigungsdifferenzen mit einem Betrag von weit unterhalb 1m/s^2 ausreichend. Gemessene Beschleunigungen / Verzögerungen (in diesem Fall keine Differenzen) beim Fahrzeugfolgevorgang im fließenden Verkehr auf Autobahnen bewegen sich im Bereich $\pm 0,8\text{m/s}^2$ und damit etwa zwischen den fahrerischen Aktionen "Gas weg" bzw. "Gas geben".

Darüber hinaus ist die potentielle Kollisionszeit in der Beschreibung eines Fahrer-Fahrzeug-Elements als Regelkreis die einzige Eingangsgröße, die zukünftige Fahrzeugkonstellationen vorwegzunehmen erlaubt und damit beispielsweise dem simulierten Fahrer Spielraum für "Strategien" bereitstellt, wie er sich (interaktiv⁵) zwischen den ihn umgebenden Fahrzeugen nach Wunsch positionieren kann (z.B. Fahrstreifenwechsel). Die potentielle Kollisionszeit ist somit eine Größe, die einen wenn auch ungenauen "Zeitfühler" in die unmittelbare Zukunft darstellt und mit der sich deshalb "vorausschauende Fahrweise" in der Simulation einfacher modellieren läßt.

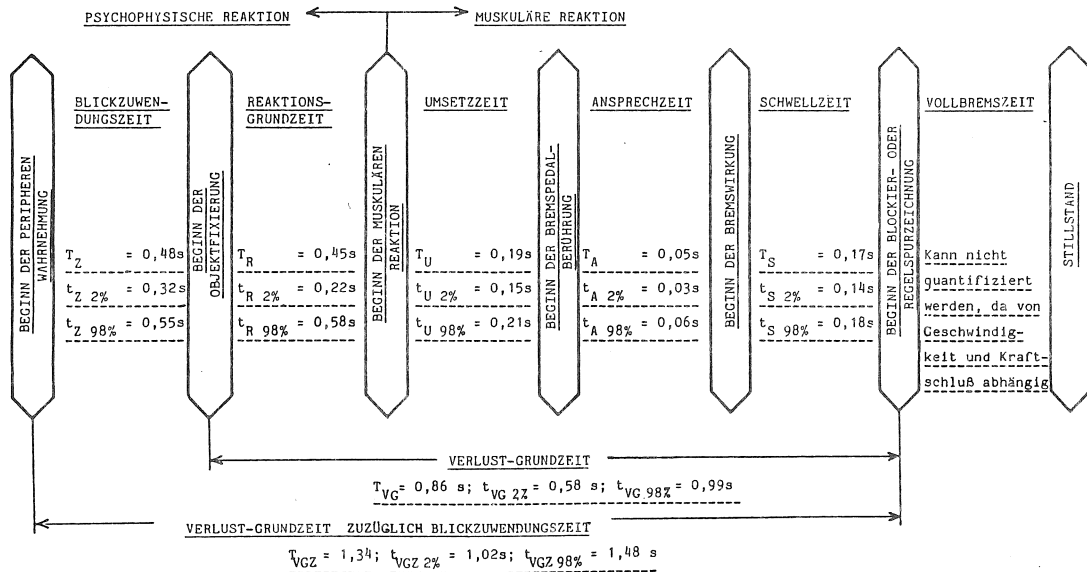
2.6 Konzept der inter- und intrapersonell variierenden Reaktionszeiten

Einleitung und Ausführung von Lenk-, Brems- oder Beschleunigungsvorgängen im Verkehr erfolgen hauptsächlich aufgrund optischer Wahrnehmungen und führen zu muskulären Reaktionen auf die mechanischen Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug. Reaktionszeiten umfassen also die Zeitintervalle psychologischer, muskulärer sowie mechanischer Abläufe, die auf bestimmte Reizkonstellationen hin ausgelöst werden.

⁵ Abgesehen davon, daß in der Realität Fahrer nur zu einer relativ unpräzisen Vorstellung über Kollisionszeiten gelangen (vgl. CAVALLO, LAURENT, 1988), nimmt die Prognosegenauigkeit mit größer werdendem Prognosezeitraum (im Sekundenbereich) stark ab. Man muß sich vor Augen führen, daß innerhalb des Regelkreises die Kollisionszeit eine Eingangsgröße ist, die auf die zentrale Ausgangsgröße Beschleunigung bei jeder Situationsüberprüfung einwirken kann und sich somit die Kollisionszeit fortwährend innerhalb kürzester Frist ändert.

ZEITLICHER ABLAUF EINES NOTBREMSVORGANGS

Quantifizierung der einzelnen Phasen eines Notbremsvorgangs mit PKW in einfach strukturierten Fällen



"T": Charakteristischer Merkmalswert der Weibullverteilung (Wert der größten Wahrscheinlichkeit)

"t 2%" bzw. "t 98%": Die angegebenen Werte markieren die Grenzen des Gültigkeitsbereiches und gehören selbst noch dazu

Abb. 2.6-1: Zeitlicher Ablauf eines Notbremsvorgangs, Quelle: BURCHARDT (1985)

Eine ausführliche Diskussion einzelner Reaktionszeitbestandteile erfolgt bei BURCKHARDT (1985), wo sich ein Reaktionsschema für den zeitlichen Ablauf von Notbremsvorgängen findet. Dort sind durch empirische Messungen untermauerte Verteilungsparameter für einzelne Reaktionszeitabschnitte zusammengestellt (Abb. 2.6-1). Die Terminologie dieses Schemas wird im folgenden verwendet.

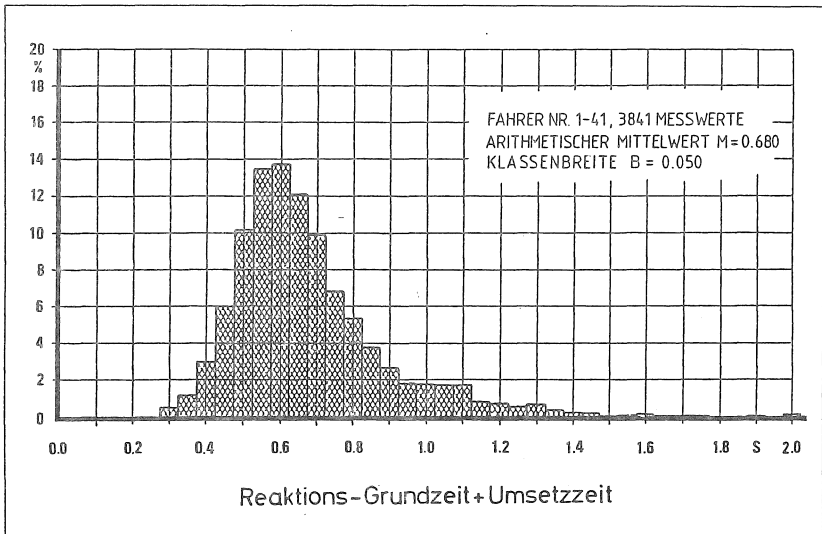


Abb. 2.6-2: Verteilung der Reaktionsgrund- und Umsetzzeiten, Stichprobenumfang: 3841 Meßwerte, Quelle: BURCKHARDT (1985)

Für die praktische Anwendung empfiehlt BURCKHARDT (1985): "Das Reaktionsverhalten eines voll auf den 'Vordermann' konzentrierten Fahrerkollektivs kann durch die Weibull-Verteilung dargestellt werden. Diese Verteilung ist somit Untersuchungen über das Fahrzeugfolgeverhalten zugrunde zu legen." Die empirische Grundlage der in Abbildung 2.6-2 gezeigten Verteilung ist eine von SCHIEMANN (1981) durchgeführte Messung mit 41 verschiedenen Fahrern und insgesamt 3841 Messwerten von Reaktionszeiten.

Für die vorliegende Arbeit erfolgte eine Aufbereitung der Meßergebnisse von SCHIEMANN, die es anhand der Verteilungen und Summenhäufigkeiten der Weibullparameter erlaubt, personenspezifische Reaktionszeitparameter zu generieren. Im Verlauf der Simulation werden mit Hilfe von Zufallszahlen stets neue (intrapersonell verschiedene) Reaktionszeiten erzeugt, die der jeweils personenspezifischen Weibullverteilung folgen (vgl. Abschnitt 4.1).

Mindestbestandteile der Reaktionszeiten sind die Reaktionsgrundzeit und die Umsetzzeit. Für einen ca. 10%-igen Anteil der generierten Reaktionszeiten erfolgt eine Korrektur um eine Blickzuwendungszeit mit ebenfalls inter- und intrapersonell verteilten Reaktionszeitzuschlägen um maximal 0,5 s.⁶ Diese Zuschläge für Blickzuwendungszeiten wiederum werden dann unterdrückt, wenn das betrachtete Fahrer-Fahrzeug-Element aktiv bremsst. Es wird dann davon ausgegangen, daß die auslösende Situation für die aktive Bremsung solange im direkten Blickfeld behalten wird, bis eine aktive Bremsung nicht mehr notwendig ist.

⁶ Es handelt sich dabei um eine Vereinfachung des Tatbestandes, daß die empirisch ermittelten Reaktionszeiten einer Überlagerung von zwei Weibull-Verteilungen gehorchen, von denen vermutet wird, daß der Anteil von 10-20% höhere Reaktionszeiten (zweite Weibull-Verteilung) auf die Fälle zurückzuführen sind, in denen das vorausfahrende Fahrzeug nicht im direkten Blickfeld des nachfolgenden Fahrers lag. (Vgl. BUCKHART, 1985).

3 Das Modell: Fahrer-Fahrzeug-Elemente als Fuzzy-Regler

Bei der Modellformulierung für ein Fahrer-Fahrzeug-Element (FFE) steht die Aufgabe des Fahrzeugführers im Mittelpunkt, aus einer nahezu unendlichen Fülle von Reizen mit Hilfe seiner Erfahrungen sowie im Rahmen seiner physiologischen und psychologischen Möglichkeiten relevante Informationen herauszufiltern und zu einer der Situation angemessenen Entscheidung über im wesentlichen zwei Größen weiterzuverarbeiten:

- Wahl einer Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung
- Wahl eines Lenkwinkels für Richtungsbestimmung bzw. Fahrstreifenwechsel

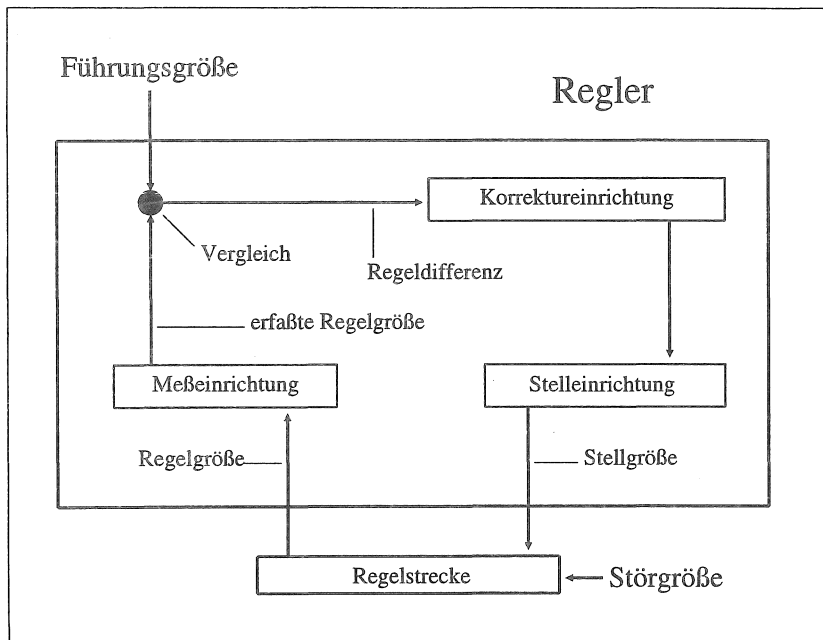


Abb. 3-1: Schema eines Regelkreises

Ein der Situation angemessenes Fahrverhalten verlangt eine fortwährende Beobachtung der Umgebung sowie der Auswirkungen vorangegangener Entscheidungen. Der Fahrer läßt sich damit als Regelkreis modellieren (Abb. 3-1).

Ein Regelkreis beschreibt ganz allgemein das Zeitverhalten von Systemen und deren Rückkopplungsmechanismen. Zeitveränderliche Größen werden auf vorgegebene Werte bzw. Wertebereiche gebracht und dort stabilisiert. Diese zeitveränderlichen Größen sind die Regelgrößen des Regelkreises, die mit Führungsgrößen (Sollgrößen) verglichen und durch Veränderung der Stellgrößen beeinflusst werden.

Einzelnen Bestandteilen des Regelkreises können dann folgende verkehrsrelevante Größen bzw. Begriffe der eingangs angeführten Grundgleichung der Fahrzeugfolge­theorie (vgl. Abschnitt 2.1) zugeordnet werden:

Stellgröße:	Beschleunigung, Lenkwinkel, "Reaktion"
Regelgröße:	Geschwindigkeit, Abstand
Führungsgröße:	Wunschgeschwindigkeit, Sicherheitsabstand
Störgröße:	Interaktionspartner, Gradiente der Fahrbahn
Regeldifferenz:	"Reiz"
Korrektur­einrichtung:	"Empfindlichkeit"

Für ein Fahrer-Fahrzeug-Element wird der Spielraum für Interaktionen im jeweiligen Umfeld abgesteckt durch:

- Gesetze der Kinematik (Beschleunigungs- bzw. Verzögerungspotential)
- Eigenschaften des Fahrers (Wunschgeschwindigkeit, Reaktionszeiten)
- Merkmale des Fahrzeugs (Leistung, Höchstgeschwindigkeit, Masse)

- Position im Raum und im Verhältnis zu anderen Verkehrsteilnehmern
- Konventionen des Verkehrsverhaltens (Straßenverkehrsordnung)
- Rahmenbedingungen der Umwelt (Fahrbahntyp, Wetter)

Hierin sind sozusagen die Definitions- und Wertebereiche vorgegeben, in denen sich die gewählten Variablen eines Simulationsmodells bewegen können. Die Formulierung eines solchen Regelkreises als Fuzzy-Regler soll eine vergleichsweise transparente Darstellung der Informationen gewährleisten, die vom Fahrer aufgenommen, bewertet und gewichtet, zu einer permanenten Neueinschätzung seiner momentanen Situation verarbeitet und zu einer angemessenen Wahl der Reaktion genutzt werden.

Ein Fuzzy-Regler kann als ein dynamisch arbeitender "Funktionsschätzer" für die Ausgangsvariablen des Regelkreises interpretiert werden, dessen "Wissensbasis" in Form eines Regelkatalogs die gesammelte Fahrerfahrung repräsentiert und durch "Lernen" (Modifikation des Regelkatalogs) erweitert und verfeinert werden kann.

3.1 Eingangs- und Ausgangsvariable des Fuzzy-Reglers

Bei der Auswahl der relevanten Modellvariablen für die Formulierung eines FFE als Fuzzy-Regler dienen zunächst die "traditionellen" kinematischen Parameter der Fahrzeugfolgegleichungen als Grundlage. Das Folgeverhalten wird darin durch vier Variablen beschrieben:

- Momentane Geschwindigkeit (v)
- Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug (dx)
- Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug (dv)
- Beschleunigung (a)

Dabei ist die Beschleunigung die resultierende Ausgangsvariable und Reaktion auf die Eingangsvariablen. Die Geschwindigkeit und die Be-

schleunigung sind Variablen, die sich auf das betrachtete Fahrzeug beziehen. Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz sind erst durch den Vergleich (Differenz) der Variablenwerte zweier Fahrzeuge (Interaktionspartner) definiert. Zur eindeutigen Darstellung dieser beiden Variablen gelte folgende Konvention: Das vorausfahrende Fahrzeug trage den Index 1, das nachfolgende den Index 2. Der Nettoabstand zweier Fahrzeuge beträgt somit:

$$dx : = x1 - L1 - x2 \quad [m]$$

Die x-Koordinate orientiert sich am Fahrzeugbug und wird dabei in Fahrtrichtung gezählt; damit sind Abstände zwischen Fahrzeugen stets positiv.

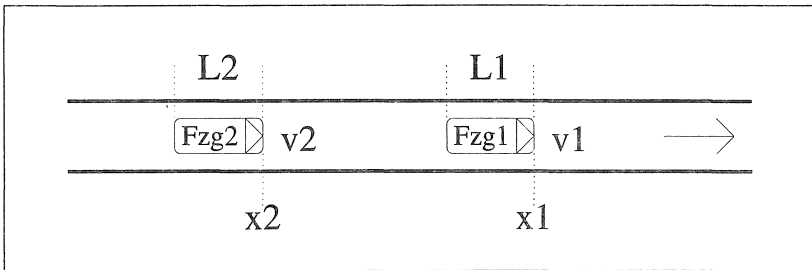


Abb. 3.1-1: Indizierung von Fahrzeugen, Differenzbildung

Analog ist die Geschwindigkeitsdifferenz definiert:

$$dv : = v1 - v2 \quad [m/s]$$

Eine negative Geschwindigkeitsdifferenz bedeutet also eine Annäherung der beiden Fahrzeuge, da das vorausfahrende Fahrzeug mit niedrigerer Geschwindigkeit fährt.

Darüberhinaus werden im Modell weitere Variablen zur besseren Beschreibung der zu beurteilenden Fahrsituation bereitgestellt. Aus den Variablen Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz läßt sich unmittelbar

die Variable "Potentielle Kollisionszeit" (tk) herleiten, die angibt, innerhalb welcher Zeit bei unveränderter Geschwindigkeitsdifferenz mit einer Kollision zu rechnen wäre (vgl. Abschnitte 2.4 und 2.5).

$$tk := - \frac{dx}{dv} \quad [s]$$

Die Zeitveränderlichkeit der potentiellen Kollisionszeit wird mit Hilfe der Variable Kollisionszeitänderung (dtk) erfaßt und ist dimensionslos [s/s].

$$dtk := \frac{tk(t_2) - tk(t_1)}{t_2 - t_1}$$

In Ergänzung zur Variable Abstand geht die Variable Fahrzeugdichte (k) über den unmittelbaren Interaktionspartner hinaus: Mit ihr wird der Raumbedarf (Summe der Bruttoabstände) einer Kette von n Interaktionspartnern eines betrachteten Fahrzeugs zu einer Fahrzeugdichte [Fzg/km] umgearbeitet.

$$k := \frac{n \cdot 1000}{\sum_{i=1}^n (L_i + dx_i)} \quad [Fzg/km]$$

Die Zeitveränderlichkeit der so definierten Fahrzeugdichte wird als Fahrzeugdichteänderung (dk) erfaßt und hat die Dimension [Fzg/km/s].

$$dk := \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Die beiden letztgenannten Variablen beruhen auf der Annahme, daß in der Realität nicht nur vom unmittelbaren Vorgängerfahrzeug Impulse für das Fahrverhalten ausgehen, sondern mit unterschiedlichen Gewichten von der Gesamtheit der Fahrzeuge im überschaubaren Verkehrsraum. Dies gilt sowohl für den aktuellen Fahrstreifen des betrachteten Fahrzeugs als auch für benachbarte Fahrstreifen.

Die Wunschgeschwindigkeit (v_w) ist nur eine Variable im weiteren Sinne: Unterschiedliche Fahrer-Fahrzeug-Elemente können verschiedene Wunschgeschwindigkeiten besitzen, die dann während eines Simulationslaufs für jedes Element unverändert bleiben. Dies gilt jedoch nur im Rahmen der vorliegenden Modellimplementation. Es ist durchaus denkbar, auch die Wunschgeschwindigkeit als eine über den Fahrtverlauf zeitveränderliche Größe zu modellieren, die beispielsweise von der Verkehrssituation oder vom Fahrtzweck (Verspätungen, Wunschfahrzeiten) beeinflusst sein kann.

Die Modellierung des Fahrstreifenwechsels erfolgt mit Hilfe der Variable Wechselentscheid (we), in der Einflüsse relevanter Interaktionspartner (Beispiel Fahrstreifenwechsel nach links: Behinderung durch langsamerer Fahrzeug voraus, Kontrolle des linken Fahrstreifens auf Wechselmöglichkeit) zusammengeführt und zu einem skalaren Entscheidungswert verarbeitet werden.

Der Fuzzy-Regler zur Nachbildung des Fahrverhaltens eines Fahrer-Fahrzeug-Elements besitzt damit das Repertoire von zehn Variablen, die sich nach den Kriterien Eingangs- bzw. Ausgangsvariablen (resultierende Variablen) und in ihrem Bezug auf ein oder mehrere Fahrzeuge unterscheiden (Tabelle 3.1-1).

	Eingangsvariable	Ausgangsvariable
Bezug auf Einzelfahrzeug	v_w, v	a, we
Fahrzeugpaar	dx, dv, tk, dtk	-----
mehrere Fahrzeuge	k, dk	-----

Tabelle 3.1-1

Kombiniert man die Variablen, die sich mindestens auf zwei Fahrzeuge beziehen, mit der Auswahl möglicher Interaktionspartner (vgl. Abschnitt

3.2), dann ergibt sich eine Matrix der möglichen Variablen, in der nur die im Modell realisierten Variablen durch entsprechende Kürzel gekennzeichnet sind (Tabelle 3.1-2). Ein gefülltes Matrixfeld zeigt an, daß diese Variable im Modell auch implementiert ist. Die angegebenen Kürzel werden im nachfolgenden Text weiterverwendet, ebenso die Kürzel:

B_v: Momentane Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs
 B_a: Beschleunigungswert desselben
 B_we: Fahrstreifenwechselentscheid desselben

Nähere Einzelheiten zu Bedeutung, Auswahl und der eigentlichen Ausgestaltung der Variablen sowie zu den funktionalen Zusammenhängen der Variablen untereinander sind Inhalt des Abschnitts 4.3.

Variable	Abstand	Geschwindigkeitsdifferenz	Potentielle Kollisionszeit	Kollisionszeitänderung	Fahrzeugdichte	Fahrzeugdichteänderung
Interaktionspartner	dx	dv	tk	dtk	k	dk
Vorne links (VL)	VL_dx		VL_tk		VL_k	VL_dk
Vorne (V)	V_dx	V_dv	V_tk	V_dtk	V_k	V_dk
Vorne rechts (VR)	VR_dx	VR_dv	VR_tk		VR_k	VR_dk
Hinten links (HL)	HL_dx		HL_tk			
Hinten (H)	H_dx		H_tk		H_k	H_dk
Hinten rechts (HR)	HR_dx		HR_tk			

Tabelle 3.1-2

3.2 Interaktionspartnerwahl

Bei der Darstellung einstreifigen Verkehrsablaufs sind einem betrachteten Fahrzeug (B) ein vorausfahrendes (V) und ein nachfolgendes Fahrzeug (H) zugeordnet. Falls keine Überholmöglichkeit existiert, ist diese Zuordnung von Interaktionspartnern eindeutig und über den Zeitverlauf unveränderlich (Abb. 3.2-1). Ob diese Interaktionspartner dabei für ein betrachtetes Fahrzeug verhaltensrelevant sind, hängt in erster Näherung von den Abständen zu diesen Partnern ab.

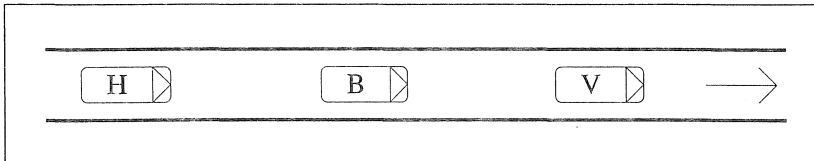


Abb. 3.2-1: Interaktionspartnerzuordnung bei einstreifigem Verkehrsablauf

Die Modellierung zweistreifigen Verkehrsablaufs mit Fahrstreifenwechselfvorgängen führt nicht nur zu einer größeren Anzahl möglicherweise relevanter Interaktionspartner, sondern erfordert auch eine Unterscheidung nach momentan benutztem Fahrstreifen sowie der Situation während eines Fahrstreifenwechsels.

Grundsätzlich sind für die zweistreifige Darstellung sechs mögliche Interaktionspartner zu unterscheiden: Vorne links (VL), vorne (V), vorne rechts (VR), hinten links (HL), hinten (H) und hinten rechts (HR), wobei zu einem Zeitpunkt für ein betrachtetes Fahrzeug (B) nur 4 möglicherweise relevante Interaktionspartner existieren. Dies wird zunächst für eine eindeutige Fahrstreifenzugehörigkeit dargestellt (Abb. 3.2-2).

Das vorausfahrende Fahrzeug (V) beispielsweise wird dabei durch die Fahrstreifenzugehörigkeit des betrachteten Fahrzeugs (B) definiert. Dies gilt für alle anderen Interaktionspartner analog. Falls ein Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt, soll dies durch Fahren auf der Trennmarkierung

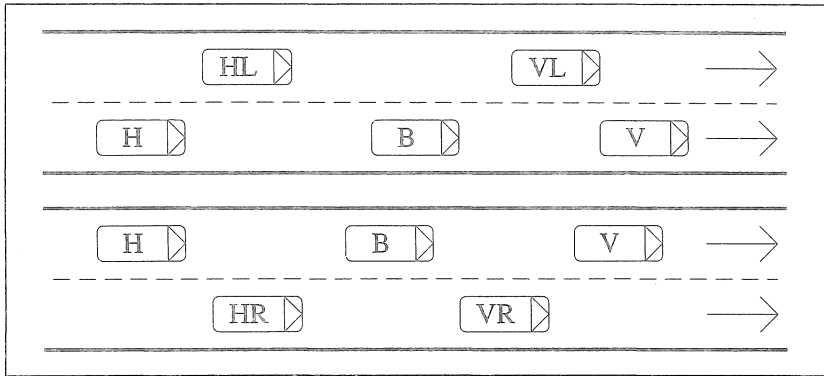


Abb. 3.2-2: Interaktionspartnerzuordnung bei zweistreifigem Verkehrsablauf

sowie den Besitz einer Wechselrichtung (nach rechts, nach links) angezeigt werden. Im folgenden gilt, daß ein Fahrzeug, das gerade einen Fahrstreifenwechsel durchführt, seinen vorderen (V), bzw. hinteren (H) Interaktionspartner auf demjenigen Fahrstreifen erkennt, den es selbst mit dem Wechsel anstrebt. Dabei wird zusätzlich berücksichtigt, ob z.B. das vorausfahrende Fahrzeug (V) schon auf dem Zielstreifen des betrachteten Fahrzeugs (B) fährt oder diesen selbst momentan durch Fahrstreifenwechsel zu erreichen sucht (vgl. Abb. 3.2-3).

Dies gilt für die hinteren Interaktionspartner analog. Für den Fall, daß manche Interaktionspartner zeitweise nicht existieren (ein auf dem linken Fahrstreifen befindliches Fahrzeug besitzt keine Interaktionspartner links, VL, HL), können von diesen Interaktionspartnern auch keine Einflüsse auf das momentane Fahrverhalten ausgehen.

Die dargestellte Systematik der Interaktionspartner umfaßt auch Fahrzeugüberdeckungen; für die Entscheidung "vorne" oder "hinten" wird der x-Koordinatenwert (in Fahrtrichtung) der Fahrzeugspitzen zum Vergleich herangezogen. Ein Fahrstreifenwechsel ist bei Überdeckung unmöglich.

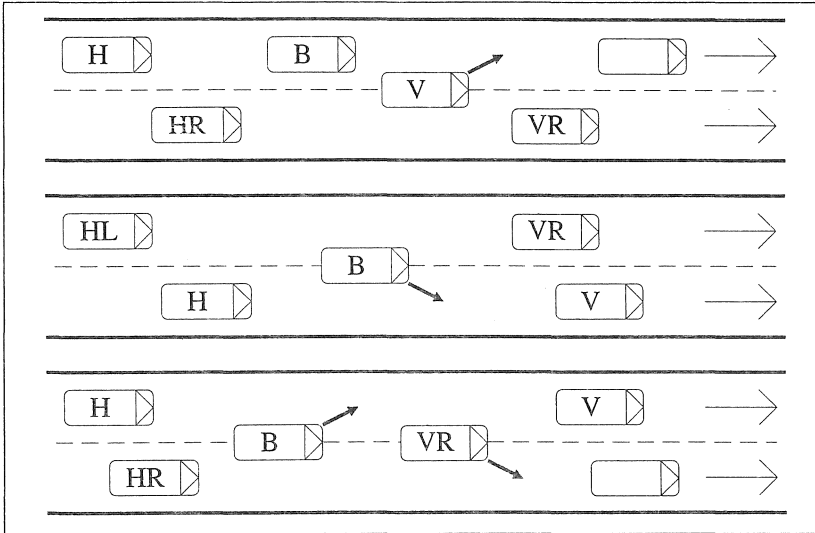


Abb. 3.2-3: Zuordnung der Interaktionspartner beim Fahrstreifenwechsel

3.3 Reaktionsfrequenz und Organisation aufeinanderfolgender Reaktionszeiten

Die in Abschnitt 2.6 vorgestellte Beschreibung von Reaktionszeiten stützt sich auf zeitliche Abläufe von Notbremsvorgängen, wie sie zur Beschreibung kritischer Verkehrszustände zwingend notwendig sind, jedoch nur einen verschwindend geringen Anteil am normalen Verkehrsgeschehen haben. Es ist daher zu prüfen, welche Konsequenzen sich aus der ständigen Anwendung von Reaktionszeiten ergeben, die nur in Ausnahmefällen im Verkehrsgeschehen auftreten.

Zunächst sei darauf verwiesen, daß es grundsätzlich schwierig ist, empirische Reaktionszeiten zu ermitteln, die sich nicht auf exakt definierte Situationen (wie z.B. Aufleuchten der Bremslichter des voranfahrenden Fahrzeugs) zurückführen lassen. In "normalen" Fahrsituationen dürfte eine zeitliche Zuordnung von auslösenden Reizen und korrespondierenden Reaktionen methodisch sehr schwer fallen.

Als mittelbarer Hinweis auf eine Reaktionsfrequenz (Reaktionshäufigkeit) kann die Fixationsfrequenz des menschlichen Auges bei Fahrversuchen dienen. So existieren Zahlenangaben zur Fixation eines vorausfahrenden Fahrzeugs bzw. der vorausliegenden Fahrbahn in Höhe von 12-80 Fixationen/min (LEUTZBACH, PAPAVALIOU, 1988), jedoch wird keine Aussage darüber gemacht, ob die Fixationen zu konkreten Korrekturen des Folgeverhaltens mit derselben Frequenz führen.

Unabhängig von dieser Problematik ist aber zu erwarten, daß eine ständige Situationsüberprüfung (mit Reaktionszeitintervallen von z.B. 0,8s) bei unkritischen Fahrsituationen (z.B. Fahrt mit Wunschgeschwindigkeit bei "freiem" Verkehr) lediglich Reaktionen in Form von kaum wesentlichen Änderungen der Beschleunigung verursacht. Nach "außen" ist nicht unbedingt für andere simulierte Verkehrsteilnehmer erkennbar, ob überhaupt eine Reaktion stattgefunden hat. Das Fahrzeug verhält sich dann so, als ob keine Situationsüberprüfung stattgefunden hätte. Dem Effekt, daß durch häufigeres Überprüfen der Situation eventuell eine schnellere Konvergenz an eine Wunschgeschwindigkeit bei kleineren Abweichungen von derselben erfolgt, muß an geeigneter Stelle des Modells (z.B. im Regelkatalog) begegnet werden.

Im Simulationsmodell sind zwei Situationen definiert, in denen für ein betrachtetes Fahrzeug eine Situationseinschätzung, eine daraus resultierende Reaktion (z.B. Beschleunigung) sowie die Erzeugung einer Reaktionszeit durchgeführt wird, nach deren Ablauf die Reaktion in Kraft tritt:

- Alle vormals erzeugten Reaktionszeiten sind abgelaufen und die entsprechenden Reaktionen wurden in Kraft gesetzt.
- Die Bremslichter des voranfahrenden Fahrzeugs beginnen zu leuchten (aktive Bremsung des Vordermanns).

Die Situation, daß für ein Fahrzeug mehr als eine Reaktionszeit mit entsprechender Reaktion vorliegen kann, ergibt sich aus der Möglichkeit, daß die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchten, wäh-

rend eine Reaktionszeit "abgewartet" wird, die sofort ermittelte neue Reaktion aber erst nach dem Inkrafttreten der noch durchzuführenden Reaktion realisiert wird (Abb. 3.3-1). Für den Fall, daß eine neue Reaktionszeit generiert wird, die früher als die gerade ablaufende Reaktionszeit vorbei ist, werden das Reaktionszeitende und die Reaktion der laufenden Reaktionszeit durch die neuen Werte ersetzt.

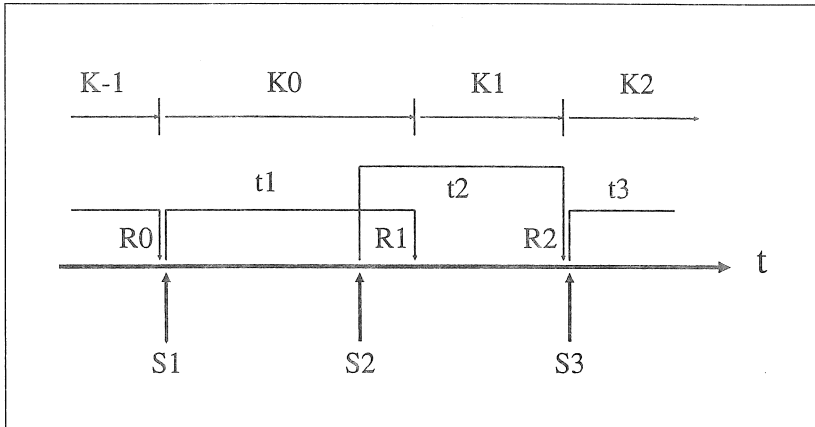


Abb. 3.3-1: Organisation der Reaktionszeitintervalle

- Si: Situationseinschätzung zum Zeitpunkt i
- ti: Reaktionszeitintervall zwischen der Situationseinschätzung und der Inkraftsetzung der zugehörigen Reaktion
- Ri: Reaktion (Beschleunigungswahl) aufgrund der Situationseinschätzung
- Ki: Fortschreibung der kinematischen Bewegung aufgrund der in Kraft gesetzten Reaktion

Beispiele:

- S1: Situationseinschätzung nach Ablauf einer Reaktionszeit und nach Inkraftsetzen der zugehörigen Reaktion R_0 .
- S2: Situationseinschätzung ausgelöst durch Aufleuchten der Bremslichter des voranfahrenden Fahrzeugs.

Die Simulation erfolgt grundsätzlich in diskreten Zeitschritten, d.h. nach Ablauf eines Simulationszeitschritts werden anhand der kinematischen Situation zum Zeitpunkt der letzten Aktualisierung und der Dauer des gewählten Zeitschritts die kinematischen Bewegungen aller simulierten Elemente mit Hilfe der Bewegungsgleichungen fortgeschrieben und bei all den Elementen eine Situationseinschätzung durchgeführt, deren Reaktionszeiten zum aktuellen Zeitpunkt abgelaufen sind oder für die eine Situationseinschätzung durch besondere Situationen (Bremslichter) erforderlich wird. Daraus wird deutlich, daß zulässige Reaktionszeiten nur ganzzahlige Vielfache des gewählten Simulationszeitschritts sein dürfen. Dem vorliegenden Modell ist ein Simulationszeitschritt von 0,1s zugrundegelegt. Damit wurde zugunsten einer feineren Differenzierung der Reaktionszeiten ein höherer Rechenaufwand und ein zusätzlicher Speicherbedarf in Kauf genommen.

3.4 Beschreibung des Fahrverhaltens

Die Verwendung einer Fuzzy-Logic zur Modellierung des Fahrverhaltens eines Fahrer-Fahrzeug-Elements ermöglicht eine relativ "sprachnahe" Formulierung in Form von Regeln. Voraussetzung für die Zusammenstellung eines Regelkatalogs ist jedoch zunächst ein Konzept, in dem konkrete Einzelheiten des Fahrverhaltens beschrieben sind. Die Elemente für die Beschreibung des Fahrverhaltens sind mit den Variablen des Regelkreises und den möglichen Interaktionspartnern vorgegeben. In diesem Rahmen werden Einzelaspekte des Fahrzeugfolgevorgangs und der Entscheidung über einen Fahrstreifenwechsel beschrieben, ohne daß auf möglicherweise widersprüchliche Wirkungen der Einzelaspekte eingegangen werden muß, da der Fuzzy-Regler in der Lage ist, solche Widersprüche mit einem Kompromiß zwischen widersprüchlichen Regelwirkungen durch "gewichtete Mittelwertbildung" zu verarbeiten. Einfache Teilaspekte des Fahrverhaltens beziehen sich nur auf die Bewertung einer Variable, andere kombinieren mehrere Variable, um Schlußfolgerungen für eine resultierende Variable zu beschreiben.

- Ein sehr einfacher Aspekt ist die Bewertung der gerade realisierten Geschwindigkeit. Ist diese im Vergleich zur gewünschten Geschwindigkeit zu niedrig, so wird die Reaktion auf eine Beschleunigung hinauslaufen. Wird die aktuelle Geschwindigkeit als zu hoch empfunden, wird man den Fuß vom Gaspedal nehmen oder aktiv bremsen, um sich der gewünschten Geschwindigkeit anzupassen. Kann man jedoch seine Wunschgeschwindigkeit gerade realisieren, wird man diese auch beibehalten wollen.
- In erster Näherung wird zu nahen Abständen zum vorausfahrenden Fahrzeug mit Bremsverzögerungen begegnet. Je näher man schon ist, desto stärker wird die Bremsung ausfallen. Größere Abstände für sich rufen keine Reaktion hervor.
- Hauptsächliches Element für die Steuerung des Fahrzeugfolgeverhaltens sind potentielle Kollisionszeiten. Oberhalb gewisser Grenzbereiche sind (wahrnehmbare) potentielle Kollisionszeiten ohne Einfluß auf die Beschleunigung, da noch genug Zeit für angemessene Reaktionen zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung steht. Unterhalb solcher Grenzen rufen kleiner werdende Kollisionszeiten immer stärkere Bremsverzögerungen hervor, bis bei kleinsten Kollisionszeiten auch eine Vollbremsung die angemessene Reaktion sein kann. Negative Kollisionszeiten sind für sich genommen unkritisch und bedürfen keiner Reaktion.
- Fällt eine als zu niedrig bewertete Geschwindigkeit mit negativen potentiellen Kollisionszeiten zusammen (das betrachtete Fahrzeug folgt beispielsweise einem schnelleren Fahrzeug und hat seine eigene Wunschgeschwindigkeit noch nicht erreicht), kann ohne Gefahr beschleunigt werden. Dasselbe gilt auch für geringe Abstände mit negativer potentieller Kollisionszeit: Diese kurzen Abstände müssen nicht durch Bremsen korrigiert werden (die negative Kollisionszeit bedeutet ja, daß sich der Abstand auch ohne Bremsreaktion vergrößern wird), bei zu geringer Geschwindigkeit ist in dieser Situation sogar eine begrenzte Beschleunigung

ohne Risiko denkbar. Solche Situationen können z.B. bei Anfahrvorgängen oder kurzfristig beim Fahrstreifenwechsel auftreten, in dem ein Fahrzeug vom linken Fahrstreifen kommend in knappem Abstand vor dem betrachteten Fahrzeug nach rechts einschert, bei diesem deshalb aber keine Bremsreaktion verursachen muß.

- Die Fahrzeugdichte vor einem betrachteten Fahrzeug reicht in ihrer Wirkung über das unmittelbar vorausfahrende Fahrzeug hinaus. Ist dieser Dichtewert zu hoch, so sollte ein angemessener Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug durch Gaswegnehmen oder leichtes Verzögern herbeigeführt werden. Erhöhter Sicherheitsbedarf wird durch steigende Dichtewerte bei schon hohem Dichteniveau signalisiert; die vorausfahrenden Fahrzeuge sind offensichtlich oder werden plötzlich langsamer. Eine Bremsreaktion ist dann unausweichlich, auch wenn der unmittelbare Vorgänger gemessen an der potentiellen Kollisionszeit noch keinen Bremsbedarf signalisieren sollte.
- Für auf dem linken Fahrstreifen befindliche Fahrzeuge sind hohe Geschwindigkeitsdifferenzen zu Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen ein gewisses Risiko. Falls also gemessen an der Geschwindigkeit des links fahrenden Fahrzeugs unüblich niedrige Geschwindigkeiten auf dem rechten Fahrstreifen gefahren werden, ist aus Vorsichtsgründen eine Geschwindigkeitsminderung durch leichtes Verzögern vernünftig.
- Das Rechtsüberholverbot läßt sich dadurch zuverlässig steuern, daß die potentielle Kollisionszeit zu einem Interaktionspartner vorne links ähnliche Wirkung hervorruft, wie diejenige in Bezug auf ein unmittelbar vorausfahrendes Fahrzeug.
- Es scheint plausibel, der potentiellen Kollisionszeit gerade bei Situationen, die mit dem Wechsel eines Interaktionspartners einhergehen, größeres Gewicht beizumessen als zum Beispiel dem Abstand oder der Fahrzeugdichte. Beispiel Fahrstreifenwechsel:

Ein Fahrzeug wechselt von rechts in die Lücke zwischen zwei Fahrzeugen und ändert damit drastisch die Werte für Abstand und (fahrstreifenbezogene) Fahrzeugdichte für das nachfolgende der beiden sich links befindenden Fahrzeuge. Bei annähernd gleichem Geschwindigkeitsniveau aller beteiligten Fahrzeuge können dadurch trotzdem potentielle Kollisionszeiten realisiert werden, die keine besondere Bremsverzögerung auslösen müssen. Dieser Effekt kann dadurch berücksichtigt werden, daß nur die Bewertung der potentiellen Kollisionszeit zu starken Verzögerungen führen kann.

- Beim Fahrstreifenwechsel sind stets mehrere Interaktionspartner in das Entscheidungskalkül miteinzubeziehen. Ausgelöst wird der Wechselwunsch entweder durch Annäherung an ein vorausfahrendes langsames Fahrzeug oder durch ein Unterschreiten der Wungeschwindigkeit. Ein Wechsel muß allerdings aufgrund der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen auch möglich (keine Überdeckung von Fahrzeugen) bzw. zulässig (keine oder nur eine zumutbare Behinderung anderer Verkehrsteilnehmer) und überdies auch noch vorteilhaft sein (z.B. kein ebenfalls langsames Fahrzeug vorne links). Falls also die Kollisionszeiten zu den linken Interaktionspartnern sowie die räumlichen Abstände gewisse Werte nicht unterschreiten, ist ein Wechsel nach links durchführbar.
- Beim Fahrstreifenwechsel nach rechts gilt ein ähnliches Entscheidungskalkül, allerdings können dabei alle relevanten Interaktionspartner die Entscheidung beeinflussen: Zu einem eventuell gerade überholten Fahrzeug hinten rechts ist ein Mindestabstand beim Wechsel einzuhalten, außerdem sollte das überholte Fahrzeug bei näheren Abständen langsamer sein (negative potentielle Kollisionszeiten bei kleineren Abständen). Auf dem rechten Fahrstreifen sollte nach vorne in absehbarer Entfernung oder Zeit keine neue Störung durch langsamere Fahrzeuge auftreten (Vermeidung häufiger Wechsel). Dies kann eventuell durch eine hohe Fahrzeugdichte hinter dem betrachteten Fahrzeug ("Drängeln") überdeckt

werden; es werden dadurch auch kleinere Lücken auf dem rechten Fahrstreifen akzeptiert, um eine Behinderung anderer Fahrzeuge zu mindern. Zum Wechsel nach rechts ist man überdies eventuell nur dann bereit, wenn das vorausfahrende Fahrzeug kein Hindernis (positive Kollisionszeit zum vorausfahrenden Fahrzeug und noch nicht realisierte Wunschgeschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs) darstellt.

Offenkundig ist es möglich, verbal ein "vernünftiges" Fahrverhalten in der dargestellten Form zu beschreiben und bei Bedarf zu erweitern. Wieviel hiervon Niederschlag in einem konkreten Regelkatalog für den Fuzzy-Regler findet, richtet sich jedoch nicht nur nach der Formulierbarkeit der entsprechenden Regeln, sondern sollte sich auch an der Wirkung auf den eigentlichen Simulationsverlauf (mikroskopisches Regler-Verhalten und makroskopische Kenngrößen) orientieren, um den Regelkatalog nur so umfangreich wie gerade notwendig zu halten.

4 Implementierung des Modells und Datengrundlage

Das in Kapitel 3 vorgestellte Modell wurde als PC-lauffähiges Programm in der Programmiersprache PASCAL objektorientiert realisiert. Grundlegendes Ziel ist es zu zeigen, daß die Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens mit Hilfe eines Fuzzy-Logic-Konzepts als zentralem Kern mit der erforderlichen Realitätsnähe möglich ist. Um den Implementierungsaufwand in vernünftigen Grenzen zu halten, wurde zunächst ein Teilaspekt möglicher Fahrsituationen als "Experimentierfeld" abgesteckt.

Das simulierbare Fahrverhalten beschränkt sich auf den Verkehrsablauf auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen von Schnellstraßen. Aus- und Einfädelvorgänge werden nicht berücksichtigt, ebenso wie Wirkungen von Fahrbahngradienten oder Kurvigkeit. Desweiteren bleibt der Schwerverkehr (Lkw, Lastzüge) unberücksichtigt. All die genannten Aspekte sind zwar für die Nachbildung des realen Verkehrsablaufs von Bedeutung, gleichwohl erscheint es gerechtfertigt, sich zunächst auf diejenigen Faktoren zu konzentrieren, die bei mikroskopischer Betrachtung des Fahrvorgangs relevant sind. Der Schwerverkehr läßt sich im Rahmen späterer Modellerweiterungen in seinem Fahrverhalten mit demselben Variablenumfang beschreiben wie reiner Pkw-Verkehr; das zur konkreten Variablen-gestaltung notwendige empirische Datenmaterial ist aber wesentlich dürftiger als dies beim Pkw der Fall ist. Das Prinzip der Modellbildung bleibt davon jedoch unberührt.

Die Modellentwicklung und die begleitende Implementierung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst lag das Hauptaugenmerk auf der Simulation des Fahrzeugfolgeverhaltens. Zu diesem Zweck kann interaktiv ein Fahrzeugpulk auf einer (einstreifigen) Untersuchungsstrecke platziert werden. Das erste Fahrzeug dieses Pulks wird mit Hilfe eines ebenfalls interaktiv zu erstellenden Logbuchs gesteuert, während sich die nachfol-

genden Fahrzeuge gemäß ihrer individuellen Parameter und mit Hilfe des Fuzzy-Reglers fortbewegen. Anhand dieses Modells wurden verschiedene Regelkataloge für das Fahrzeugfolgeverhalten entwickelt, die Ausgestaltung der Fuzzy-Variablen verbessert und Einsichten in das Stabilitätsverhalten des Fuzzy-Reglers gewonnen. Erst in einem zweiten Schritt wurde das Modell auf einen zweistreifigen Verkehrsablauf erweitert und dabei um die Variablen der verschiedenen Interaktionspartner und um die resultierende Variable "Fahrstreifenwechselentscheid" ergänzt. Die Option, das erste Fahrzeug durch ein Logbuch deterministisch zu steuern, wurde beibehalten, womit gezielt Störungen oder Engpässe auf dem rechten Fahrstreifen hervorgerufen werden können. Die Implementation offeriert somit zwei verschiedene Simulationsformen:

- A Vorgabe eines interaktiv zusammenstellbaren Fahrzeugkollektivs auf dem rechten Fahrstreifen, Option für ein Logbuch für das erste Fahrzeug, Möglichkeit des Fahrstreifenwechsels je nach Regelkatalog. Der Simulationsumfang wird nur durch die Vorgabe einer Zeit begrenzt, alle Fahrzeuge verbleiben während der gesamten Simulationsdauer im System. Die Simulation kann durch Eingabe einer neuen Simulationsdauer bei Bedarf fortgesetzt werden.

- B Vorgabe einer Untersuchungsstrecke mit Vor- und Nachlauf, Wahl von Verkehrsstärken und Parametern einer Wunschgeschwindigkeits-Normalverteilung für beide Fahrstreifen getrennt, Option für ein Logbuch für das erste Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen. Die Fahrzeuge werden im Verlauf der anzugebenden Simulationsdauer getrennt nach Fahrstreifen mit exponentialverteilterm Zeitabstand eingesetzt und nur bis zum Überschreiten der Teststreckengrenze im System gehalten.

Sowohl die Eingabedateien (Regelkataloge, Fahrzeug-, Logbuchdateien) als auch die Simulationsergebnisse werden systematisch archiviert. Die Simulationsdateien sind über spezielle Module als Graphiken darstellbar und bilden die Grundlage für weitere Auswertungen.

Das Programm ist über eine benutzerfreundliche Oberfläche zugänglich, die dem Anwender das Experimentieren mit dem Modell erleichtert. Die Leistungsfähigkeit des Modells liegt bei Verwendung eines 486er-PC's (50 MHz) bei etwa 25 Fahrzeugen in Echtzeit.

4.1 Generierung von Fahrer-Fahrzeug-Elementen, Berechnung von Reaktionszeiten und Beschleunigungsgrenzwerten

Während einer Simulation (nach Fall B) sind ständig neue Fahrer-Fahrzeug-Elemente zu generieren. Um realen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen, sind diese Einheiten mit Parameterwerten auszustatten, die sowohl Fahrer- als auch Fahrzeugeigenschaften beschreiben. Im vorliegenden Modell werden für jedes FFE folgende Parameter erzeugt:

- Fahrerbeschreibung:
 - Wunschgeschwindigkeit
 - Parameter zur Reaktionszeitverteilung
- Fahrzeugbeschreibung:
 - Maximale Motorleistung
 - Höchstgeschwindigkeit
 - Gewicht (Masse)

Die Wunschgeschwindigkeit wird aus einer Normalverteilung mit den in der Tabelle 4.1-1 (entnommen: SCHNITTGER, 1991) angegebenen Verteilungsparametern gewonnen, die auf zahlreichen Messungen des Instituts für Verkehrswesen beruht (vgl. z.B. WIEDEMANN, BECKER, BUCK, 1985).

Wunschgeschwindigkeit	μ	δ	max	min
rechter Fahrstreifen	31,39	5,56	47,22	20,83
linker Fahrstreifen	36,94	5,56	51,39	26,39

Tab. 4.1-1

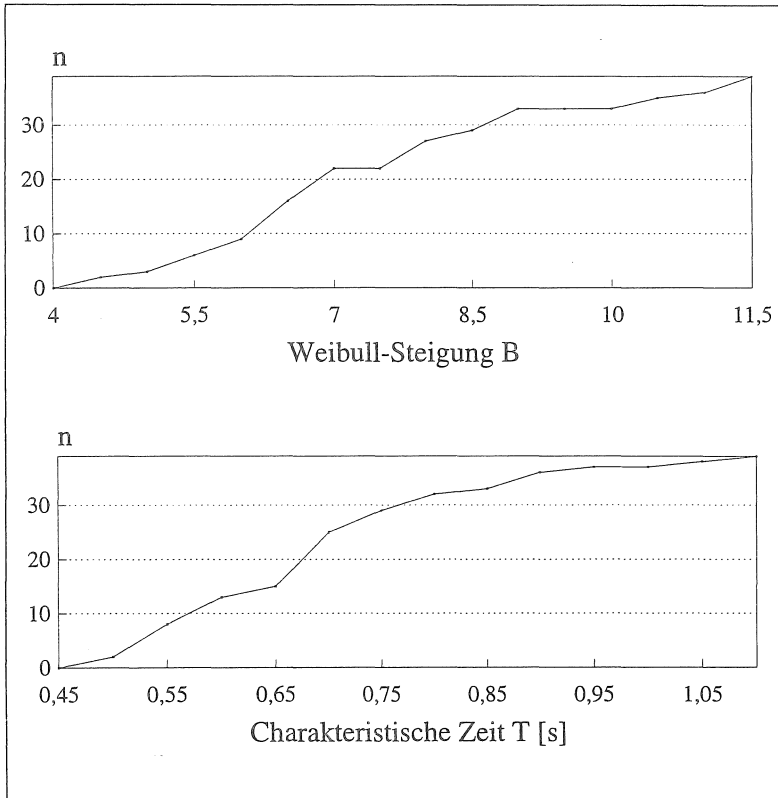


Abb. 4.1-1: Empirische Summenhäufigkeitsfunktionen der Weibullparameter B und T für die Reaktionszeitgenerierung, Quelle: SCHIEMANN (1981), eigene Berechnungen

Wie schon in Abschnitt 2.6 dargelegt, gehorchen die Reaktionszeiten, die beim Fahrzeugfolgeprozeß zugrundegelegt werden, der Weibull-Verteilung. Bei Erzeugung eines FFE müssen dafür zunächst individuelle Parameter für diese Verteilung gezogen werden. Grundlage⁷ dafür

⁷ In der Arbeit von SCHIEMANN wurden die Weibullparameter der Reaktionszeiten für 41 Personen ermittelt, wovon für die vorliegende Arbeit zwei "Ausreißer" ausgegrenzt wurden (n=39).

sind empirische Summenhäufigkeitsfunktionen, die aus den Ergebnissen der Arbeit von SCHIEMANN (1981) erstellt wurden (Abb. 4.1-1).

Während der Simulation werden dann individuelle Reaktionszeiten stochastischen Charakters mit Hilfe gleichverteilter Zufallszahlen generiert:

$$tr_1 := T_i \cdot \left(-\ln \left(1 - \frac{z}{100} \right) \right)^{(1/B_i)}$$

- tr_1 : Reaktionszeit (Reaktionsgrundzeit + Umsetzzeit)
- T_i : Charakteristische Reaktionszeit des Fahrers i (Weibull-Parameter)
- B_i : Weibull-Steigung des Fahrers i (Weibull-Parameter)
- z : Gleichverteilte Zufallszahl $\in [0, \dots, 99]$

Für etwa die Hälfte der Stichprobe der genannten Arbeit wurde eine Kombination zweier überlagerter Weibullverteilungen festgestellt, die als mehr oder weniger ausgeprägtes Einfließen von Blickzuwendungszeiten in die gesamte Reaktionszeit interpretiert wurde. Aus systematischen Untersuchungen der einzelnen Verteilungen wurde eine vereinfachte Korrektur für die Blickzuwendungszeit hergeleitet:

$$tr_2 := \begin{matrix} tr_1 + (z - 90) \cdot \frac{0,5}{9} \cdot \text{trunc} \left(\frac{z_i}{50} \right) & \text{für } z > 90 \\ tr_1 & \text{sonst} \end{matrix}$$

- tr_2 : tr_1 + Blickzuwendungszeit
- z_i : Fahrerspezifische gleichverteilte Zufallszahl $\in [0, \dots, 99]$

Die Zufallszahl z_i wird zusammen mit T_i und B_i bei Einsetzen eines neuen FFE erzeugt und bleibt für die Simulationsdauer unverändert. Zusammen mit der Funktion "trunc" gewährleistet sie eine etwa hälftige

Aufteilung der FFE auf solche mit und solche ohne eventuelle Blick-zuwendungszeit. Dieser Zeitzuschlag wird insgesamt relativ selten generiert, kann aber im Einzelfall durchaus die Form der Reaktion (Heftigkeit bei späterem Reagieren auf Bremsung des Vorderfahrzeugs) beeinflussen.

Eine abschließende Korrektur der Reaktionszeit ergibt sich aus folgender Hypothese: Wenn ein Fahrer eine aktive Bremsung begonnen hat, ist seine Aufmerksamkeit auf die auslösende Situation solange erhöht (und damit reaktionszeitverkürzend), bis er die aktive Bremsung beendet hat. Für diesen Fall wird die bis dahin ermittelte Reaktionszeit tr_2 durch die charakteristische Reaktionszeit T_i nach oben begrenzt:

$$tr_3 : = \begin{array}{ll} \max (tr_2 , T_i) & \text{während aktiver Bremsung} \\ tr_2 & \text{sonst} \end{array}$$

Eine Anpassung von tr_3 an die diskreten Zeitschritte der Simulation erfolgt dann durch Runden auf 1/10 s.

Die hier aufgezeigte sehr differenzierte Behandlung der Reaktionszeiten erfordert zwar einen erhöhten Rechenaufwand, besonders in Form des kurzen Simulationszeitschritts von 1/10 s, ist aber im Vergleich zu anderen Implementationen empirisch belegbar, plausibel und genauer. Da sie die einzige Variable ist, die während des Simulationslaufes nach stochastischen Gesetzmäßigkeiten laufend erzeugt wird, erscheint eine besondere Sorgfalt bei ihrer Berechnung angezeigt.

Die zur Fahrzeugbeschreibung notwendigen Daten beruhen auf zwei Quellen: Aus einer Statistik des Kraftfahrtbundesamtes (1990) wurden die Leistungsklassen des Personenkraftwagenbestands entnommen. Die geringste Leistungsklasse besitzt eine Obergrenze von 14 kW, die höchste Leistungsklasse umfaßt Fahrzeuge mit mehr als 120 kW. Einem aktuellen Kraftfahrzeugmagazin wurde eine Stichprobe von 266 Personenkraftwagen mit den drei Merkmalen Motorleistung, erreichbare Höchstgeschwindigkeit und Gewicht entnommen. Anhand der Leistungs-

klassen gemäß Kraftfahrtbundesamt wurden daraus zwei empirische Tabellen bedingter Verteilungen für die Merkmalskombinationen Leistung-Höchstgeschwindigkeit und Leistung-Gewicht erstellt. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode können daraus Wertetripel der genannten Variablen gezogen werden, die während einer Simulation zu einem realitätsnahen Fahrzeugbestand im Simulationssystem führen.

Anhand dieser drei Kenngrößen lassen sich unter Einbeziehung einfacher energetischer Betrachtungen⁸ zwei Grenzwerte der Beschleunigung in Abhängigkeit einer gegebenen Geschwindigkeit herleiten (vgl. Anhang 8.4).

Erstens sollen während der Simulation nur physikalisch mögliche Maximalbeschleunigungen Verwendung finden. Für ein betrachtetes Fahrzeug ist die mögliche maximale Beschleunigung in Abhängigkeit von der momentanen Geschwindigkeit $a_{\max}(v)$ in erster Näherung angebbbar als:

$$a_{\max}(v) \cong \sqrt{v^2 + \frac{2}{m} \cdot \left(L_{\max} - \frac{L_{\max}}{L_{\text{Verl.}}(v_{\max})} \cdot L_{\text{Verl.}}(v) \right)} - v$$

- $a_{\max}(v)$: Maximal mögliche Beschleunigung in Abhängigkeit von v
- v : momentane Geschwindigkeit
- v_{\max} : Maximalgeschwindigkeit
- m : Gewicht (Masse)
- L_{\max} : Maximalleistung
- $L_{\text{Verl.}}(v)$: Verlustleistung in Abhängigkeit von v
- $L_{\text{Verl.}}(v_{\max})$: Verlustleistung in Abhängigkeit von v_{\max}

⁸ Einflußfaktoren wie die Fahrbahngradienten oder rotierende Massen bleiben hier unberücksichtigt, da hiervon keine wesentlichen Auswirkungen auf das Simulationsergebnis zu erwarten sind.

Dabei ist die Verlustleistung eine durch Regression ermittelte Funktion der momentanen Geschwindigkeit:

$$L_{\text{verl.}} \cong 0,3456 \cdot v \quad \text{für } v \in [0, \dots, 13,9 \text{ m/s}]$$

$$13 - 1,408 \cdot v + 0,059 v^2 \quad \text{für } v > 13,9 \text{ m/s}$$

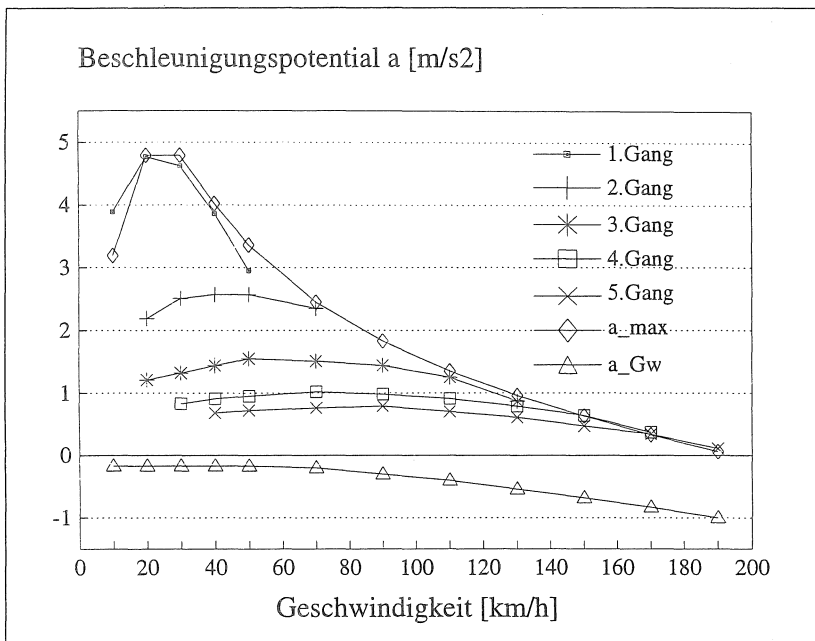


Abb. 4.1-2: Beschleunigungspotential und Verzögerung durch Reibung ("Gas-weg") bei einem Pkw mit 85 kW, 1555 kg, 0% Steigung, Quelle: Opel AG, eigene Berechnungen

Der zweite Grenzwert trennt den Bereich des aktiven Bremsens vom Bereich des Verzögerns durch "Gas-Wegnehmen". Im Fall des "Gas-Wegnehmens" bewirkt dieselbe Verlustleistung, die der Maximalleistung bei Höchstgeschwindigkeit die Waage hält, ein Abbremsen:

$$a_{Gw}(v) \cong \sqrt{v^2 - \frac{2}{m} \cdot \left(\frac{L_{\max}}{L_{Verl.}(v_{\max})} \cdot L_{Verl.}(v) \right)} - v$$

$a_{Gw}(v)$: Verzögerung durch Reibungsverluste in Abhängigkeit von der momentanen Geschwindigkeit v

Falls ein FFE eine stärkere Verzögerung als "Gas-weg" bewirken will, wird aktives Bremsen (Benutzung des Bremspedals) und damit ein Aufleuchten des Bremslichtes initialisiert. Dies ist für nachfolgende Fahrzeuge im Simulationssystem dann erkennbar. Abbildung 4.1-2 stellt für ein typisches Fahrzeug sowohl das maximale Beschleunigungspotential in Abhängigkeit von den fünf Fahrstufen als auch die beiden Beschleunigungsgrenzwerte nach den oben angeführten Formeln dar.

4.2 Messung potentieller Kollisionszeiten

Während zur Beschreibung der meisten Modellvariablen des Fuzzy-Reglers auf schon vorhandenes, z.T. umfangreiches empirisches Datenmaterial zurückgegriffen werden konnte, mußten für die neu eingeführte Variable "Potentielle Kollisionszeit" erst Messungen durchgeführt werden, um Anhaltspunkte für typische Schwellenwerte oder funktionale Abhängigkeiten von anderen Variablen gewinnen zu können. Dabei kamen zwei unterschiedliche Meßmethoden zum Einsatz, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

4.2.1 Messung potentieller Kollisionszeiten durch Entfernungsmessung mit Radarsensoren

Im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes (WIEDEMANN, REITER, n.n.v.) konnte auf Meßdaten eines Versuchsfahrzeugs zurückgegriffen werden, welches mit Hilfe von Radarsensoren Entfernungen vorausfahrender Fahrzeuge erfaßte. In Kombination mit der Protokollie-

rung des zurückgelegten Weges des Versuchsfahrzeugs (ebenso Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungswerte) im 0,1-sec-Takt war damit die Berechnung potentieller Kollisionszeiten mit hoher Genauigkeit möglich. Damit konnte (nach entsprechender Datenaufbereitung) ein Einblick in typische Größenordnungen und Zeitverläufe von potentiellen Kollisionszeiten beim Fahrzeugfolgeprozeß gewonnen werden. Mit Hilfe der Daten verschiedener Meßfahrten mit unterschiedlichen Fahrern auf Schnellstraßen, welche sowohl fließenden als auch stauenden Verkehr umfassen, werden einige Zusammenhänge dargestellt.

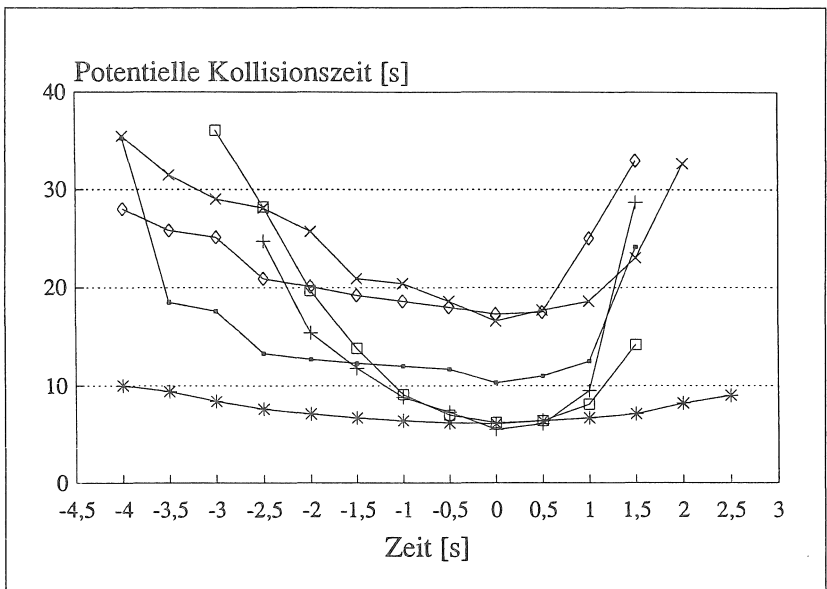


Abb. 4.2.1-1: Annäherungsvorgänge als Zeitreihen potentieller Kollisionszeiten in 0,5s-Schritten (Zeitreihenminimum zum Zeitpunkt 0)

Abb. 4.2.1-1 zeigt eine Auswahl typischer Kollisionszeitreihen, wie sie bei Annäherung zweier Fahrzeuge entstehen. Die sechs abgebildeten Zeitreihen bilden eine Auswahl aus Fahrsituationen, denen ein Geschwindigkeitsbereich von 20-30 m/s und teilweise Bremsaktionen des

Vorausfahrenden zugrunde liegen. Das hier dargestellte Minimum von etwa 6 sec wird sowohl in einer Annäherung ohne aktive Bremsung des Vordermanns (flache Kurve) als auch mit aktiver Bremsung erreicht. Eine aktive Bremsung des Vordermanns ist nicht zwangsläufig mit einem kleinen Kollisionszeitminimum verbunden. Vielmehr scheint eine Beziehung zwischen dem Geschwindigkeitsniveau und einer Schranke zu existieren, unterhalb derer Meßwerte von potentiellen Kollisionszeiten weniger wahrscheinlich werden, weil ein Unterschreiten einer solchen Schwelle durch rechtzeitiges Reagieren vermieden wird.

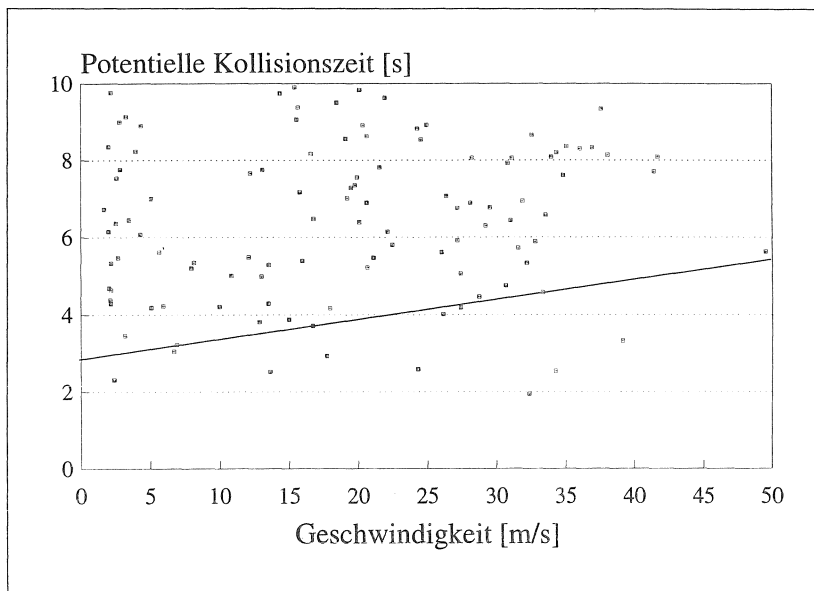


Abb. 4.2.1-2: Potentielle Kollisionszeitminima in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Abbildung 4.2.1-2 zeigt für die erwähnten Meßfahrten für den gesamten realisierten Geschwindigkeitsbereich die potentiellen Kollisionszeitminima während der Annäherungsphasen beim Fahrzeugfolgevorgang im Intervall $[0, \dots, 10]$ s. Offensichtlich werden bei niedrigen Geschwindigkeiten tendenziell geringere potentielle Kollisionszeiten erreicht als bei

höheren Geschwindigkeiten. Die eingetragene Schwelle ist eine Funktion der Form

$$tk_{Schwelle} = a + b \cdot v$$

und dient als Ausgangspunkt für eine funktionale Beziehung zwischen den Fuzzy-Variablen "Potentielle Kollisionszeit" und "Geschwindigkeit".

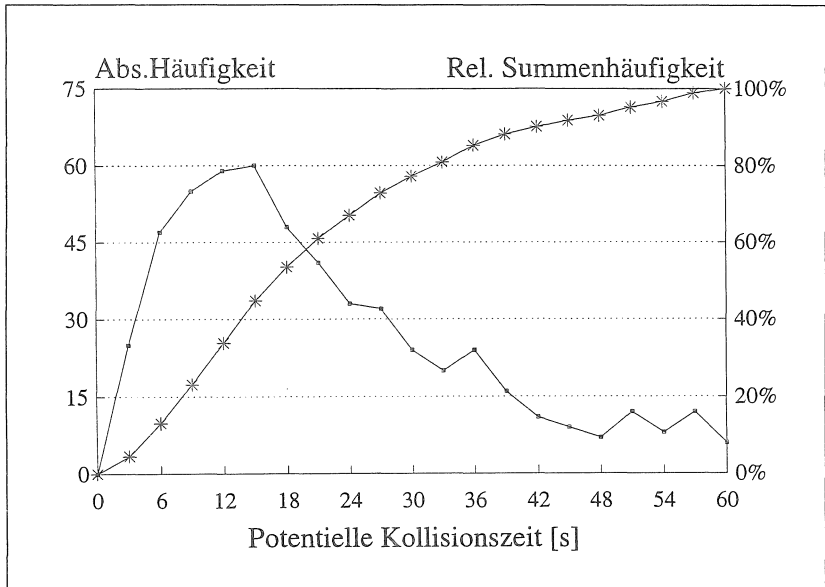


Abb. 4.2.1-3: Minimale potentielle Kollisionszeiten beim Fahrzeugfolgevorgang, 549 Meßwerte, Geschwindigkeitsbereich 0-180 km/h

Wenn man die Minima der potentiellen Kollisionszeiten während der Annäherungsphasen ihrem Betrag nach in Häufigkeitsklassen zusammenfaßt, ergibt sich Abbildung 4.2.1-3. Daß bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen während des Folgevorgangs unter Umständen potentielle Kollisionszeiten im Bereich bis 50 s wahrnehmbar sind, wurde bereits in Abschnitt 2.5 dargelegt. Allerdings ist zu vermuten, daß die potentiell-

le Kollisionszeit nur im unteren Bereich (6-18 s) reaktionsauslösend wirkt, da bei großen Werten kein akuter Handlungsbedarf wegen Kollisionsgefahr besteht. Kollisionszeitminima, die größere Werte aufweisen, entstehen zum Beispiel beim Folgen in größeren Abständen und geringen Geschwindigkeitsdifferenzen. In diesen Fällen dominiert vermutlich die Abstandswahrnehmung gegenüber dem Folgeverhalten. Die potentielle Kollisionszeit gewinnt ihre Bedeutung in "dynamischen" Fahrsituationen wie z.B. beim Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs.

4.2.2 Messung potentieller Kollisionszeiten durch Videobild-Auswertung

Die zweite Meßmethode zur Erfassung von potentiellen Kollisionszeiten fußt auf der in Abschnitt 2.5 eingeführten Definition:

$$t_k = \frac{\text{Abstand der Abbildung zweier Punkte eines Fahrzeugs}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit des Abstands dieser Punkte}}$$

Anhand der Vermessung von Einzelbildern einer Videoaufnahme spezifischer Verkehrssituationen können potentielle Kollisionszeiten berechnet werden. Nähere Angaben zu dieser Meß- und Auswertetechnik finden sich im Anhang (Abschnitt 8.2).

Das Hauptaugenmerk bei der Verwendung dieser Meßmethode lag auf der Erfassung potentieller Kollisionszeiten zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels nach links zur Überholung eines langsameren Fahrzeugs. Zu diesem Zweck wurde mit einer getarnten Videokamera der Verkehrsablauf hinter dem Meßfahrzeug aufgenommen. Als Versuchsstrecke erwies sich eine dreistreifige Autobahn (BAB 5 zwischen Rastatt und Bruchsal) als besonders günstig. Das Versuchsfahrzeug bewegte sich während der Messfahrten auf dem mittleren Fahrstreifen bei einem Geschwindigkeitsniveau von etwa 100 - 130 km/h. Aufgenommen und ausgewertet wurden dadurch überwiegend Pkw aller Größenklassen, daneben Kleintransporter, aber keine Lkw. Die Aufgabe bestand darin, potentielle Kollisionszeiten in dem Zeitintervall zu messen, in der die

Entscheidung zum Fahrstreifenwechsel vermutet werden kann. Vereinfachend wurde angenommen, daß diese Entscheidung von den Fahrern einheitlich 2,2 s (vgl. Anhang 8.2) vor Überfahren der Fahrstreifenmarkierung gefällt wird. Ausgewertet wurden Sequenzen von mindestens acht Standbildern pro Fahrzeug im zeitlichen Abstand von jeweils 0,4 s (10/25 s), endend mit dem Überfahren der Fahrstreifenmarkierung.

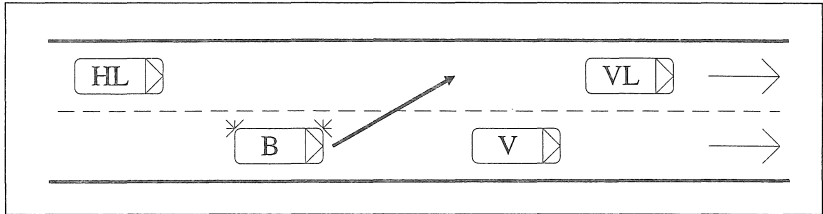


Abb. 4.2.2-1: Fahrsituation beim Fahrstreifenwechsel nach links

Die Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel nach links erfordert mindestens die Einschätzung des Vorderfahrzeugs, des Verkehrszustands nach vorne auf dem linken Fahrstreifen und vor allem eines sich eventuell von hinten auf dem linken Fahrstreifen annähernden Fahrzeugs (Abb. 4.2.2-1). Zwei verschiedene potentielle Kollisionszeiten sind bei diesem Vorgang von besonderem Interesse:

- Potentielle Kollisionszeit zwischen den Fahrzeugen B und V, "auslösende" Kollisionszeit für den Fahrstreifenwechsel. Diese läßt sich meßtechnisch erfassen, wenn V das Meßfahrzeug ist⁹.
- Potentielle Kollisionszeit zwischen den Fahrzeugen HL und B, "zugemutete" Kollisionszeit für das sich von hinten links nähernde Fahrzeug. Erfassung durch HL als Meßfahrzeug.

Aus der abgebildeten Fahrzeugkonstellation wird unmittelbar klar, daß die "zugemutete" Kollisionszeit ein "Drei-Fahrzeug-Problem" ist. Für

⁹ Wäre die Meßvorrichtung im fahrstreifenwechselnden Fahrzeug, könnte damit nur das Verhalten des Fahrers im Meßfahrzeug erfaßt werden. In der oben beschriebenen Anordnung werden jedoch unterschiedliche Fahrer erfaßt.

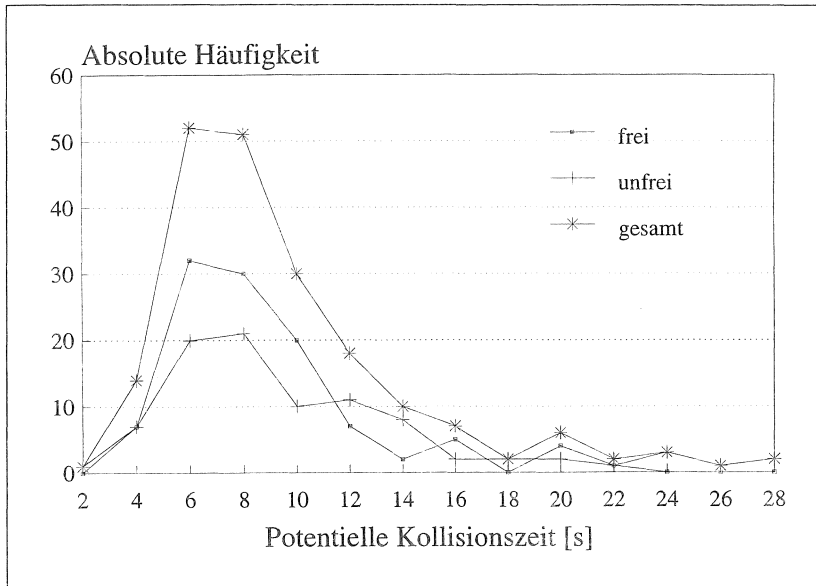


Abb. 4.2.2-2: "Auslösende" potentielle Kollisionszeiten beim Fahrstreifenwechsel nach links 2,2 s vor Überfahren der Fahrbahnmarkierung, Gesamtstichprobe n = 199

diese muß das Meßfahrzeug zeitlich und räumlich günstig im Verhältnis zu dem Fahrzeugpaar B und V zur Stelle sein. Reale Vorgänge dieser Art waren im Verlauf der Meßdurchführung daher auch sehr selten festzuhalten, so daß eine Auswertung befriedigenden Umfangs nur für die "auslösende" Kollisionszeit durchgeführt werden konnte. Für diese Kollisionszeit wurden 199 Vorgänge ausgewertet, von denen aufgrund der Videoaufnahmen nach Augenschein 108 das Prädikat "freier Fahrstreifenwechsel" erhielten. Für diese Vorgänge waren sich von hinten links nähernde Fahrzeuge für die Fahrstreifenwechselentscheidung nicht relevant. Die beiden Abbildungen 4.2.2-2 und 4.2.2-3 zeigen die Ergebnisse der Auswertungen.

Die als "unfrei" eingestufteten Wechselvorgänge unterscheiden sich in ihrer "auslösenden" potentiellen Kollisionszeit nur wenig von den "freien", der Streubereich ist allerdings etwas größer. Für den Fall "unfreier"

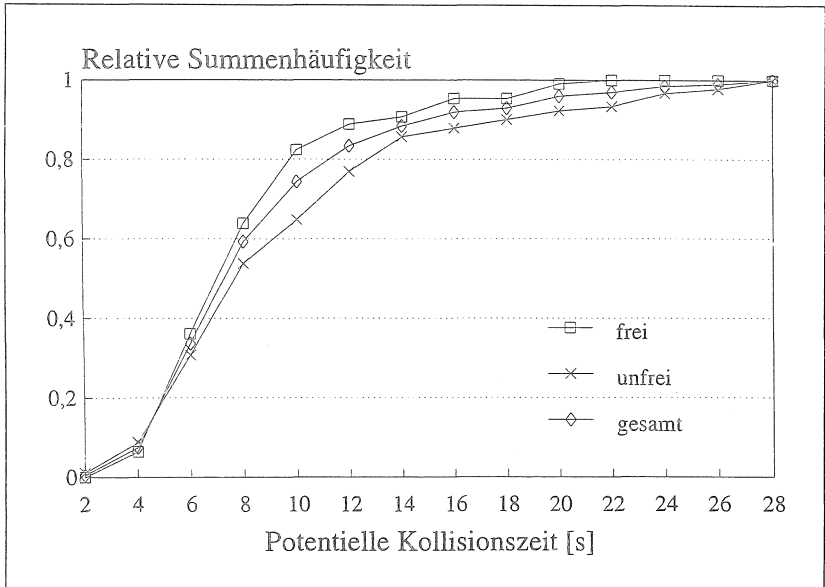


Abb. 4.2.2-3: Potentielle Kollisionszeiten beim Fahrstreifenwechsel nach links 2,2 s vor Überfahren der Fahrbahnmarkierung, Summenhäufigkeiten, $n=199$

Wechsel können sehr kleine Kollisionszeiten durch kurzfristige Inkaufnahme geringer Abstände zum Vorderfahrzeug in Erwartung bald frei werdenden Straßenraums auf dem linken Fahrstreifen entstehen. Falls das Ausnutzen knapperer Lücken (räumlich wie zeitlich) kinematisch nicht möglich ist, muß auf ein langsamerer Vorderfahrzeug zunächst mit Anpassung der Geschwindigkeitsdifferenz reagiert werden. Bei freiwerdendem linken Fahrstreifen führt die dann relativ niedrige Geschwindigkeitsdifferenz tendenziell zu höheren potentiellen Kollisionszeiten zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels¹⁰. In den meisten Fällen der "un-

¹⁰ Die Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel fällt in diesem Fall schon früher, muß jedoch auf einen kinematisch zulässigen Zeitpunkt verschoben werden. In der Praxis waren dabei auch negative potentielle Kollisionszeiten bei der Meßauswertung zu verzeichnen: Das überholwillige Fahrzeug war zu diesem Zeitpunkt also langsamer als das Meßfahrzeug. Bei "freiem" Wechsel waren die gemessenen Werte jedoch stets positiv.

freien" Wechsel scheint der Spielraum für die beteiligten Fahrer jedoch so groß gewesen zu sein, daß ähnliche "auslösende" Kollisionszeiten wie bei den "freien" Wechseln zu verzeichnen waren.

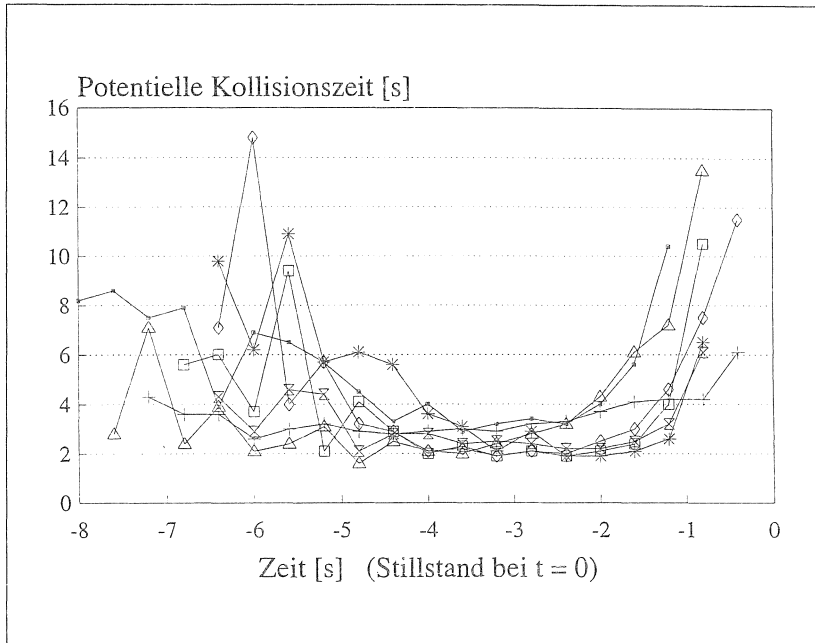


Abb.4.2.2-4: Zeitreihen potentieller Kollisionszeiten bei Annäherungsvorgängen bis zum Stillstand im Stadtverkehr

Vergleicht man Abb. 4.2.1-3 mit Abb. 4.2.2-2, fällt auf, daß die häufigsten Werte für minimale potentielle Kollisionszeiten im Fahrzeugfolgevorgang (6 - 18 s) größer sind als die häufigsten Werte für "auslösende" potentielle Kollisionszeiten (5 - 9 s). Dieser Sachverhalt scheint plausibel, wenn man bedenkt, daß während des Folgevorgangs auf einen noch länger maßgeblichen Interaktionspartner reagiert wird, wohingegen beim Fahrstreifenwechsel und dessen Vorbereitung antizipiert wird, daß das vorausfahrende Fahrzeug mit dem Wechsel seine Bedeutung als potentieller Kollisionspartner verliert und damit kurzfristig potentielle Kollisionszeiten in Kauf genommen werden, die geringer als beim Folgevor-

gang üblich sind. Genauere Aussagen hierzu scheinen aber erst auf der Grundlage wesentlich umfangreicheren Datenmaterials möglich.

Ein anderer Anwendungsfall für die beschriebene Meßmethode war die Registrierung von Zeitreihen potentieller Kollisionszeiten im Stadtverkehr bei Annäherungsvorgängen bis zum Stillstand (z.B. Annäherung an eine LSA). Gerade bei solchen Vorgängen ist der potentiellen Kollisionszeit und ihrer zeitlichen Änderung ein besonderes Gewicht beizumessen, da hier das führende Fahrzeug bei z.T. geringen Abständen durch aktive Bremsvorgänge erhöhte Anforderungen an das Folgeverhalten stellt. Abbildung 4.2.2-4 zeigt eine typische Auswahl aus etwa 60 gemessenen Annäherungsvorgängen. Die potentielle Kollisionszeit durchläuft dabei eine "Einschwingphase" (etwa 8 bis 5 s vor Stillstand), danach einen "Korridor" mit einem unteren bzw. oberen Schrankenwert von 2 bzw. 4 s (etwa 5 bis 2 s vor Stillstand) und abschließend eine "Entspannungsphase" (beginnend etwa 2 s vor Stillstand), die auf den Restabstand bei Stillstand zurückzuführen ist. Die gezeigten Verläufe sind mit dem idealisierten Beispiel in Abschnitt 2.4 gut vergleichbar (vgl. Tabelle 2.4-1).

4.3 Ausgestaltung der Modellvariablen

Die Fähigkeit eines Fuzzy-Reglers, verschiedene Variablenwerte gemäß eines Regelkatalogs in sprachnaher Form verarbeiten zu können, beruht auf der Transformation von skalaren Variablenwerten in Zugehörigkeitsgrade der entsprechenden Variablenmengen. Voraussetzung dafür ist eine durch Plausibilitätsbetrachtungen oder empirische Daten zu begründende Auswahl und Positionierung von Mengen einer Variable. Damit Fahrverhalten in Form von Regelkatalogen ohne näheres Hintergrundwissen sinnvoll formuliert werden kann, müssen die sprachlichen Bezeichnungen (Sprachelemente der Regeln) für die einzelnen Mengen (Teilbereiche des Wertebereichs einer Variable) und meßbare Tatbestände miteinander harmonisieren. Welche Beziehungen der Variablen untereinander dabei zu beachten sind bzw. wie die Ausgestaltung einzel-

ner Variablen für die Modellimplementation durchgeführt wurde, wird in den folgenden beiden Abschnitten dargestellt.

4.3.1 Funktionale Zusammenhänge zwischen den Eingangsvariablen

Für die im Modell verwendeten Eingangsvariablen für den Fuzzy-Regler lassen sich einige funktionale Zusammenhänge begründen bzw. empirisch belegen, die vor der Abhandlung der Variablen selbst dargestellt werden. In Tabelle 4.3.1-1 wird zwischen zwei Formen solcher Zusammenhänge (Abhängigkeiten) unterschieden:

- Z: Es besteht eine streng mathematische Abhängigkeit zwischen den Zahlenwerten der beiden bezeichneten Variablen.
- B: Der Zahlenwert der übergeordneten Variablen beeinflusst die Bewertung (Position und evtl. Form) der Fuzzy-Mengen der abhängigen Variablen.

übergeordnet	vw	v	dv	dx	tk	k
abhängig						
v	B					
dv		B, Z		B		
dx		B				
tk		B, Z	Z	Z		
dtk					B	
k		B		Z		
dk						B

Tab. 4.3.1-1: Funktionale Abhängigkeiten der Eingangsvariablen untereinander, Übersicht

Die Abhängigkeiten werden im einzelnen für jedes besetzte Tabellenfeld näher erläutert:

B: $v(vw)$: Die momentan realisierte Geschwindigkeit wird an der (über die Laufzeit der Simulation konstanten) Wunschgeschwindigkeit gemessen; je nachdem wird eine momentane Geschwindigkeit als zu niedrig, nach Wunsch oder als zu hoch bewertet.

B: $dv(v)$: Speziell für den Vergleich von Geschwindigkeitsniveaus auf unterschiedlichen Fahrstreifen wird als Bewertungsmaßstab die eigene Geschwindigkeit herangezogen. Falls auf dem anderen Fahrstreifen nur ein Bruchteil davon erreicht wird, kann dies Reaktionen auslösen.

$$dv \approx a_1 \cdot v$$

Z: $dv(v)$: Die Änderung von v verursacht für alle dv -Variablen eine unmittelbare Veränderung ihrer Zahlenwerte.

B: $dv(dx)$: Hier existieren wahrnehmungsphysiologisch bedingte Grenzbereiche, die der Gesetzmäßigkeit gehorchen (vgl. Anhang 8.1.4 bzw. 8.3):

$$dv \approx - \frac{\dot{\alpha}_g}{R} \cdot dx^2 \quad \text{bzw.} \quad dv \approx - \frac{1}{tk_g} * dx$$

Für die Bewertung von Geschwindigkeitsdifferenzen sind damit Grenzwerte bestimmbar, unterhalb derer solche Differenzen nicht wahrnehmbar sind.

B: $dx(v)$: Die Bewertung von Nettoabständen ist abhängig von der momentan realisierten Geschwindigkeit. In Anlehnung an einen minimalen Nettofolgeabstand wird hier folgender funktionaler Zusammenhang gewählt:

$$dx \approx a_2 + b_2 \cdot \sqrt{v}$$

Dabei entspricht dem Parameter a_2 ein Nettoabstand bei Stillstand, Parameter b_2 dient zum Einstellen eines Streubereichs.

B: tk(v): Bei niedrigen Geschwindigkeitsniveaus sind niedrigere Beträge von Minimalwerten der potentiellen Kollisionszeit wahrscheinlicher als bei höheren Geschwindigkeiten. Wenn man die potentielle Kollisionszeit als "Reservezeit" für die Beherrschbarkeit des Verkehrsgeschehens auffaßt, wird diese Annahme plausibel: Bei niedrigen Geschwindigkeiten (Stop-and-go) kann das Fahrzeug (ungeachtet eventueller Vorderfahrzeuge) in verhältnismäßig kürzerer Zeit zum Stillstand gebracht werden, bei höheren Geschwindigkeiten benötigt das Abbremsen bis zum Stillstand länger.

$$tk \approx a_3 + b_3 \cdot v$$

Z: tk(v): Bei einer Änderung der Geschwindigkeit wirkt sich die resultierende Änderung der Geschwindigkeitsdifferenz auch auf den Zahlenwert der potentiellen Kollisionszeit aus.

Z: tk(dv), Diese Abhängigkeit ergibt sich unmittelbar aus der Definition von tk:

Z: tk(dx):

$$tk = - \frac{dx}{dv}$$

Auch hier sind physiologisch bedingte Grenzwerte zu beachten.

B: dtk(tk): Wie im Anhang 8.1.5 gezeigt wird, ist die Entwicklung der potentiellen Kollisionszeit im Zeitverlauf bei Annäherungsvorgängen ein maßgebliches Kriterium dafür zu beurteilen, ob dieser Vorgang unkritisch oder kritisch ist. Da für diese

Größe empirisches Datenmaterial noch aussteht, wird hier grob mit prozentualen Anteilen von der gerade aktuellen potentiellen Kollisionszeit gerechnet.

$$dtk \approx a_4 \cdot tk$$

B: $k(v)$: Die Bewertung der Fahrzeugdichte erfolgt in Anlehnung an die Bewertung des Nettoabstands: Der geschwindigkeitsabhängige Nettoabstand wird um die Fahrzeuglänge l ergänzt und dieser Bruttoabstand pro Fahrzeug anschließend auf 1 km hochgerechnet:

$$k \approx \frac{1000}{(l + a_2 + b_2 \cdot \sqrt{v})}$$

Z: $k(dx)$: Da der Nettoabstand Bestandteil der Fahrzeugdichte ist, beeinflusst der Zahlenwert von dx unmittelbar den Zahlenwert von k .

B: $dk(k)$: Die Änderung von Dichtewerten muß stets in Relation zum Ausgangswert der Dichte gesehen werden. Für die Positionierung der Fuzzy-Mengen der Dichteänderung werden daher prozentuale Anteile von der gerade realisierten Dichte verwendet.

$$dk \approx a_5 \cdot k$$

4.3.2 Mengendefinitionen der Modellvariablen

Die Ausgestaltung der Systemvariablen eines Fuzzy-Reglers ist von zentraler Bedeutung für die Funktionsweise des Reglers. Für jede Variable sind "unscharfe" Mengen zu definieren, die dem Zahlenwert einer Variable Zugehörigkeitsgrade zu den Mengen der Variable zuordnen. An dieser Stelle eines Fuzzy-Reglers findet die Transformation von skalaren Variablenwerten zu einer sprachlich faßbaren "unscharfen" Bewertung

dieser Zahlenwerte bzw. mit Hilfe einer Inferenzmethode die Rücktransformation sprachnah formulierter Reaktionen in skalare Variablenwerte statt. Die Bezeichner dieser Mengen sind zugleich die Sprachelemente, aus denen die Regeln des Fuzzy-Reglers zusammengesetzt werden.

Die Auswahl der Mengenzahl sowie die Positionierung dieser Mengen im Wertebereich der Variablen erfolgt auf der Grundlage verschiedener Datenquellen und unter verschiedenen Aspekten:

- Zulässige Wertebereiche der Variablen
- Empirische Verteilungen der Variablenwerte
- "Vernünftige" Annahmen, Plausibilität
- Messung des Systemverhaltens und Rückkopplung
- Anforderungen an die Genauigkeit
- "Expertenwissen"

Bei der Kombination der verschiedenen Informationsquellen ist "Fingerspitzengefühl" unerlässlich, da an dieser Stelle der Modellimplementation im Grunde Annahmen über menschliche Bewertungsmaßstäbe fixiert werden. Die Fixierung der Modellannahmen in Form von "unscharfen" (wenn auch mathematisch exakt formulierten), mit linguistischen Bezeichnern assoziierten Mengen scheint jedoch angesichts einer unvollständigen und mit Unsicherheit behafteten empirischen Fahrverhaltensbeschreibung wesentlich problemnäher als die herkömmliche Art der Modellformulierung.

In welcher Form die einzelnen Variablen in der vorliegenden Implementation festgelegt sind, wird je nach Bedeutung der Variable mit entsprechendem Detaillierungsgrad nachfolgend behandelt. Dabei werden zunächst die Eingangsvariablen unter besonderer Berücksichtigung des vorausfahrenden Interaktionspartners dargestellt.

Für die Variable "Abstand" sind die Mengen in einem Wertebereich zu positionieren, der sich durch folgende Angaben eingrenzen läßt:

- Aus Messungen ist bekannt, daß Abstände nicht mit den gefahrenen Geschwindigkeiten proportional zunehmen. Faustregeln wie "Halber-Tacho-Abstand" werden im praktischen Fahrbetrieb nicht eingehalten, bei höheren Geschwindigkeiten wird mit relativ kleineren Abständen gefahren. Für minimale Folgeabstände gilt die Beziehung:

$$dx \approx a_2 + b_2 \cdot \sqrt{v}$$

Der Faktor a_2 repräsentiert einen Mindestabstand bei Stillstand und b_2 einen Faktor, für den sich bei LEUTZBACH/WILLMANN (1975) der Wert $b_2 = 2$ für minimale Nettoabstände und bei WIEDEMANN (1974) ein Streubereich $b_2 \in [1,...,8]$ findet.

- Oberhalb von etwa 150 m sind vom Abstand keine Reaktionen auf das Folgeverhalten zu erwarten (WIEDEMANN, 1974)
- Für forensische Zwecke existieren Angaben über Nettozeitlücken, die bei gegebener Geschwindigkeit als Abstände zu interpretieren sind und als Untergrenzen bzw. Richtwerte für im Fahrbetrieb einzuhaltende Abstände gelten. Für sichere Mindestabstände existieren Zeitlückenwerte von 1 s (Bayerisches Oberlandesgericht), 1,5 s für sicheren Abstand, 1,8 s (halber Tachoabstand) oder 2 s (Methode 21-22); als gefährdende Abstände gelten Zeitlücken, die geringer als 0,8 s ausfallen (vgl. SCHNITTGER, 1991).

Diesen Angaben sind die Bereiche der fünf Mengen der Variable V_{dx} (Abstand zum Interaktionspartner vorne) nachempfunden. In Abbildung 4.3.2-1 sind die Mengenbezeichner und die zur Positionierung der Mengen notwendigen Stützpunkte ($s_1,...,s_5$) wiedergegeben.

In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit werden zur Berechnung der aktuellen Mengenpositionen den Stützpunkten gemäß der genannten Formel mit folgenden Parametern jeweils neue Werte zugewiesen:

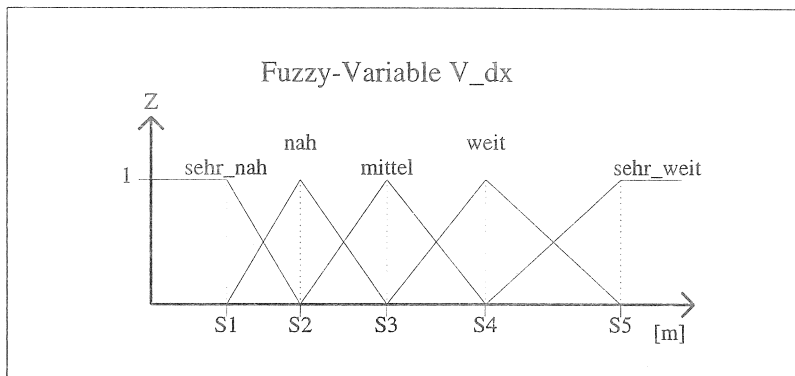


Abb. 4.3.2-1: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Abstand" für den Interaktionspartner V (vorne)

Menge	Stützpunkt	a_2	b_2
sehr_nah	s1	1,5	1
nah	s2	2,5	2
mittel	s3	5	4
weit	s4	10	8
sehr_weit	s5	20	12

Tab. 4.3.2-1

Die Lage der Schwerpunkte der fünf Mengen läßt sich damit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit darstellen (Abb. 4.3.2-2). Für alle anderen Interaktionspartner wurde die Variable "Abstand" einfacher gestaltet (Abb. 4.3.2-3), da sie überwiegend zur Modellierung des Fahrstreifenwechsels und nicht der Fahrzeugfolge herangezogen wird, wobei den unterschiedlichen Funktionen dieser Abstände durch verschiedene Parameter für die Berechnung der Stützpunkte (s_6 , s_7) Rechnung getragen wird.

Beispielsweise haben akzeptable Abstände zu einem Interaktionspartner rechts vorne (Beurteilung eines lohnenden Fahrstreifenwechsels nach rechts) wesentlich höhere Zahlenwerte, als Abstände zu einem Inter-

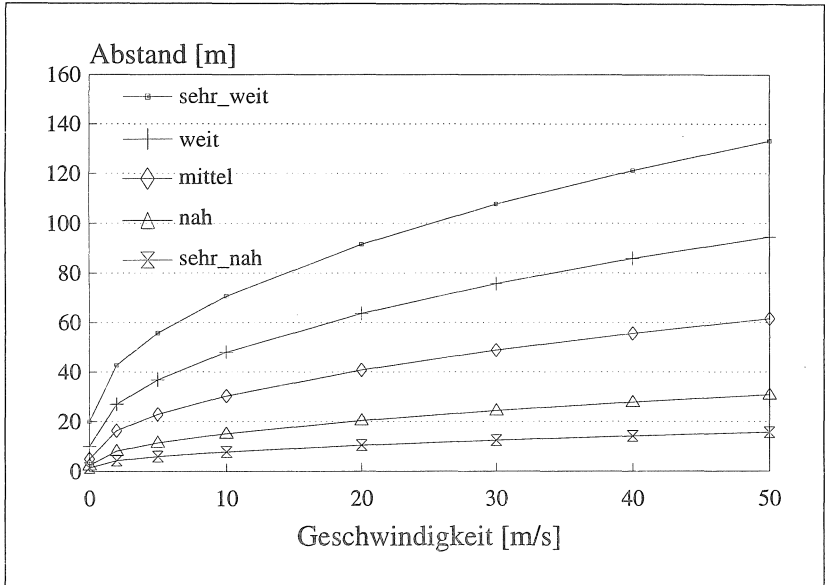


Abb. 4.3.2-2: Geschwindigkeitsabhängige Position der Stützpunkte der Fuzzy-Variable V_{dx} "Abstand nach vorne"

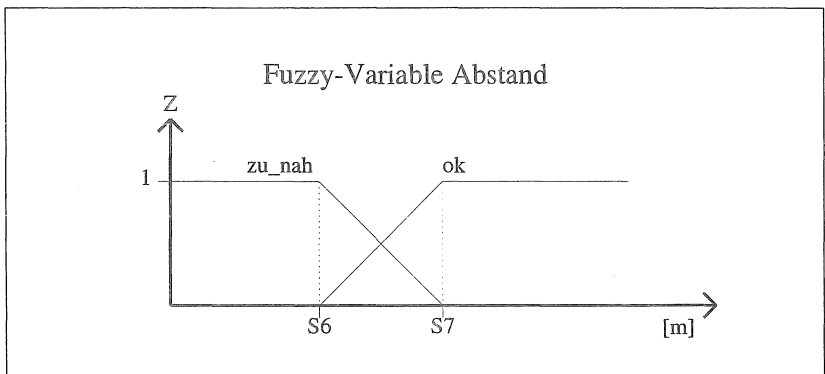


Abb. 4.3.2-3: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Abstand" für Interaktionspartner VL, VR, HL, H, HR

aktionspartner vorne links (für den Fall, daß dieser schneller ist und das betrachtete Fahrzeug hinter diesem nach links wechseln will). Die gewählten Parameter faßt Tabelle 4.3.2-3 zusammen.

Interaktionspartner	Stützpunkt	a_2	b_2
VL, vorne links	s6	1,5	1
	s7	2,5	2
VR, vorne rechts	s6	5	4
	s7	20	12
HL, hinten links	s6	2,5	2
	s7	5	4
H, hinten	s6	1,5	1
	s7	2,5	2
HR, hinten rechts	s6	1,5	1
	s7	2,5	2

Tab. 4.3.2-2

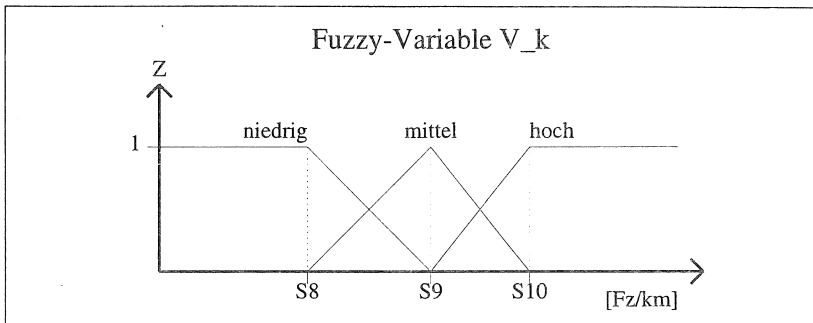


Abb. 4.3.2-4: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Fahrzeugdichte"

In engem Zusammenhang mit der Fuzzy-Variable "Abstand" steht die Fuzzy-Variable "Fahrzeugdichte" k , die im implementierten Fall den Bruttoabstand zum übernächsten Interaktionspartner in die Berechnung mit einbezieht. Die Bewertung dieser Fahrzeugdichte erfolgt anhand von 3 Mengen (Abb. 4.3.2-4), wobei für die Berechnung der Stützpunkte (s_8 , s_9 , s_{10}) ein ähnlicher funktionaler Zusammenhang wie bei der

Variable "Abstand" zur Anwendung kommt:

$$k \approx \frac{1000}{l + a_2 + b_2 \cdot \sqrt{v}} \quad (2)$$

Parameter l repräsentiert hier eine einheitliche Fahrzeuglänge von 5 m und die Parameter a und b werden zur Ermittlung der Stützpunkte analog zu den korrespondierenden Mengen des Abstands gewählt (Tab. 4.3.2-3).

Fuzzy-Variable			a ₂	b ₂
Abstand	Verkehrsdichte			
nah	hoch	s8	2,5	2
mittel	mittel	s9	5	4
weit	niedrig	s10	10	8

Tab. 4.3.2.3

Die Fuzzy-Variable "Fahrzeugdichteänderung" dk besitzt fünf Mengen, die die auf Sekundenintervalle normierten Änderungen der Fahrzeugdichte bewertbar machen (Abb. 4.3.2-5).

Die Berechnung der Stützpunkte erfolgt mit Hilfe der Fahrzeugdichte k , an der in prozentualen Anteilen gemessen wird, wie stark die Verkehrsdichteänderung ausfällt (Tab. 4.3.2-4). Beispiel: Steigt die Fahrzeugdichte vor einem Fahrzeug innerhalb einer Sekunde von 50 auf 55 Fzg/km, dann wird dieser 10%ige Zuwachs als "steigend" mit einem Zugehörigkeitsgrad von 1 interpretiert. Die genannten Werte für Fahrzeugdichte und Fahrzeugdichteänderung beziehen sich gleichermaßen auf alle Interaktionspartner, für die diese Variablen implementiert sind.

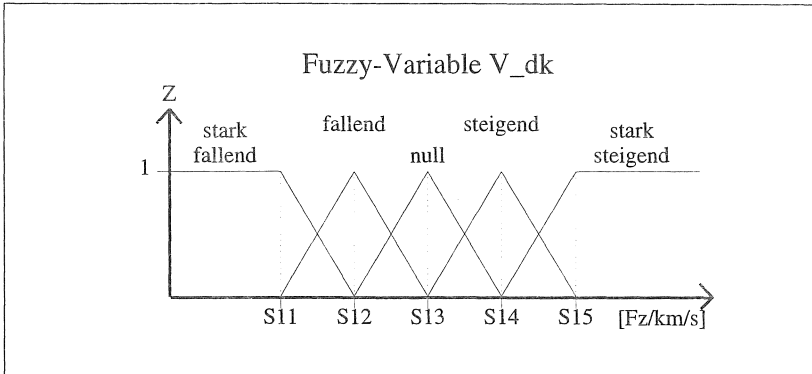


Abb. 4.3.2-5: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Fahrzeugdichteänderung"

Menge	Stützpunkt
stark_fallend	s11: $-0,2 \cdot k$
fallend	s12: $-0,1 \cdot k$
null	s13: 0
steigend	s14: $0,1 \cdot k$
stark_steigend	s15: $0,2 \cdot k$

Tab.4.3.2-4

Die Fuzzy-Variable "Potentielle Kollisionszeit" tk bezüglich des unmittelbar vorausfahrenden Interaktionspartners ist die wichtigste Eingangsvariable des Fuzzy-Reglers und steuert überwiegend sowohl das Folgeverhalten als auch den Fahrstreifenwechsel. Insgesamt sind zehn Mengen für diese Variable definiert, die der Übersichtlichkeit halber nach Zweck getrennt dargestellt sind (Abb. 4.3.2-6). Da die Bewertung der potentiellen Kollisionszeit ebenfalls von der Geschwindigkeit abhängt, berechnen sich die Stützpunkte für die einzelnen Mengen nach der Formel:

$$tk \approx c_3 \cdot (a_3 + b_3 \cdot v) \quad (3)$$

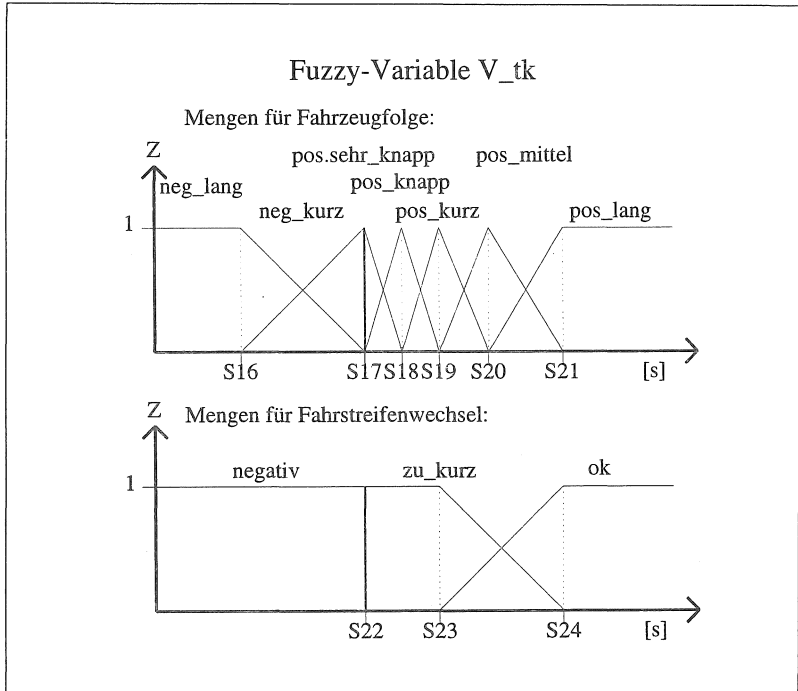


Abb. 4.3.2-6: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Potentielle Kollisionszeit" für den vorderen Interaktionspartner

Die Parameter a_3 und b_3 sind für alle Mengen konstant und betragen $a_3=3$ bzw. $b_3=0,05$ (vgl. Abschnitt 4.2.1). Der Faktor c_3 bestimmt damit die Position der Mengen (Tab. 4.3.2-5). Für alle anderen Interaktionspartner (VL, VR, HL, H, HR) sind nur Kollisionszeitvariablen mit den drei Mengen implementiert, die den Fahrstreifenwechsel steuern ("negativ", "zu_kurz", "ok"). Für die Variable VR_{tk} wurden dabei jedoch von den oben genannten ein abweichender Stützpunkt gewählt (Menge "ok", $s24: c_3=5$), um nur Fahrstreifenwechsel nach rechts zuzulassen, die längere Zeit ungehindertes Fahren erlauben, bevor das dort vorausfahrende Fahrzeug entweder eine Geschwindigkeitsanpassung oder einen Streifenwechsel nach links auslöst.

Menge	Stützpunkt	c_3
	mitte	
neg_lang	s16	1,6
neg_kurz	s17	0
pos_sehr_knapp	s17	0
pos_knapp	s18	0,5
pos_kurz	s19	1
pos_mittel	s20	1,6
pos_lang	s21	2,5
negativ	s22	0
zu_kurz	s23	1
ok	s24	2,5

Tab. 4.3.2-5

Die Fuzzy-Variable "Änderung der potentiellen Kollisionszeit" *dk* ergänzt die Steuerung des Fahrverhaltens durch potentielle Kollisionszeiten, in dem sie beurteilen hilft, ob die zeitliche Entwicklung der potentiellen Kollisionszeit einem realen Kollisionskurs entspricht. Sie stellt dafür drei Mengen ("negativ", "null", "positiv") bereit, die sich symetrisch um den Grenzwert -0,5 (vgl. Abschnitt 8.1.5) gruppieren. Die beiden äußeren Stützpunkte werden dabei durch einen Anteilswert der aktuellen potentiellen Kollisionszeit festgelegt (vgl. Abb. 4.3.2-7 bzw. Tab. 4.3.2-6).

Menge	Stützpunkt
negativ	s25: $-0,5 - 0,1 * tk$
null	s26: $-0,5$
positiv	s27: $-0,5 + 0,1 * tk$

Tab. 4.3.2-6

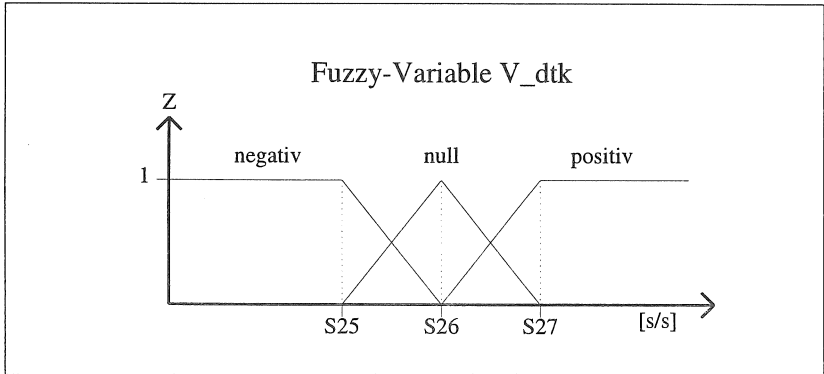


Abb. 4.3.2-7: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Änderung der potentiellen Kollisionszeit"

Die Fuzzy-Variable "Geschwindigkeit" v ist in drei Mengen unterteilt und bezieht ihre Bewertungsmaßstäbe von einer Wunschgeschwindigkeit (skalarer Wert). Ist die Wunschgeschwindigkeit um 30% unterschritten, so wird die aktuelle Geschwindigkeit uneingeschränkt als zu niedrig angenommen. Dieselbe Prozentgrenze gilt für zu hohe Geschwindigkeiten (Abb. 4.3.2-8).

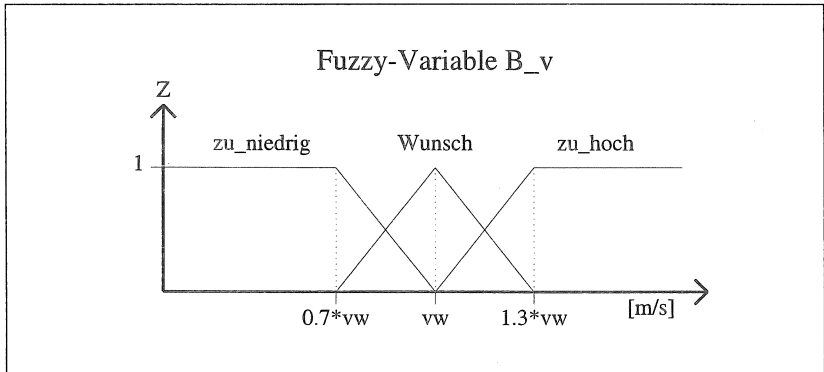


Abb. 4.3.2-8: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Geschwindigkeit"

Die Fuzzy-Variable "Geschwindigkeitsdifferenz" dv findet nur bezüglich Interaktionspartnern vorne rechts Anwendung, um hohe Relativgeschwindigkeiten einer Regelverarbeitung zugänglich zu machen. Die Relativgeschwindigkeit wird auf der Grundlage der Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs beurteilt, die damit den zulässigen Wertebereich der Geschwindigkeitsdifferenz begrenzt. Falls ein Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen nur 40% der Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen realisiert, gilt die Geschwindigkeitsdifferenz als uneingeschränkt stark negativ. Die Stützpunkte der drei implementierten Mengen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Bezugsfahrzeugs sind der Abbildung 4.3.2-9 zu entnehmen.

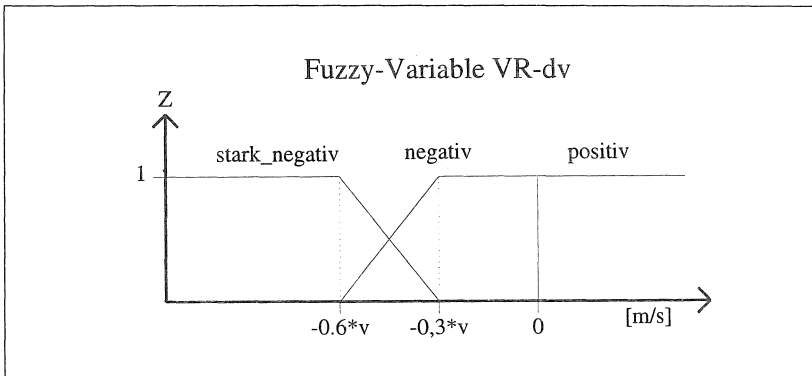


Abb. 4.3.2-9: Mengen und Stützpunkte der Fuzzy-Variable "Geschwindigkeitsdifferenz nach vorne rechts"

Während die bis hierher beschriebenen Eingangsvariablen des Fuzzy-Reglers bei der Auswahl und Positionierung ihrer Mengen plausible Relationen zwischen Zahlenwert und dessen Bewertung erfordern, ist bei den Ausgangsvariablen "Beschleunigung" und "Wechselentscheid" zusätzlich darauf zu achten, daß die gewählte Inferenzmethode bei der Rücktransformation der Mengenbewertungen in einen skalaren Zahlenwert auch einen sinnvollen und zulässigen Wertebereich abdeckt.

Dies bedeutet beispielsweise für die Fuzzy-Variable "Beschleunigung" a , daß sowohl Extrembereiche physikalisch möglicher Beschleunigungs-

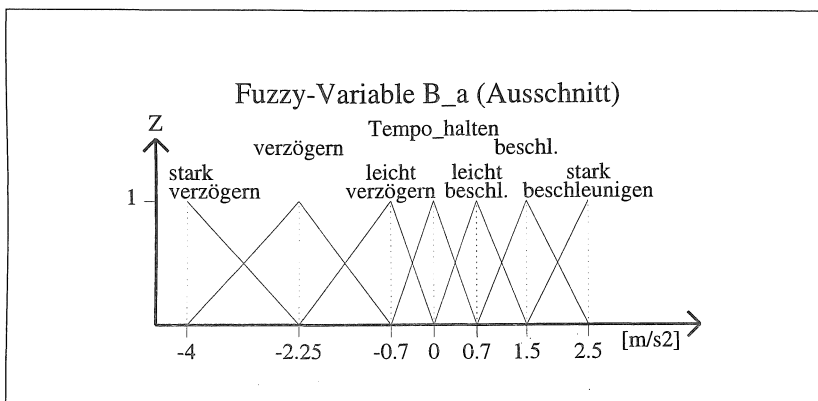


Abb. 4.3.2-10: Mengen und Stützpunkte der Variable "Beschleunigung", Ausschnitt

bzw. Verzögerungswerte verfügbar als auch realitätsnahe Beschleunigungsprofile reproduzierbar sein müssen. Abbildung 4.3.2-10 und Tabelle 4.3.2-7 geben die für die Variable "Beschleunigung" implementierten Mengen und Werte wieder.

Menge	Stützpunkt
max verzögern	-9
stark verzögern	-4
verzögern	-2,25
leicht verzögern	-0,7
Tempo halten	0
leicht beschleunigen	0,7
beschleunigen	1,5
stark beschleunigen	2,5
max beschleunigen	5,5

Tab. 4.3.2-7

Die Größe der einzelnen Mengen, die vom Nullpunkt ausgehend nach beiden Seiten zunimmt, gewährleistet, daß bei der Inferenzermittlung auch dann extreme Werte realisierbar bleiben, wenn auch noch andere Mengen als die Mengen am Rand ("max beschleunigen" bzw. "max verzögern") angesprochen sind. Die relativ schmalen Mengen um den

Nullpunkt führen zu einer differenzierten Inferenz in diesem Bereich, in dem sich bei normalem Fahrbetrieb die meisten Beschleunigungswerte bewegen (vgl. Abb. 5.3.1-4). Für die Fuzzy-Variable "Beschleunigung" gilt, daß ihr Inferenzergebnis durch das physikalisch mögliche Beschleunigungspotential eines betrachteten Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beschränkt wird (vgl. Abschnitt 4.1 und Abb. 4.1-2).

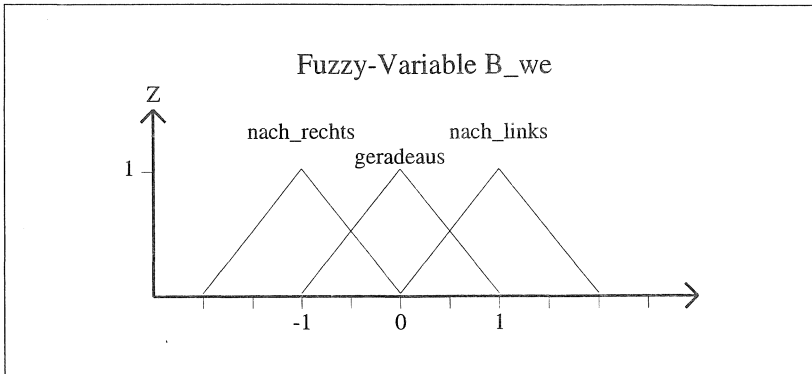


Abb. 4.3.2-11: Mengen und Stützpunkte der Variable "Wechselentscheid"

Für die Ausgangsvariable "Wechselentscheid" we (Abb. 4.3.2-11) gilt ein einfacherer Sachverhalt. Hier wird die Inferenz aus drei Mengen gebildet, die den möglichen Alternativen beim Fahren entsprechen. Der Wertebereich für diese Fuzzy-Variable liegt zwischen -1 und +1, bei Über- bzw. Unterschreitung von entsprechenden Grenzwerten (z.B. $\pm 0,6$) durch das Inferenzergebnis wird der Wechselentscheid ausgelöst.

5 Anwendung und Kontrolle des Modells

In diesem Kapitel werden einzelne Bestandteile des Modells beschrieben und Simulationsergebnisse vorgestellt. Diese bestehen zum einen aus Diagrammen, die das Programm zur Kontrolle der Simulation und des Fuzzy-Reglers bereitstellt (Abschnitte 5.1 und 5.2), und zum anderen in genaueren Auswertungen auf der Grundlage einzelner Simulationsdateien (Abschnitt 5.3). Zunächst wird jedoch der Gesamtablauf einer Simulation im Überblick dargestellt. Dieser gliedert sich in drei zeitlich voneinander getrennte Arbeitsschritte (Abb. 5-1):

- **Initialisierung:** Die Eingabedaten, die das Modell benötigt, werden interaktiv zusammengestellt. Der Regelkatalog für den Fuzzy-Regler wird ausgewählt und gegebenenfalls erweitert oder verändert. Je nachdem ob besondere Verkehrssituationen untersucht werden sollen, können sowohl eine Auswahl von Fahrzeugen mit spezifischen Parametern als auch eine Steuerdatei (Logbuch) für das erste Fahrzeug des gewählten Fahrzeugpuls erstellt bzw. geladen werden. Die Steuerdatei ermöglicht insbesondere das Nachbilden von Fahrzeugfolgeverhalten in Extremsituation. Der Umfang der Simulation wird durch Angabe der Simulationsdauer, der Länge der Teststrecke (mit Vor- und Nachlaufstrecke) und der Verkehrsstärken sowie Wunschgeschwindigkeitsparameter nach Fahrstreifen getrennt bestimmt. Unter einem einzugebenden Namen für die Simulation werden diese Daten zwecks späterer Auswertungen gespeichert.
- **Simulation:** Mit dem Start der Simulation wird die Simulationszeit in diskreten Schritten um 0,1 s (vgl. Abschnitt 3.3) erhöht. In jedem dieser Simulationsschritte wird zunächst die Fahrzeugverwaltung aktualisiert. Gemäß den vorgegebenen Verkehrsstärken

werden Fahrzeuge im Abstand exponentiell verteilter Zeitlücken¹¹ am Beginn der Vorlaufstrecke eingesetzt. Fahrzeuge, die das Ende der Nachlaufstrecke erreicht bzw. überschritten haben, werden entfernt. Danach wird der Fahrzeugbestand anhand der Wegkoordinate geordnet.

Anschließend wird für jedes Fahrer-Fahrzeug-Element geprüft, ob seine Reaktionszeit abgelaufen ist, gegebenenfalls die zuletzt ermittelte Reaktion in Kraft gesetzt und die aktuelle Reaktion, die der momentanen kinematischen Situation entspricht, neu ermittelt. Dafür werden die relevanten Interaktionspartner des betrachteten Fahrzeugs bestimmt und alle notwendigen Daten dem Fuzzy-Regler bereitgestellt. Die zurückgegebene Reaktion wird dem Fahrzeug zugewiesen, um nach Ablauf einer neu berechneten Reaktionszeit aktiviert zu werden.

Danach werden alle Fahrzeuge gemäß ihrer aktuellen kinematischen Daten nach den Bewegungsgleichungen vorwärtsbewegt. Während der Simulation werden in einem wählbaren Zeitschritt "Momentaufnahmen" der Simulation für eine spätere Kontrolle und Auswertung abgespeichert. Für jedes Fahrzeug wird dabei die Wegkoordinate und der momentan belegte Fahrstreifen dokumentiert. Zusätzlich ist optional die Ausgabe einer wählbaren Palette von Variablen des Fuzzy-Reglers ausgebaut, die jede Anwendung des Fuzzy-Reglers protokolliert und in Verbindung mit der Fahrzeugnummer den Fahrtverlauf einzelner Fahrzeuge nachvollziehbar macht.

- **Ausgabe:** Nach Ablauf der Simulationszeit wird die Sequenz der "Momentaufnahmen" für Kontroll- und Auswertezwecke abgespeichert. Daraus sind Weg-Zeit-Diagramme (x-t-Diagramme) und

¹¹ Die Randbereiche dieser Verteilung werden wahrscheinlichkeitsymmetrisch ausgeklammert, um zu kurze Zeitlücken zu verhindern. Durch entsprechende Behandlung zu langer Zeitlücken wird gewährleistet, daß die vorgegebenen Verkehrsstärken auch eingespeist werden.

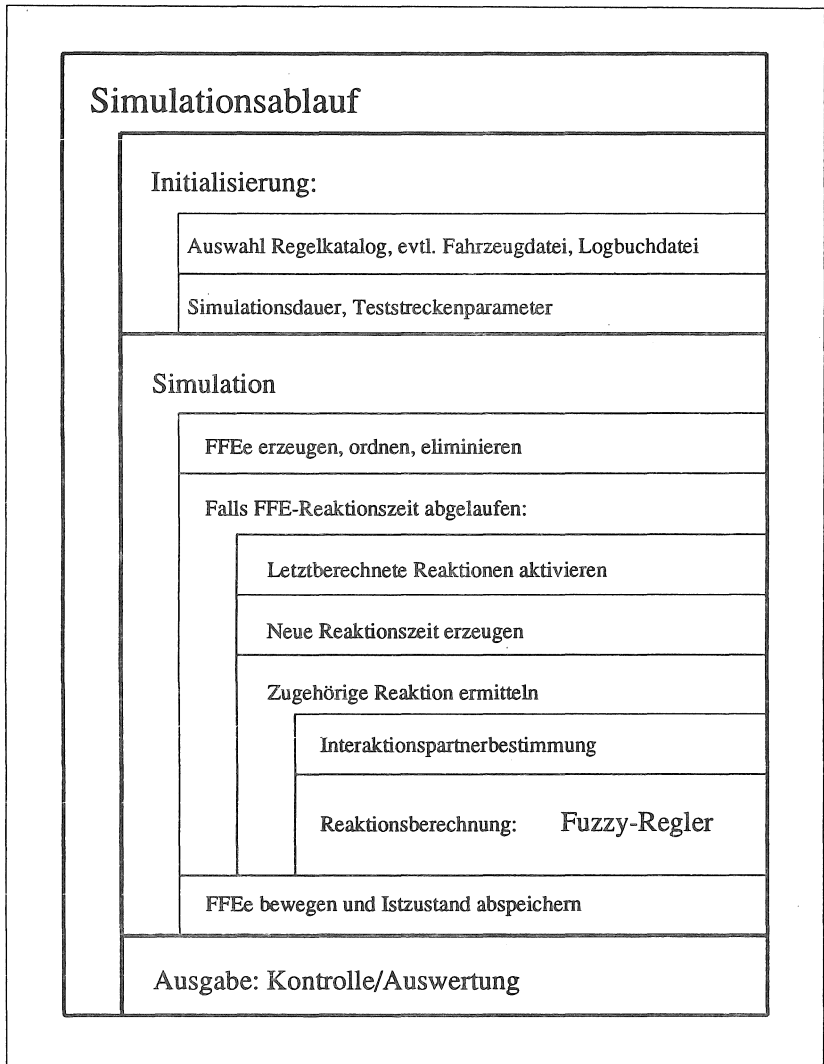


Abb. 5-1: Organisation des Simulationsablaufs

Abstands-Geschwindigkeitsdifferenz-Diagramme für einzelne Fahrzeuge (dx-dv-Diagramme) für beliebige Ausschnitte der Simulation darstellbar. Die Daten ermöglichen zusätzlich eine Aus-

wertung hinsichtlich makroskopischer Kenngrößen wie Verkehrsstärke, Verkehrsdichte oder mittlerer Geschwindigkeit für beliebige x-t-Ausschnitte für beide oder einzelne Fahrstreifen sowie von Fahrstreifenwechselhäufigkeiten.

5.1 Visualisierung des simulierten Verkehrsablaufs

Die während eines Simulationsablaufes in einem Zeitabstand von z.B. 1s gespeicherten "Momentaufnahmen" sind als Weg-Zeit-Diagramm (x-t-Diagramm) darstellbar (Abb. 5.1-1). Anhand eines solchen Diagramms läßt sich zunächst ein optischer Gesamteindruck gewinnen, der die Plausibilität der Simulation zu beurteilen hilft. Die Abbildungen dieses Abschnitts sind als Bildschirmkopien des Simulationsprogramms entstanden und besitzen daher nur geminderten Informationsgehalt, da eine farbgetreue Reproduktion der im Original farbig gestalteten Diagramme nicht möglich war. Die Zugehörigkeit zu den Fahrstreifen sowie die Weg-Zeit-Abschnitte des Fahrstreifenwechsels sind in verschiedenen Farben (Grauwerten) gehalten.

Eine erste Plausibilitätskontrolle besteht darin, zu prüfen, ob sich gleichfarbige Linien schneiden (Kollision) oder ob Linien von rechts fahrenden FFE diejenigen links fahrender FFE in korrekter Weise schneiden (Rechtsüberholverbot, schnellere FFE besitzen "flachere" Zeit-Weg-Linien). Für eine genauere Betrachtung von Fahrstreifenwechsellvorgängen oder Extremsituationen beim Folgeverhalten ist die Vergrößerung beliebiger Ausschnitte möglich. Über vier positionierbare Balken wird ein entsprechender Ausschnitt angewählt (Abb. 5.1-2). Bei der Interpretation der Diagramme ist zu beachten, daß die Fahrzeuge "punktförmig" dargestellt werden, also abzulesende Abstände Bruttoabstände sind. Bei der verwendeten Einheitslänge der FFE von 5 m ergibt sich der Nettoabstand damit unmittelbar.

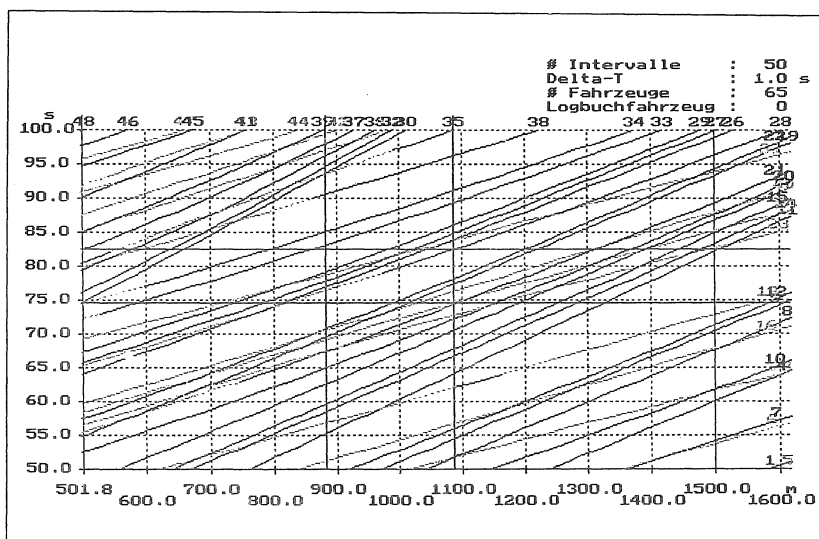


Abb. 5.1-1: Darstellung simulierten Verkehrsablaufs, x-t-Diagramm

Im dargestellten Ausschnitt wechselt das FFE mit der Nummer 28 im Zeitintervall 77-79 s vom linken auf den rechten Fahrstreifen¹². Damit ändert sich für FFE 26 das vorausfahrende FFE: Während zum Zeitpunkt 77 noch FFE 22 als "Vordermann" gilt, der ca. 170 m entfernt ist, ist ab dem nächsten Zeitschritt FFE 28 der neue vordere Interaktionspartner, der sich mit einem Abstand von etwas mehr als 20 m vor FFE 26 setzt. Solche Vorgänge lassen sich noch detaillierter in einem dx-dv-Diagramm (Abb. 5.1-3) nachvollziehen, wobei auch hier Bruttoabstände gelten. Für mehrstreifigen Verkehrsablauf ist der fortwährende Wechsel der Interaktionspartner typisch. Länger währende Folgevorgänge sind daher seltener zu beobachten.

Die auf diese Weise durchführbare visuelle Kontrolle des Systemverhaltens erwies sich für die Entwicklungsarbeit als ausreichend, obwohl die Darstellung der Simulation in festen Zeitschritten (normalerweise 1 s)

¹² Zeitdauer für das Überfahren der Trennmarkierung zwischen den Fahrstreifen.

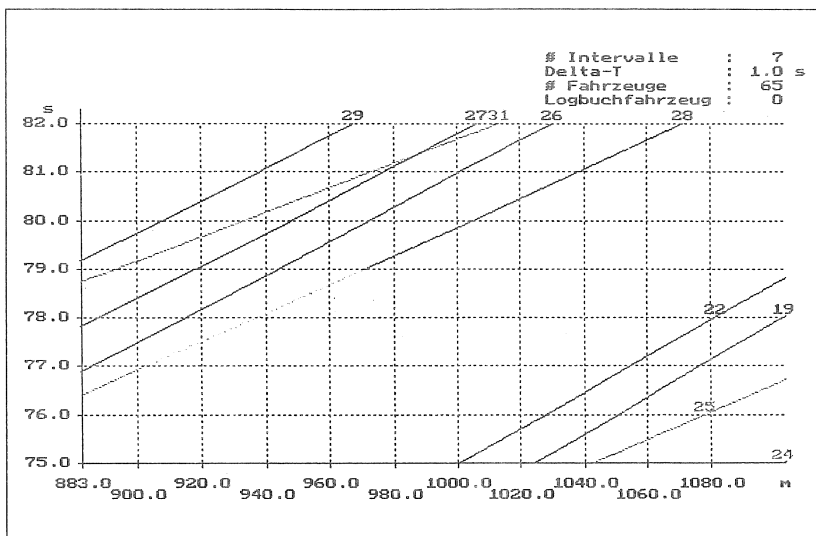


Abb. 5.1-2: Darstellung simulierten Verkehrsablaufs, x-t-Diagramm, Ausschnitt

nicht mit den eigentlichen Reaktionszeitpunkten der simulierten Fahrzeuge synchron verläuft. Dadurch stimmen die dx-dv-Diagramme nicht exakt mit dem tatsächlichen Simulationsverlauf überein.

5.2 Funktionsüberprüfung des Fuzzy-Reglers

Um die tatsächliche Wirkung des Fuzzy-Reglers auf konkrete Variablenkonstellationen kontrollieren zu können, wurde eine graphische Darstellung aller Fuzzy-Variablen erstellt. Neben den beiden resultierenden Variablen Beschleunigung und Wechselentscheid sind gleichzeitig sechs Eingangsvariablen auf dem Monitor anzeigbar, die beliebig positioniert und jederzeit gegen nicht sichtbare Variablen ausgetauscht werden können. Der sichtbare Wertebereich jeder Variable kann dabei den Erfordernissen angepaßt werden. Abbildung 5.2-1 zeigt die wesentlichen Variablen, die für den Fahrzeugfolgevorgang relevant sind. Neben der

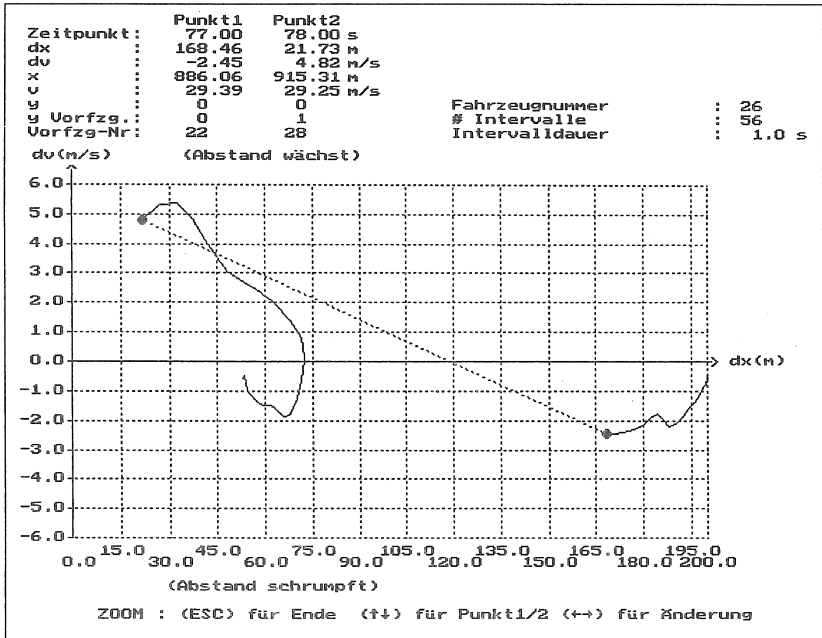


Abb. 5.1-3: Darstellung simulierten Verkehrsablaufs, dx-dv-Diagramm

momentan realisierten Geschwindigkeit, die sich auf das gerade betrachtete Fahrzeug bezieht, sind dies der Abstand, die potentielle Kollisionszeit und deren Änderung sowie die Fahrzeugdichte und deren Änderung in Bezug auf das vorausfahrende Fahrzeug. Das Inferenzergebnis aus einer zu niedrigen Geschwindigkeit bei nahem bis mittlerem Abstand, mittlerer positiver Kollisionszeit mit neutraler Kollisionszeitänderung und bei mehr hoher als mittlerer Fahrzeugdichte mit leicht sinkender Tendenz ist eine leichte Bremsverzögerung von $-0,55 \text{ m/s}^2$. Die nicht sichtbaren Variablen, die den Wechselentscheid beeinflussen, lassen einen Fahrstreifenwechsel momentan nicht zu.

Eine andere Situation zeigt Abbildung 5.2-2, in der die für den Fahrstreifenwechsel nach links relevanten Variablen "Abstand" und "potentielle Kollisionszeit" zu den Interaktionspartnern vorne links, vorne und hinten links dargestellt sind. Das vorausfahrende Fahrzeug löst mit der

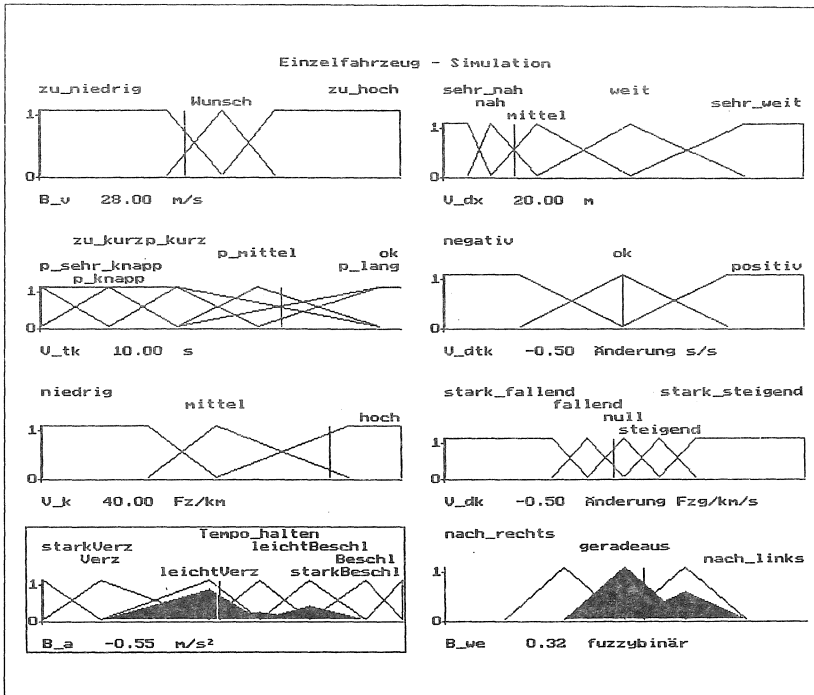


Abb. 5.2-1: Darstellung der Fuzzy-Variablen für die Fahrzeugfolge

potentiellen Kollisionszeit 11,5 s (und unterschrittener Wunschgeschwindigkeit des betrachteten FFE, hier nicht sichtbar) den Wunsch aus, nach links zu wechseln. Weder das Fahrzeug vorne links, das sich 32 m (Nettoabstand) entfernt befindet und etwa 4 m/s schneller als das betrachtete Fahrzeug fährt (negative Kollisionszeit), noch das Fahrzeug hinten links, welches noch 67 m entfernt ist und sich mit einer Geschwindigkeitsdifferenz von etwa 4 m/s nähert und genügend Spielraum läßt, sprechen gegen die Durchführung des Fahrstreifenwechsels. In dieser Situation ermittelt der Fuzzy-Regler als angemessene Reaktion für das Fahrzeugfolgeverhalten ein ganz leichtes Verzögern ($-0,23 \text{ m/s}^2$). Im geschilderten Fall wird also nach Ablauf einer Reaktionszeit der Fahrstreifenwechsel begonnen, da der Schwellenwert für den Wechselscheid mit dem Wert 0,8 überschritten ist.

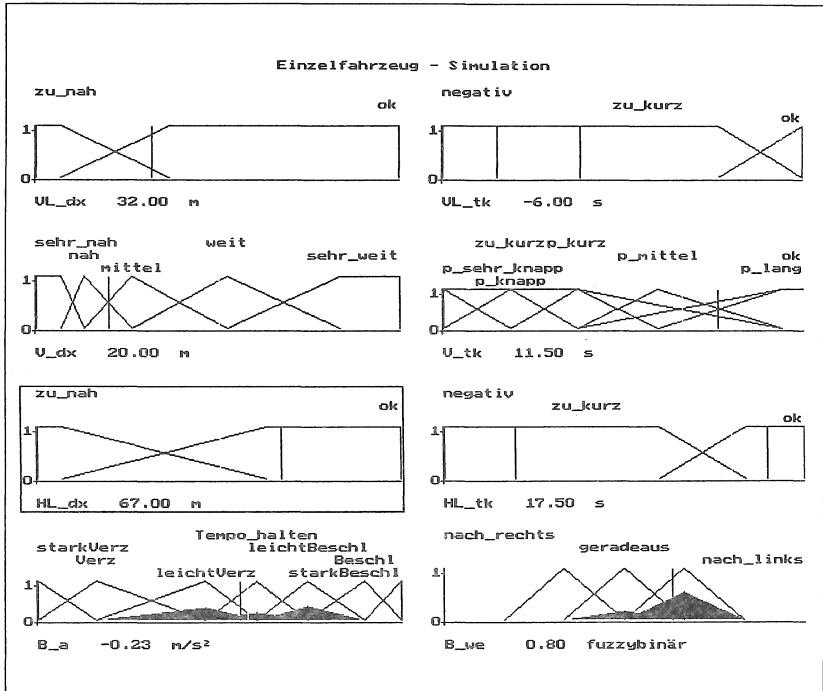


Abb. 5.2-2: Darstellung der Fuzzy-Variablen für den Fahrstreifenwechsel

Ein anderes Instrument zur Visualisierung des Fuzzy-Regler-Verhaltens und speziell zur Untersuchung der Wirkung einzelner Regeln der Regelkataloge wurde mit einem dx-dv-Diagramm (Nettoabstand) geschaffen, in dem die resultierende Beschleunigung für jeden Teilbereich des Diagramms unter Berücksichtigung aller anderen Variablenwerte (rechts in Abb. 5.2-3 angezeigt) dargestellt wird. Für jedes Wertepaar (dx, dv) ergibt sich definitionsgemäß eine potentielle Kollisionszeit, wie auch jede Gerade, die vom Ursprung des dx-dv-Diagramms ausgeht, eine bestimmte Kollisionszeit repräsentiert. Die Wirkung kürzerer Kollisionszeiten hin zu stärkerer Bremsverzögerung läßt sich am zunehmenden Grauwert gut ablesen. Die Grauwertskala korrespondiert mit Beschleunigungswerten, die in diesem Beispiel in einem Wertebereich von [-6;...; +1,5] m/s² liegen (Skala mit Nullpunkt am unteren Bildrand).

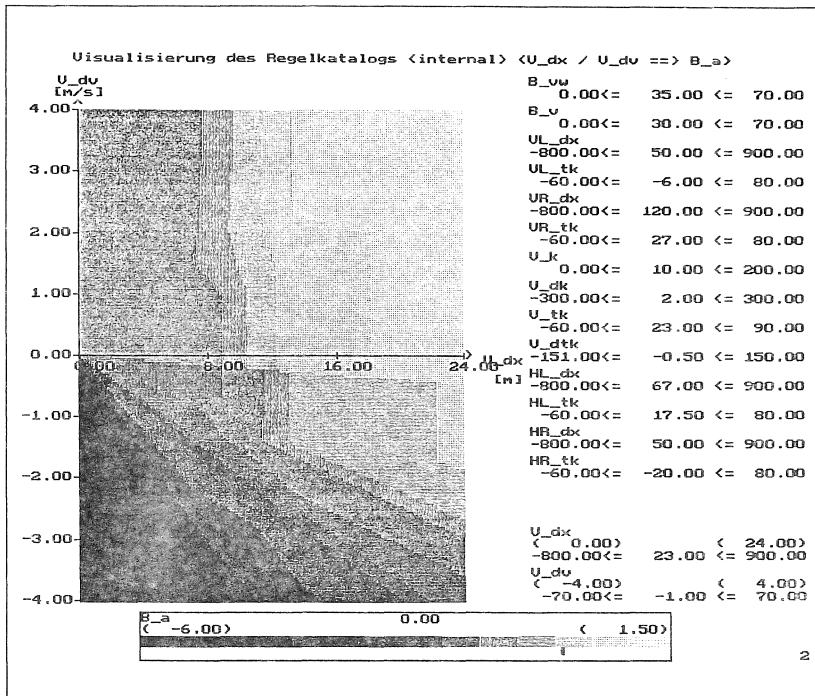


Abb. 5.2-3: Visualisierung der Eigenschaften eines Fuzzy-Reglers im dx-dv-Diagramm

Bei dem hier gewählten Regelkatalog läßt sich jedoch auch erkennen, daß beispielsweise bei kurzen Abständen recht differenziert reagiert wird: Bei "gefährlichen" (negativen) Geschwindigkeitsdifferenzen wird bei geringen Abständen unter Umständen eine Vollbremsung eingeleitet, wohingegen bei sehr geringen negativen Geschwindigkeitsdifferenzen auch bei sehr nahen Abständen nicht "überreagiert" wird. Mit zunehmenden Abstand und positiver Geschwindigkeitsdifferenz setzt sich die als zu niedrig bewertete Geschwindigkeit mit positiven Beschleunigungswerten durch.

5.3 Simulationsergebnisse

Das in den vorhergehenden Abschnitten beschriebene Modell wurde in zahlreichen Simulationsläufen auf seine Eigenschaften hin überprüft und schrittweise mit empirischem Datenmaterial in Einklang gebracht. Die Vergleichbarkeit der durch Simulation gewonnenen Verteilungen einzelner Parameter mit im realen Verkehrsablauf gemessenen Größen ist jedoch aus mehreren Gründen zu relativieren:

- Im Modell werden ausschließlich Fahrer-Fahrzeug-Elemente mit Pkw-Eigenschaften generiert. Daraus ergeben sich besondere Bedingungen für hohe Fahrzeugdichten bzw. erreichbare Verkehrsstärken.
- Für alle Fahrer-Fahrzeug-Elemente eines Simulationslaufs gilt ein einziger Regelkatalog, sodaß alle Fahrzeuge unter gleichen Bedingungen auch gleiche Reaktionen zeigen. Eine Variation des Verhaltens ergibt sich dabei nur aus dem Gebrauch unterschiedlicher Wunschgeschwindigkeiten (mit z.B. Auswirkungen auf mittlere Abstände beim Folgevorgang) sowie individueller Reaktionszeitverteilungen (schnellere Situationsanpassung durch kürzere Reaktionszeiten).
- Die Gestaltung des Fahrverhaltens und insbesondere der Fahrstreifenwechsellvorgänge mit Hilfe der für diesen Zweck neu eingeführten potentiellen Kollisionszeit beruht auf einer noch zu vervollständigenden empirischen Datengrundlage.

Insofern kann ein Datenvergleich auf mikroskopischer Ebene (Dichte- und Verteilungsfunktionen einzelner Parameter) zwar als Modellkalibrierung angesehen werden, in dem durch entsprechende Anpassung des Reglers und des Regelkatalogs empirische Meßwerte reproduzierbar sind. Der Vergleich makroskopischer Verkehrskenngrößen ist jedoch eher als qualitative Modellvalidierung anzusehen, wobei charakteristi-

sche Beziehungen beispielsweise zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte oder zwischen Fahrstreifenbelastung bzw. Fahrstreifenwechselhäufigkeiten und Verkehrsstärke nachzubilden sein müssen.

5.3.1 Verteilungen ausgewählter Modellparameter

Da alle Fahrer-Fahrzeug-Elemente eines Simulationslaufs über den gemeinsamen Fuzzy-Regler miteinander "verwandt" sind, wurde für die Darstellung der verschiedenen Parameter nicht auf einzelne, sondern stets auf alle Elemente als Datenbasis zurückgegriffen.

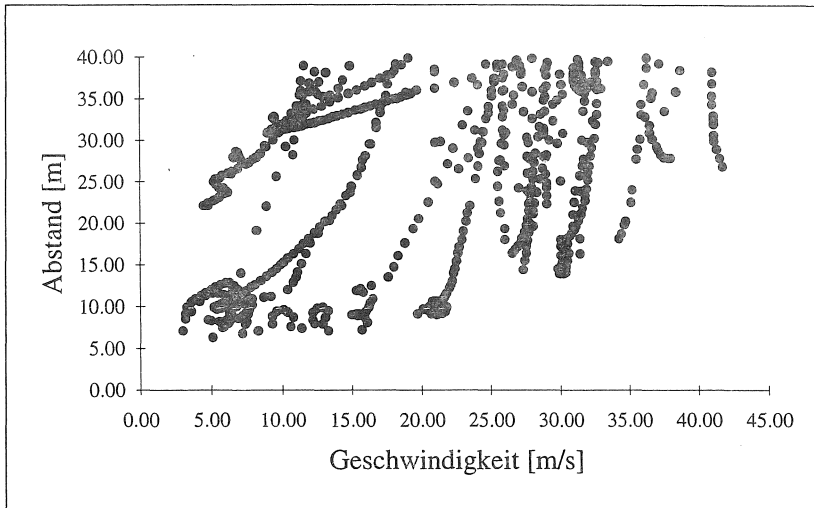


Abb.5.3.1-1: Kleinste Abstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Simulationsergebnisse

Abbildung 5.3.1-1 präsentiert realisierte Abstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Um eine möglichst große Bandbreite der Geschwindigkeit abzudecken, wurde während des Simulationslaufs ein Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen mit einer Verzögerung von $-0,5 \text{ m/s}^2$ bis auf 5 m/s abgebremst und für ein kurzes Zeitintervall auf

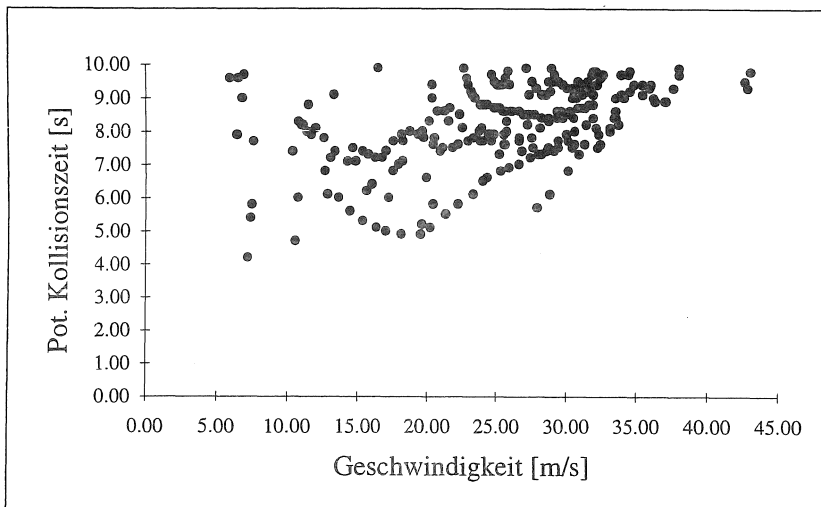


Abb.5.3.1-2: Kleinste potentielle Kollisionszeiten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Simulationsergebnisse

diesem Geschwindigkeitsniveau gehalten. In der Abbildung sind Folgevorgänge einzelner Fahrzeugpaare wiederzuerkennen, die sich bei abnehmenden Abständen der geringer werdenden Geschwindigkeit angepaßt haben. Die Tendenz größerer Abstände bei höheren Geschwindigkeiten ist deutlich zu erkennen. Der angenommene funktionale Zusammenhang (vgl. Abschnitt 4.3.1) ist in diesem Simulationslauf jedoch nicht ablesbar, was eventuell auf den durch das langsame Fahrzeug gestörten Verkehrsablauf oder zu geringen Datenumfang zurückzuführen ist. Der Grenzbereich, in dem keine Abstände realisiert worden sind, kann als Bereich "auch kurzfristig zu geringer Abstände" interpretiert werden, der im normalen Fahrbetrieb gemieden wird.

Die Datengrundlage für die Abbildung 5.3.1-2 entstammt derselben Simulation. Dort ist der implementierte Zusammenhang zwischen minimalen akzeptierten potentiellen Kollisionszeiten und dem Geschwindigkeitsniveau wiederzufinden. Ebenso wie in der Abbildung 5.3.1-1 sind auch hier im Diagramm einzelne Fahrzeugpaare über kürzere Zeitintervalle zu verfolgen. Mit der in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Messung

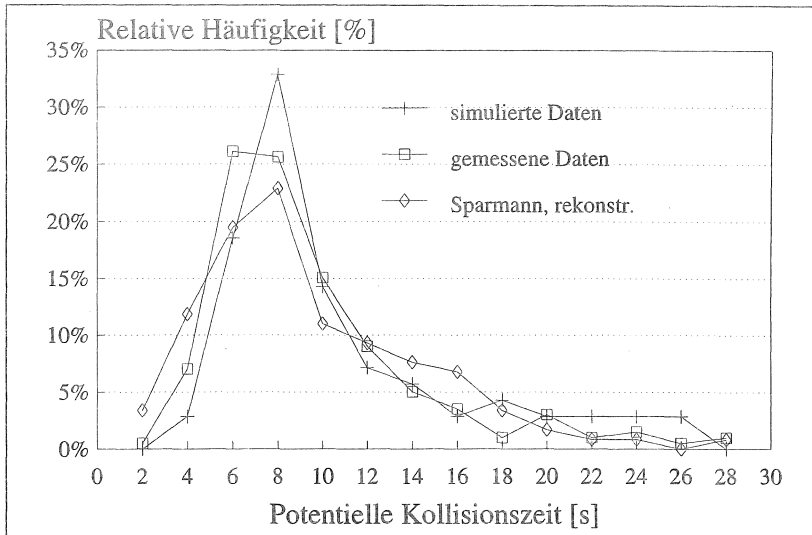


Abb.5.3.1-3: Potentielle Kollisionszeiten beim Fahrstreifenwechsel nach links, Vergleich von Simulations- und Meßdaten (z.T. rekonstruiert nach SPARMANN, 1978)

solcher Kollisionszeitminima (vgl. Abb.4.2.1-2) und der dort angenommenen funktionalen Beziehung sind die simulierten Werte gut vergleichbar.

Durch eine bessere Positionierung der Mengen der Fuzzy-Variablen "Potentielle Kollisionszeit nach vorne" und eine Verbesserung des Regelkatalogs konnte auch für die Verteilung der den Fahrstreifenwechsel nach links auslösenden Kollisionszeit eine gute Übereinstimmung mit gemessenen Daten herbeigeführt werden. Zu Vergleichszwecken wurden nicht nur die aus Videoaufnahmen gewonnenen Werte herangezogen, sondern auch eine empirische Verteilung dieses Parameters aus Meßdaten von SPARMANN (1978) rekonstruiert. Dort wurde für Pkw, die lediglich durch einen vorausfahrenden langsameren Pkw zum Fahrstreifenwechsel nach links veranlaßt wurden ("freier SPWL") sowohl Geschwindigkeitsdifferenz als auch Abstand zum Zeitpunkt des Wechsels gemessen. Aus diesen Wertepaaren ließen sich Kollisionszeiten und

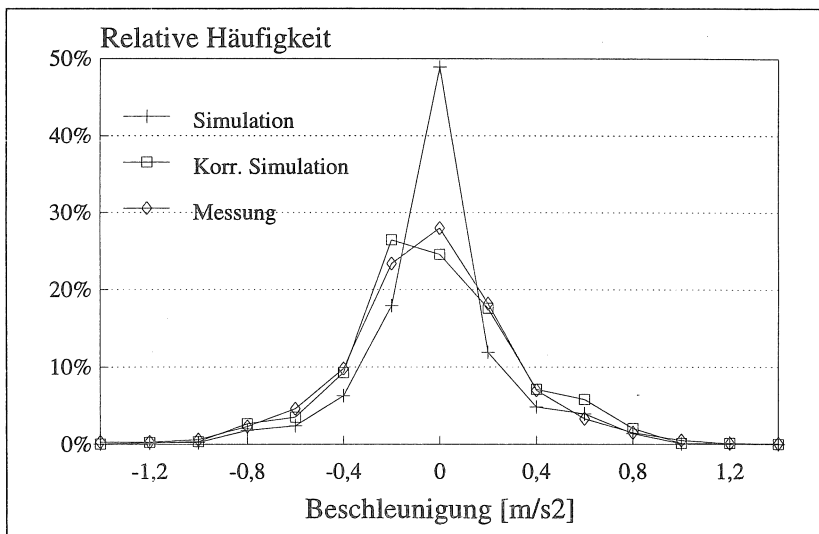


Abb.5.3.1-4: Häufigkeitsfunktionen der Variable Beschleunigung, Simulationsdaten und Meßergebnisse

eine entsprechende Häufigkeitsfunktion ermitteln, die eine gute Übereinstimmung mit den neueren Meßdaten zeigen (Abb.5.3.1-3).

Bei dem Vergleich von simulierten und empirischen Häufigkeitsfunktionen für die Variable Beschleunigung (Abb. 5.3.1-4) fällt auf, daß die Klasse, die den Nullpunkt einschließt, in der Simulation überproportional häufig auftritt. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß beim Fuzzy-Regler auf die Nachbildung des Phänomens "Beschleunigungsrauschen" (vgl. z.B. WINZER, 1980) verzichtet wurde: Die Verwendung zufallsverteilter Einflußfaktoren ist im vorliegenden Modell strikt auf die Generierung von Reaktionszeiten beschränkt. Falls also aufgrund äußerer Bedingungen oder der kinematischen Situation kein Verzögern erforderlich und die Wunschgeschwindigkeit realisiert ist, ermittelt der Fuzzy-Regler als Inferenzergebnis eine Nullbeschleunigung.

Nimmt man diese Klasse jedoch aus dem Datenmaterial heraus, ergibt sich eine große Ähnlichkeit zwischen der simulierten und der empirisch

ermittelten Dichtefunktion der Beschleunigung, die sich im wesentlichen im Wertebereich $\pm 0,8 \text{ m/s}^2$ bewegt. Aktive Bremsung durch Benutzung des Bremspedals ist im normalen Fahrbetrieb auf Schnellstraßen offensichtlich ein relativ seltener Vorgang.

5.3.2 Makroskopische Kenngrößen

Zur makroskopischen Beschreibung der simulierten Verkehrszustände dienen die Größen Verkehrsstärke Q [Fz/h], Verkehrsdichte K [Fz/km] und mittlere Geschwindigkeit V [m/s], die für jeden beliebigen Ausschnitt eines x - t -Diagramms anhand folgender Definitionen berechnet werden können (gl. COERS, 1970):

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n xx_i}{X \cdot T} \quad K = \frac{\sum_{i=1}^n tt_i}{X \cdot T} \quad V = \frac{\sum_{i=1}^n xx_i}{\sum_{i=1}^n tt_i}$$

i : Fahrzeugindex

xx_i : Weganteil von Fahrzeug i bzw.

tt_i : Aufenthaltsdauer von Fahrzeug i im x - t -Ausschnitt mit den "Kantenlängen" X und T

Um ausreichend Datenmaterial für diese räumlich-zeitliche Auswertung bereitzustellen, wurden zahlreiche Simulationsläufe durchgeführt, die den Gesamtbereich realisierbarer Verkehrsstärken umfassen. Für jeden Simulationslauf galten dabei gleiche Rahmenbedingungen: Die Simulationsstrecke unterteilte sich in eine Vorlaufstrecke der Länge 1000 m, eine Untersuchungsstrecke von 2000 m und eine Nachlaufstrecke von 500 m Länge. Im Vorlauf homogenisierte sich der mit exponentiell verteilten Zeitlücken eingespeiste Verkehr. Der Nachlauf gewährleistete eine korrekte Reaktion der in der eigentlichen Untersuchungsstrecke befindlichen Fahrzeuge. Die Simulationsdauer war einheitlich auf 300 s

festgelegt. Die räumlich-zeitliche Analyse wurde auf der Grundlage von x-t-Ausschnitten eines Umfangs von 60s und 12 m (Induktionsschleifenlänge, alle 250 m) bzw. 1000 m (für Fahrstreifenwechselhäufigkeit) durchgeführt, die stets an denselben Positionen im x-t-Diagramm platziert waren (Abb. 5.3.2-1).

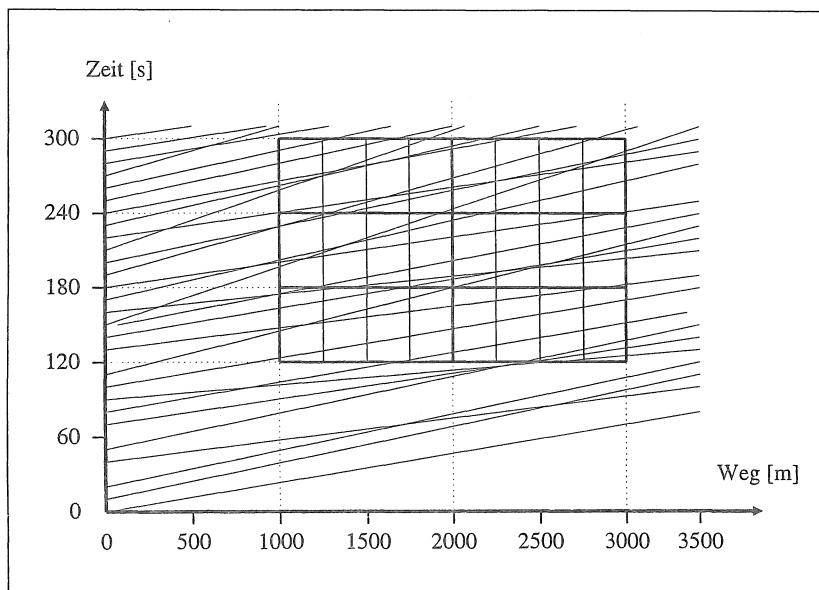


Abb. 5.3.2-1: Ermittlung makroskopischer Kenngrößen auf der Grundlage einheitlicher x-t-Ausschnitte

Für die folgenden Darstellungen wurden etwa 200 x-t-Ausschnitte aus unterschiedlichen Simulationsläufen herangezogen, die ausschließlich störungsfreien Verkehrsablauf umfassen. Bei einem Vergleich mit empirischem Datenmaterial sind dabei die Einschränkungen zu berücksichtigen, die zu Beginn des Abschnitts 5.3 genannt wurden.

Abbildung 5.3.2-2 zeigt den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsstärke, wie er auch für empirische Messungen ungestörten

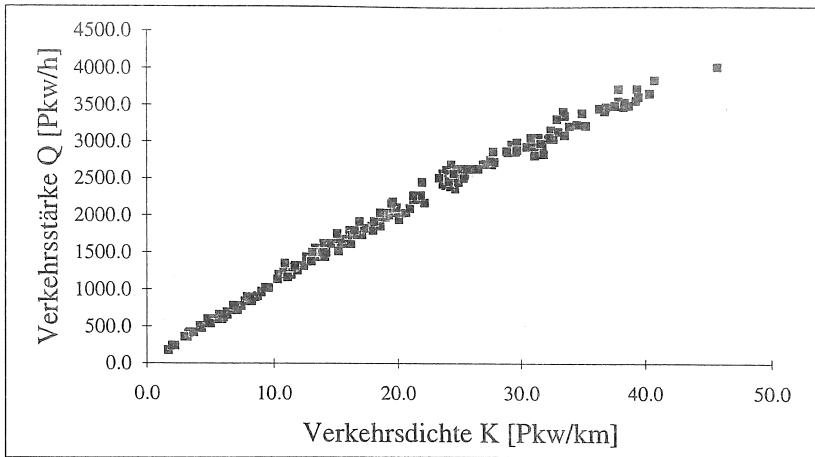


Abb. 5.3.2-2: Q-K-Diagramm, Simulationsergebnisse,
x-t-Ausschnitt: 60s*12m

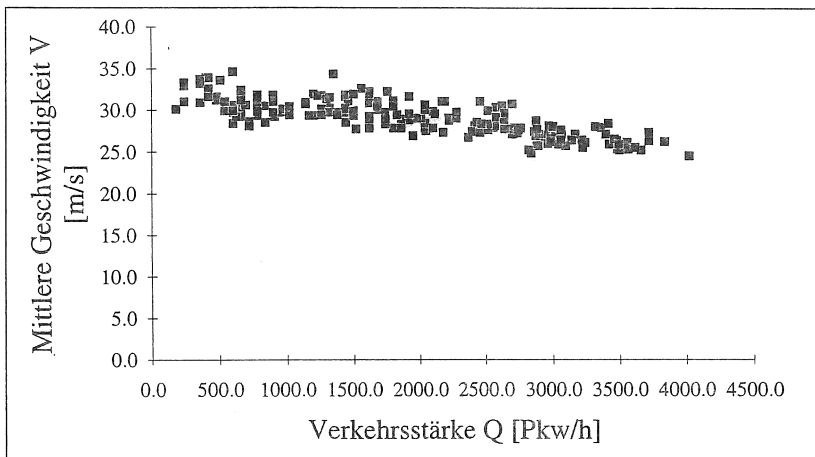


Abb. 5.3.2-3: V-Q-Diagramm, Simulationsergebnisse,
x-t-Ausschnitt: 60s*12m

Verkehrsablaufs typisch ist. Bei der Beurteilung der erreichten Maximalwerte sind der gewählte x-t-Ausschnitt (60s*12m) und der Umstand zu berücksichtigen, daß ausschließlich Pkw-Verkehr simuliert wurde.

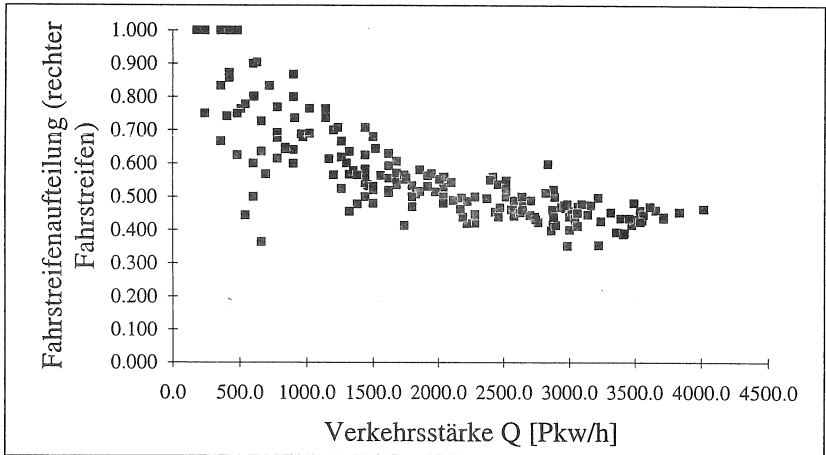


Abb. 5.3.2-4: Belastungsanteil des rechten Fahrstreifens in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke, Simulationsergebnisse, x-t-Ausschnitte: 60s*12m

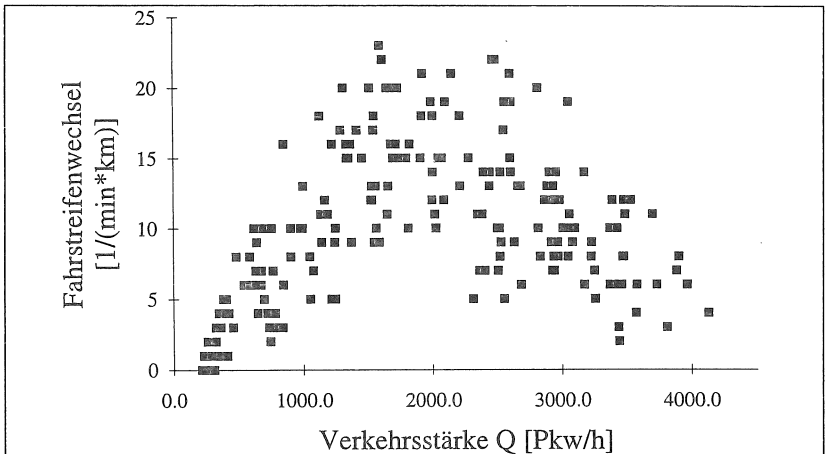


Abb. 5.3.2-5: Fahrstreifenwechselhäufigkeit in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke, Simulationsergebnisse, x-t-Ausschnitte: 60s*1000m

In Abbildung 5.3.2-3 ist das Absinken der mittleren Geschwindigkeit (über beide Fahrstreifen) bei zunehmender Verkehrsstärke dokumentiert. Der Verlauf des funktionalen Zusammenhangs harmoniert dabei gut mit empirischen Daten (vgl.z.B. SPARMANN, 1978).

Die makroskopische Kontrolle der Fahrstreifenwechselvorgänge erfolgt anhand zweier Darstellungen, die zum einen die Aufteilung der Gesamtverkehrsstärke auf die beiden Fahrstreifen wiedergeben (Abb. 5.3.2-4) und zum anderen die absolute Häufigkeit von Wechselvorgängen in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke zeigen (Abb. 5.3.2-5). Der Belastungsanteil des rechten Fahrstreifens reicht in Abbildung 5.3.2-4 von etwa 90 % bei sehr niedrigen Verkehrsstärken bis zu etwa 40 % bei mittleren bis hohen Verkehrsstärken. Meßergebnisse von SPARMANN ergeben ein ähnliches Bild, wobei dort jedoch bei hohen Verkehrsstärken der Anteil des rechten Fahrstreifens bis auf etwa 30 % zurückgeht. Hier ist wieder auf die Simulation reinen Pkw-Verkehrs zu verweisen. Im Mittel wurden etwa 10,3 Fahrstreifenwechsel pro Minute und Kilometer durchgeführt, maximal etwa 23 Wechsel (Abb. 5.3.2-5). Diese Werte stimmen gut mit Angaben von BUSCH (1986; etwa 600 Wechsel/(h*km) im Mittel und als obere Grenze etwa 1300 Wechsel/(h*km) bei ca. 2000 Fz/h) überein. Die gezeigten makroskopischen Eigenschaften wurden mit verhältnismäßig geringem Aufwand durch Anpassung der für den Fahrstreifenwechsel zuständigen Fuzzy-Variablen und leichten Modifikationen im Regelkatalog erreicht.

6 Zusammenfassung und Interpretation

Modelle sind vereinfachte Abbildungen von realen Vorgängen oder Systemen, in denen Erkenntnisse über diese Realität als "konstruierte Wirklichkeit" zusammengestellt werden. Modelle sind daher stets im Kontext mit ihrem "Konstrukteur" und ihrem Verwendungszweck sowie den Anwendern und dem verfügbaren Erkenntnisstand zu betrachten. Unabhängig von thematischen Inhalten ergeben sich daraus Schlußfolgerungen für die allgemeine Konzeption von Modellen, die nachstehend unter drei Stichworten zusammengefaßt sind.

- **Transparenz:** Der Erkenntnisstand, den ein Modell repräsentiert, sollte durch Transparenz der Modellbestandteile und durch Nachvollziehbarkeit seiner Funktionsweisen Außenstehenden vermittelbar sein, damit eine Rückkopplung zur Korrektur der "konstruierten Wirklichkeit" möglich ist¹³.
- **Ökonomisches Prinzip:** Der Entwurf eines Modells sollte unter dem Gesichtspunkt des ökonomischen Prinzips begonnen werden: Ein Modell sollte sich auf so viele Eingangsdaten (empirische Daten, Modellannahmen etc.) wie nötig stützen, um eine dem Verwendungszweck angemessene Realitätsnähe zu erreichen, aber gleichzeitig so wenig Prämissen wie möglich benutzen, um den Modellumfang sowie den Bedarf an plausiblen Begründungen für Prämissen so gering wie möglich zu halten.
- **Relevanz und Genauigkeitskongruenz der Modellparameter:** Bei der Auswahl der modellbestimmenden Parameter ist eine Beschränkung auf diejenigen Faktoren notwendig, die auch für das zu modellierende reale System relevant sind. Speziell bei der Modellierung menschlichen Verhaltens ist dabei anzustreben, sich

¹³ Dies gilt insbesondere für alle Eingangsdaten und Modellprämissen, deren Plausibilität überprüfbar sein muß.

den Mechanismen und Unzulänglichkeiten von Wahrnehmung, Bewertung und Verarbeitung verhaltenssteuernder Einflußfaktoren durch geeignete Modellformulierung weitmöglichst anzunähern. Der Anspruch an die Genauigkeit meßbarer Werte und deren Verwendung als Variable in der Modellbeschreibung ist in eine vernünftige Relation zu der Genauigkeit zu setzen, mit der die gewählten Einflußfaktoren im realen System wirken können¹⁴.

Die folgenden Abschnitte gehen näher darauf ein, wie diese Vorgaben die Formulierung des vorgestellten Modells mitbestimmt haben und inwieweit sich die Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Sets-Theory) bei der Implementierung der Modellvorstellungen dabei als hilfreich erwiesen hat.

6.1 Fahrgerechte Informationsaufnahme als Modellkern

Mittelpunkt des Modells ist ein Regelkreis, der eine ausgewählte Anzahl von Einflußfaktoren (Eingangsgrößen) zur Beurteilung einer Momentaufnahme verkehrlichen Geschehens benutzt und daraus eine angemessene Reaktion auf diese momentane Situation ableitet. Damit wird ein Fahrzeugführer nachgebildet, den man sich als am Steuer seines Fahrzeugs sitzend vorzustellen hat und der aus der unüberschaubaren Vielfalt der ihm zugänglichen Informationen diejenigen herausgreift, die ihm das Anpassen an von ihm gewünschte Gegebenheiten erlauben. Dazu gehören gewisse Vorstellungen über eine zu realisierende Wunschgeschwindigkeit und über Abstände (räumliche und zeitliche) zu etwaigen anderen Verkehrsteilnehmern (Interaktionspartner). Dabei kann allein schon die Wunschgeschwindigkeit als komplexe Größe gelten, zu deren Entstehung viele Einzeleinflüsse zusammenwirken (Motivation, Fahrerfahrung, Risikobereitschaft, Streckenmerkmale, Grenzen komfortabler Querbeseleunigungen, Wetterverhältnisse, Leistungsmerkmale des Fahrzeugs, Verkehrszustände, Verkehrsordnung etc.).

¹⁴ Beispielsweise das Problem der "Pseudogenauigkeit" bei Schwellenwerten, die aus Erwartungswerten von Verteilungen (mit evtl. großer Varianz) abgeleitet werden.

Die eigentliche Interaktion eines Fahrers mit der ihn umgebenden Umwelt erfolgt aber fortwährend auf der Grundlage der wahrnehmbaren Konstellationen im Verkehrsgeschehen im Vergleich mit seinen Vorstellungen und Erwartungen, die er aufgrund seiner Erfahrungen als "Sollwerte" benutzt. Dabei besteht die Fahraufgabe darin, eine gewünschte Geschwindigkeitsvorstellung so zu realisieren, daß möglichst nur solche Verkehrssituationen erlebt werden, die den eigenen Risikovorstellungen nicht widersprechen. Die jeweilige Situation im Verkehrsgeschehen (die kinematische Konstellation relevanter Interaktionspartner) muß gemessen an den Fahrerfahrungen jederzeit beherrschbar "erscheinen". Das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer kann nur grob durch Extrapolation ihrer Eigenbewegungen vorweggenommen werden; Erwartungen darüber, wie andere Verkehrsteilnehmer sich in speziellen Situationen verhalten, werden auf der Grundlage von bislang gesammelten Erfahrungen und der Möglichkeit, sich gedanklich in die Situation anderer zu versetzen, gebildet.

Der Fahrzeugführer kombiniert also momentan wahrnehmbare Merkmale seiner Fahrsituation mit Erwartungen über die zukünftige Entwicklung dieser Situation, die er aufgrund seiner (täglichen) Erfahrungen gebildet hat. Es ist sogar zu vermuten, daß zwischen der Informationsaufnahme und der Informationsverarbeitung (Bildung von Erwartungen) Zusammenhänge der Form bestehen, daß die Erwartungen die Auswahl der aufgenommenen Information mit steuern (vgl. GUSKI, 1989). Sowohl die momentan wahrnehmbare Situation als auch die damit verknüpften Erwartungen sind mit Unsicherheiten behaftet und beruhen stets auf unvollständiger Information. Trotzdem werden auf dieser Grundlage Reaktionen (etwa in Form von Bremsverzögerungen oder Lenkwinkel) permanent ermittelt, die den Fahrzeugführer in eine neue, seinen Vorstellungen entsprechende Situation versetzen sollen.

Zur Einschätzung einer Fahrsituation steht dem Fahrzeugführer von außen im wesentlichen nur die Information zur Verfügung, die aus den Veränderungen in seinem Gesichtsfeld während der Bewegung resultiert.

Daraus ergibt sich für die Modellbildung die Notwendigkeit, physiologische Grenzwerte der visuellen Informationsaufnahme zu berücksichtigen.

Wenn man grundsätzlich darauf verzichtet, den Prozeß der Erwartungsbildung durch Informationsverarbeitung modellieren zu wollen, bleibt für den Teil der Informationsaufnahme die Aufgabe zu lösen, welche Einflußfaktoren relevant und für die Modellierung einer Reaktionsentscheidung ausreichend sind. Ein erster Anhaltspunkt hierfür sind die kinematischen Größen, die auch in den gebräuchlichen Fahrzeugfolgenmodellen Verwendung finden: Die resultierende Beschleunigung ist die Reaktion auf die Geschwindigkeit eines betrachteten Fahrzeugs und den Abstand sowie der Geschwindigkeitsdifferenz zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Allerdings tritt hier das Problem auf, daß ein Fahrzeugführer von diesen Größen (mit Ausnahme der Geschwindigkeit, die ja im Fahrzeug angezeigt wird) nur einen ungefähren Begriff hat bzw. Schätzungen angeben kann. Auch für den Fall, daß solche Daten als metrische Information vorlägen, ist es jedoch unrealistisch, einem Fahrzeugführer ein "mechanistisches Sicherheitskalkül" zu unterstellen, in dem er daraus angemessene Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerte ableiten würde. Dies wird um so deutlicher, wenn man beispielsweise die Komplexität der Ermittlung "sicherer" Abstände betrachtet (vgl. SCHNITTGER, 1991).

Es scheint also wesentlich realitätsnäher, diese Größen gerade in Verbindung mit ihrer Unschärfe einer Modellierung zugänglich zu machen, zumal damit auch die Bestimmung eindeutiger Grenz- oder Schwellenwerte für reaktionsauslösende Parameterkombinationen an Bedeutung verliert.

Aus den beiden Größen Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz läßt sich die Größe "Potentielle Kollisionszeit" ableiten, die einen zeitlichen Abstand zwischen Interaktionspartnern darstellt, dabei unmittelbar aus dem Fluß des visuellen Feldes wahrnehmbar ist und "mechanistische" Betrachtungen zur Situationseinschätzung verzichtbar macht.

Die Eigenschaft der potentiellen Kollisionszeit, dem Fahrer unmittelbar aus der Wahrnehmung zur Verfügung zu stehen, begründet ihre Verwendung als zentrale Variable des vorliegenden Modells, mit der nicht nur die Fahrzeugfolge (und damit die Kolonnenstabilität) sondern auch Fahrstreifenwechselvorgänge überzeugend modelliert werden können. Im Gegensatz zur bisherigen Formulierung von Fahrstreifenwechselvorgängen in Verkehrsfluß-Simulationsmodellen auf der Grundlage von Zeitlückenverteilungen in Kombination mit makroskopischen Kenngrößen des Verkehrsflusses (vgl. SPARMANN, 1978) ermöglicht die Verwendung der potentiellen Kollisionszeit eine konsequent mikroskopische Sichtweise der Fahrstreifenwechselvorgänge. Dabei läßt sich die makroskopische Wirkung dieser Modellierungsweise in Form von Fahrstreifenwechselhäufigkeiten sowie Aufteilung der Verkehrsbelastung auf verschiedene Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke mit empirischen Meßergebnissen gut in Einklang bringen.

Um den simulierten Fahrzeugführer mit einer noch realitätsnäheren Modellwelt zu umgeben, wird die Anzahl der relevanten Einflußgrößen um eine einfache "Verkehrsdichte"-Beurteilung erweitert. In der Realität behält der Fahrzeugführer gewöhnlich mehr Fahrzeuge im Auge als die ihn unmittelbar umgebenden Interaktionspartner. Er hat stets einen gewissen Eindruck über die momentanen Fahrzeugdichten auf den Fahrstreifen in seinem Blickfeld (bedingt auch für die rückwärtige Verkehrssituation) und somit auch über deren Entwicklungstendenz¹⁵.

Die Kombination der genannten Größen (Eingangsvariablen) erweist sich als hinreichend genau und vergleichsweise gut darstellbar für Verkehrssimulationen auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen, bei der die mikroskopische Sichtweise aus "Fahrsicht" im Rahmen ausgewählter Einflußfaktoren konsequent verwirklicht ist.

¹⁵ Wie auch bei der potentiellen Kollisionszeit ist bei der Fahrzeugdichte die Wahrnehmung über den **Zeitverlauf** bzw. das wiederholte Beurteilen dieser Größen in kurzen zeitlichen Abständen mit von Bedeutung.

6.2 Vorteile der Fuzzy-Logic für die Modellformulierung

Fahrverhalten ist ein zeitliches Aufeinanderfolgen von Reaktionen eines Fahrzeugführers auf die ihm zur Beurteilung seiner aktuellen Fahrsituation zur Verfügung stehenden Informationen und Reize. Diese Informationen sind zumeist unpräzise und unvollständig aufgrund der dem Fahrer eigenen physiologischen Grenzen bezüglich der Wahrnehmung als auch der Verarbeitungskapazität für die Informationsaufbereitung. Die resultierenden Reaktionen erfolgen daher unter Unsicherheit und bedürfen der ständigen Korrektur durch Rückkopplung der Wirkung zurückliegender Reaktionen. Wie diese Reaktionen zustande kommen, läßt sich in Form von Fahrverhaltensregeln ausdrücken, die sich an der Art menschlicher Denk- und Ausdrucksweise orientieren.

Diesem Sachverhalt kommt das Konzept der Theorie unscharfer Mengen (Fuzzy Sets Theory) entgegen. Mittels geeigneter Verrechnungsmethoden wird die "Unschärfe" einer numerischen Bearbeitung zugänglich gemacht. Menschliches Fahrverhalten wird anhand von Regelkatalogen, die sich an verbalen Verhaltensbeschreibungen orientieren, formuliert. Jede Regel stellt dabei eine qualitative Beziehung zwischen verschiedenen relevanten Einflußfaktoren und einer angemessenen Reaktion her. Dabei führen auch Kombinationen von eventuell widersprüchlichen Regeln zu einer eindeutigen Reaktion.

Die Ausgestaltung eines Fuzzy-Reglers erfolgt hauptsächlich über zwei seiner Komponenten: Je nach Erkenntnisstand ist zunächst eine Anzahl von Fuzzy-Variablen zu wählen und deren Mengenzahl und -positionierung durchzuführen. Das Zusammenwirken dieser Variablen mit einem dann zu erstellenden Katalog von Regeln, die ihren "Sprachumfang" aus den Mengen der Variablen beziehen, bestimmen weitgehend das Reglerverhalten. Weitere Reglerkomponenten wie Inferenzmethode oder Regeloperatoren besitzen geringere Bedeutung für die Eigenschaften eines Reglers, da das Variationspotential der beiden erstgenannten wesentlich umfangreicher ist.

In der vorliegenden Implementation ist der Vorgang der Modellkalibrierung in zwei "Zugriffsebenen" organisiert. Das Reglerverhalten läßt sich einerseits sehr komfortabel über ein interaktives Erstellen bzw. Verändern von Regelkatalogen steuern, in dem Verhaltensregeln dem System "sprachnah" mitgeteilt werden können. Dabei wird nur mit "unscharfen" linguistischen Termen das Verhalten vorgegeben ("Wenn Abstand zu nah, dann bremsen"). Im Gegensatz dazu ist der Transformationsvorgang von konkreten Zahlenwerten in Zugehörigkeitsgrade zugehöriger Variablenmengen (Variablengestaltung und Inferenzmethode) im Modell nicht interaktiv, sondern nur durch Eingreifen in den Source-Code des Programms veränderbar. Hinter der Gestaltung der Mengen der Fuzzy-Variablen stehen Modellannahmen, die durch empirische Befunde oder Plausibilitätsüberlegungen gestützt werden und bei Gebrauch des Programms zunächst nicht zur Disposition stehen sollten. Es scheint sinnvoll, dieses "Expertenwissen" nur aufgrund entsprechender Meßergebnisse oder weiterführender Erkenntnisse zu erweitern.

Durch die Visualisierung dieser Fuzzy-Variablen und ihrer Mengenanordnung auf dem Bildschirm ist eine direkte Kontrolle der Reglereigenschaften möglich, wobei im Vergleich zu Ablaufdiagrammen oder Struktogrammen herkömmlicher Modellimplementierung eine verbesserte Begreifbarkeit und Übersichtlichkeit gewährleistet ist. Während traditionell Übergänge von Parameterkombinationen mit unterschiedlichem Reaktionsverhalten durch Schwellen oder stochastische Verteilungen um solche Schwellenwerte dargestellt werden, ermöglichen die Werkzeuge der Fuzzy-Logic einen gleitenden Übergang im Verhaltensrepertoire durch allmählich wechselnde Zugehörigkeitsgrade (nicht Eintrittswahrscheinlichkeiten!) zu verschiedenen Bezeichnern (Mengen) einzelner Variablen. Damit wird nicht in Frage gestellt, daß solche Schwellen existieren, sondern nur das Problem entschärft, diese Schwellen exakt positionieren zu müssen. Das Vorhandensein solcher empirisch ermittelbarer Zusammenhänge ist lediglich die Grundlage für die Differenzierung verschiedener Mengen einer Variable sowie der funktionalen Verknüpfungen der Variablen untereinander.

Insgesamt trägt die Modularität eines Fuzzy-Reglers mit seinen einzelnen Variablen und den zugehörigen Mengen sowie dem daraus entstehenden Sprachumfang für einen Regelkatalog dazu bei, angesichts der thematischen Komplexität des Fahrzeugfolgeverhaltens und der Fahrstreifenwechselforgänge die Funktionsweise des Fahrverhaltensreglers transparent zu halten und den Zugang zum Modell für potentielle Anwenderkreise zu erleichtern. Darüberhinaus eröffnet die Externalisierung eines Teils der Wissensbasis des Fuzzy-Reglers in Form frei gestaltbarer Regelkataloge die Möglichkeit, "Expertenwissen" durch die Erstellung "individueller" Regelkataloge durch verschiedene Anwender erwerben zu können.

6.3 Erweiterungsmöglichkeiten des Modells, Forschungsbedarf

Für die Weiterentwicklung des Modells sind Verbesserungen und Erweiterungen unter verschiedenen Aspekten möglich, um sich der Beschreibung realen Verkehrsverhaltens weiter anzunähern. Zunächst ist die Aussagefähigkeit des Modells dadurch eingeschränkt, daß die Fahrer-Fahrzeug-Elemente nur durch verschiedene fahrereigene Wunschgeschwindigkeiten und Reaktionszeitparameter sowie einige fahrzeugbeschreibende Parameter individualisiert sind. Durch die Einführung variabler Fahrzeuglängen und die Bereitstellung von repräsentativen Merkmals- und Leistungsdaten für Lastkraftwagen kann ein variabler Lkw-Anteil bei der Fahrzeuggenerierung berücksichtigt werden. Für diese Fahrzeugkategorie ist dann eine entsprechende Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten bereitzuhalten.

An diesem Punkt ergibt sich dann die Notwendigkeit, verschiedene Regelkataloge für unterschiedliche Fahrzeugtypen zu entwickeln, da das Fahrverhalten von Fahrzeugführern schwerer Fahrzeuge durch spezielle Regeln und eventuell durch angepaßte Fuzzy-Variablen abgebildet werden muß (Beispiel Lkw-Verkehr: Kolonnenfahrt auf dem rechten Fahrstreifen, dichtere Abstände bei Fahrstreifenwechsel). Die Variationsmöglichkeit durch verschiedene Regelkataloge erstreckt sich jedoch nicht nur auf die Abbildung verschiedener Fahrzeugtypen, sondern kann

auch die Besonderheiten verschiedener Fahrertypen berücksichtigen¹⁶. Die Differenzierung der Fahrer-Gesamtheit in einige Fahrertypen äußert sich dabei in verschiedenen Vorstellungen über Sicherheitsabstände oder Geschwindigkeitsvorstellungen, die sich aus unterschiedlicher Fahrermentalität bzw. -motivation ergeben. Theoretische Vorüberlegungen zur Fahrertypisierung finden sich bei KRATZER (1992).

In engem Zusammenhang damit steht eine vertiefte Modellierung der Entstehung von Wunschgeschwindigkeiten. Die Wunschgeschwindigkeit ist eine komplexe Größe, in der Einflüsse seitens des Fahrzeugführers, der Möglichkeiten des Fahrzeugs, Verkehrszustände, Elemente wie Straßentyp oder Trassierungsmerkmale, rechtliche Vorgaben (Geschwindigkeitsbegrenzungen) und meteorologische Bedingungen zusammengefaßt werden. Bei der meßtechnischen Erfassung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ist eine Abhängigkeit von Ort und Zeit der Messung gegeben, die keine fahrzeugfeine Auflösung zu erreichen vermag. Im Rahmen von Verkehrssimulationsmodellen werden solche Wunschgeschwindigkeiten einzelnen Fahrern über den Zeitverlauf einer Simulation als konstant zugerechnet. Es liegt aber die Vermutung nahe, daß die Wunschgeschwindigkeit eines Fahrers in Abhängigkeit von den momentan gegebenen Einflußfaktoren und auch von Aspekten kurz- oder langfristiger zeitlicher Dimension entsteht und damit zeitlich veränderlich ist (Vorstellungen über eine bestimmte Reise- oder Ankunftszeit, "Geschichte" der Fahrt, zeitweilige Veränderung der Kriterien z.B. im Stau). Derartige empirisch nur ungenau belegbaren Zusammenhänge lassen sich vermutlich mit Hilfe der Theorie unscharfer Mengen bei vertretbarem Aufwand modellieren.

Andere Erweiterungsmöglichkeiten für das Modell liegen in der Präzisierung der Streckenbeschreibung bzw. der Ausweitung auf dreistreifigen Verkehrsablauf. Die Streckengestaltung wird durch Einführen von

¹⁶ Auch Fahrerkollektive, denen ein besonderes Fahrverhalten auferlegt werden soll, könnten über einen entsprechenden Regelkatalog in erforderlichen Prozentsätzen dem Gesamtaufkommen beigelegt werden (z.B. spezielle Regelungen für Fahranfänger).

Steigungsgradienten und Kurvigkeit (Sichtweiten) realitätsnäher. Dadurch würden entsprechende Modellerweiterungen bezüglich der Fahrzeugkinematik und gewisser Grenzen für Querbeschleunigungen notwendig. Der Verkehrsablauf auf drei Fahrstreifen würde eine größere Anzahl potentieller Interaktionspartner sowie eine entsprechende Ergänzung der Regelkataloge, aber vermutlich nicht die Einführung neuer Fuzzy-Variablen-Typen erfordern. Ergänzend dazu wäre die Formulierung von Übergangsbereichen von beispielsweise drei auf zwei bzw. zwei auf einen Fahrstreifen (Verkehrsabläufe an Baustellen) oder Autobahnauffahrten bzw. -abfahrten zur Modellierung von Verflechtungsvorgängen von Interesse.

Eine andere Verfeinerungsmöglichkeit für das Modell liegt in der Beschreibung von Verkehrszuständen, die durch hohe Verkehrsstärken oder Verkehrsdichten gekennzeichnet sind. Die Modellierung des Verkehrsverhaltens bei hohen Verkehrsstärken läßt auf Erkenntnisse über Einflußfaktoren hoffen, die die Leistungsfähigkeit von Autobahnen mitbestimmen. Hohe Verkehrsdichten sind meist gleichbedeutend mit kritischen Verkehrszuständen z.B. Stau oder Stop-and-Go. Die eingehendere Untersuchung der Übergänge von Zuständen hoher Verkehrsstärke zu solchen hoher Verkehrsdichte ist unter dem Aspekt der Verkehrssicherheit von großem Interesse.

Alle skizzierten Erweiterungsmöglichkeiten sind zunächst auf eine Erweiterung der empirischen Datengrundlage angewiesen. Hier liegt der Schwerpunkt zukünftigen Forschungsbedarfs, um die implizit in der Formulierung des Fuzzy-Reglers getroffenen Annahmen in größerem Umfang abzustützen. An erster Stelle steht dabei die Ermittlung von empirischen Verteilungen potentieller Kollisionszeiten für verschiedenste Fahrsituationen und eine Unterscheidung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen insbesondere für Fahrstreifenwechsellvorgänge. Dabei sollte geprüft werden, inwieweit ein Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsniveau und dem Betrag der (eine gleichartige Reaktion hervorrufenden) potentiellen Kollisionszeit aufgezeigt oder die Relevanz der zeitlichen Entwicklung der potentiellen Kollisionszeit empirisch

belegt werden kann. Für die zeitliche Änderung der potentiellen Kollisionszeit (erste Ableitung nach der Zeit) ist formal nachweisbar (vgl. Anhang 8.1.5), daß sie die "Gefährlichkeit" einer potentiellen Kollisionszeit unabhängig vom Betrag derselben zu beurteilen erlaubt.

Bezüglich der Simulationsgeschwindigkeit ist das vorgestellte Modell mit ca. 25 Fahrzeugen in Echtzeit langsamer als herkömmliche Simulationssysteme. Mit einer Optimierung des Quellcodes, der Auswahl einer weniger rechenaufwendigen Inferenzmethode oder einer Portierung des Modells in eine Programmiersprache, die speziell für Fuzzy-Logic-Anwendungen geschaffene Computer-Bausteine dem Modell zugänglich machen würde (z.B. C++, Fuzzy-Prozessor 166 von SIEMENS), ist vermutlich eine höhere Leistungsfähigkeit erreichbar. Prinzipiell dürfte die Fahrzeugsimulation durch gleichzeitige Behandlung mehrerer Fahrer-Fahrzeug-Elemente pro Zeitschritt der Simulationszeit für parallele Rechnerarchitekturen geeignet sein. Vor der Inangriffnahme solcher Verbesserungen ist aber grundsätzlich zu klären, ob der Engpaß bei der "off-line"-Verkehrssimulation wirklich in der Simulationsgeschwindigkeit liegt.

Ebenfalls Zukunftsmusik ist die Verknüpfung des Fuzzy-Reglers mit Techniken neuronaler Netzwerke. Neuronale Netzwerke können Systemverhalten sozusagen "hypothesenfrei" durch "Lernen" nachbilden. Der Lernvorgang benötigt große Mengen an Input-Output-Vektoren (z.B. gemessene Daten von Einflußfaktoren und resultierendes Systemverhalten). Mit Hilfe solcher Netzwerke wäre es unter Umständen möglich, das gelernte Systemverhalten zu reproduzieren und generalisiertes Verhalten in Form von Regeln zu fixieren. Sollte im Rahmen der Entwicklung hin zum "intelligenten" Auto der Stand erreicht sein, daß Meßdaten über ausreichende Einflußfaktoren in großen Mengen und quasi nebenbei zu gewinnen sind (Daten, die für diverse Sicherheitssysteme oder Leitsysteme ohnehin über Sensoren erfaßt würden), läge eine Art Automatisierung bei der Erstellung von Regelkatalogen im Bereich des Möglichen.

7. Literaturverzeichnis

ASSMANN, E.: Die Bremsweganzeige im Head-up-Display - Ein Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit, Zeitschrift für Verkehrssicherheit 34, Nr.2, 1988

AUTO ZEITUNG, Heinrich Bauer Spezialzeitschriften Verlag KG, Köln, Heft Nr. 13, 1992

BANDEMER, H.; GOTTWALD, S.: Einführung in FUZZY-Methoden, Deutsch-Taschenbücher, Band 73, Verlag Harry Deutsch, 1990

BEHM, A.: Implementation eines einfachen Fahrzeugfolgmodells mit Hilfe der Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy Logic), Diplomarbeit, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1992

BENEKOHAL, R.F.; TREITERER, J.: CARSIM: Car-Following Model for Simulation of Traffic in Normal and Stop-and-Go Conditions, Transportation Research Record 1194, 1987

BRANNOLTE, U.: Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 318, Hrsg.: BMV, 1980

BRILON, W.; BRANNOLTE, U.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Straßen mit Gegenverkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 239, Hrsg.: BMV, 1977

BURCKHARDT, M.: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1985

BUSCH, F.: Spurbelastungen und Häufigkeit von Spurwechseln auf einer dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahn, Straßenverkehrstechnik, Heft 6, 1984

CAVALLO, V.; LAURENT, M.: Visual Information and Skill Level in Time-to-collision Estimation, Perception, vol. 17, pp.623-632, 1988

CHANDLER, R.E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E.W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following, Operations Res. vol. 6, pp. 165-184, 1958

COERS, H.G.: Die internationale Forschungsentwicklung und das räumlich-zeitliche Prinzip mikroskopischer und makroskopischer Untersuchungen des Verkehrsflusses, Die Strasse, S. 368-374, 1970

COHEN, A.S.: Möglichkeiten und Grenzen visueller Wahrnehmung im Straßenverkehr, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 57, BASt (Hrsg.), 1986

EDIE, L.C.: Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic, Operations Research vol. 9, pp. 66-76, 1961

ERNST, R.: Verkehrsablauf an Straßenknoten - Ein Beitrag zur Bewertung der Vorfahrtbeachtung, Dissertation, TH Karlsruhe, 1967

FÄRBER, B.: Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr, Zeitschrift für Verkehrssicherheit 32, Nr.1, 1986

FOX, P.; LEHMAN, F.G.: A Digital Simulation of Car Following and Overtaking, Highway Research Record No. 199, Washington D.C., pp.33-41, 1967

GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; POTTS, R.B.: Car-Following Theory of Steady State Traffic Flow, Operations Research vol. 7, pp. 499-505, 1959

GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R.W.: Non-linear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, Operations Research vol. 9, pp. 545-567, 1961

GIBSON, J.J.: The Perception of the Visual World, Boston: Houghton Mifflin, 1950

GIPPS, P.G.: A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation, Transportation Research, Part B, Vol. 15, 1981

GODTHELP, H.; KÄPPLER, W.D.: Effects of Vehicle Handling Characteristics on Driving Strategy, Human Factors vol. 30, Nr.2, 1988

GODTHELP, H.; MILGRAM, P.; BLAAUW, G.J.: The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy, Human Factors, Vol 26, Nr.3, 1984

GREENSHIELDS, B.D.; SCHAPIRO, D.; ERICKSEN, E.L.: Traffic Performance at Urban Street Intersections, Yale University, 1947

GRIMM, H.G.: Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Situationsübergreifende Aspekte, Forschungsberichte der BASt, Bereich Unfallforschung, Heft 176, 1988

GUSKI, R.: Wahrnehmung, Grundriß der Psychologie, Band 7, Verlag Kohlhammer, 1989

HANDSCHMANN, W.: Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers, Institut für Verkehrswesen, Uni Karlsruhe, Schriftenreihe Heft 18, 1978

HARVEY, L.O.; MICHON, J.A.: Detectability of Relative Motion as a Function of Exposure Duration, Angular Separation, and Background, Journal of Experimental Psychology, Vol. 103, No. 2, 1974

HERMAM, R.; POTTS, R.B.: Single-Lane Traffic Theory and Experiment, Theory of Traffic Flow, Elsevier, New York, pp. 120-146, 1961

HOEFS, H.D.: Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 140, Hrsg.: BMV, 1972

HOMBURGER, W.S.: The Behavior of Drivers at Uncontrolled Intersections, Traffic Engineering, 1951

HUBSCHNEIDER, H.; LEUTZBACH, L.; WIEDEMANN, R.: Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit zweispurigen Richtungsfahrbahnen im Hinblick auf empirisch nicht ausreichend verifizierbare, Situationen, Forschungsauftrag der BAST, 1977

HÜTTEN, H.: Wege zum sparsamen Auto, OPEL-Schriftenreihe, Hrsg. Adam Opel AG, PR-Programme, Rüsselsheim, 1989

KIKUCHI, S.; CHAKROBORTY, P: A Car-following Model Based on Fuzzy Inference System, TRB-Meeting, Paper no. 920629, Washington, 1992 (in überarbeiteter Form veröffentlicht in: Highway Capacity and Traffic Flow, Transportation Research Record no.1365, pp. 82-91, Washington, 1992)

KOSKO, B.: Neural Networks And Fuzzy Systems, Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, N.J., 1992

KRAFTFAHRTBUNDESAMT (Hrsg.): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern in den alten Bundesländern am 1. Juli 1990

KRATZER, S.: Ein verhaltensorientiertes Modell zur Bestimmung von Wunschgeschwindigkeiten, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1992

LACHENMAYR, B.: Peripheres Sehen und Reaktionszeit im Straßenverkehr, Zeitschrift für Verkehrssicherheit 33, Nr.4, 1987

LAPIERRE, R.; STEIERWALD, G. (Hrsg.): Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band I: Grundlagen und Technologien der Verkehrsleittechnik, Springer-Verlag, 1987

LEE, D.N.: A Theory of Visual Control of Braking Based on Information About Time-to-collision, Perception vol. 5, pp. 437-459, 1976

LEIBOWITZ, H.W.: The Relation Between the Rate Threshold for the Perception of Movement and Luminance for Various Durations of Exposure, Journal of Experimental Psychology, Vol. 49, No. 3, 1955

LEUTZBACH, W.; BEXELIUS, S.: Probleme der Kolonnenfahrt, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 44, Hrsg.: BMV, 1966

LEUTZBACH, W.; WIEDEMANN, R.: Development and Applications of Traffic Simulation Models at the Karlsruhe Institut für Verkehrswesen, Traffic Engineering and Control, pp. 270-278, 1986

LEUTZBACH, W.; BUSCH, F.: Spurwechselforgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen, Forschungsauftrag FA 1.082 des BMV, 1984

LEUTZBACH, W.; PAPAVALIOU, V.: Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen, Forschungsberichte der BAST, Bereich Unfallforschung, Heft 177, 1988

MICHAELS, R.M.; COZAN, L.W.: Perceptual and Field Factors Causing Lateral Displacement, Highway Research Board, HRR No. 25, Washington, 1962

MICHAELS, R.M.: Peceptual Factors in Car-following, Proc. 2nd Int. Symp. Theory of Road Traffic Flow 1963, OECD, Paris, pp. 44-59, 1965

NEHMETH, Z.A.; ROUPHAIL, N.M.: Lane Closures at Freeway Workzones: Simulation Study, Transportation Research Record 869, pp. 19-25, 1982

RETZKO, H.G.: Vergleichende Bewertung verschiedener Arten der Verkehrsregelung an städtischen Straßenverkehrsknotenpunkten, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 12, Hrsg.: BMV, 1961

REUSCHEL R.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug, Zeit. Österr. Ing. und Arch. Ver., S. 59-62, 1950

ROMMELFANGER, H.: Entscheiden bei Unschärfe, Springer Verlag, 1988

SCHIEMANN, G.: Experimentelle Untersuchung zur Reaktions- bzw. Verzugsdauer von Fahrzeuglenkern, Diplomarbeit, Institut für Maschinenkonstruktionslehre, Uni Karlsruhe, 1981

SCHIFF, W.: Perception of Impending Collision: A Study of Visually Directed Avoidant Behaviour, Psychological Monographs: General and Applied, vol.79, no.604, 1965

SCHNITTGER, S.: Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1991

SPARMANN, U.: Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263, Hrsg.BMV, 1978

SPURR, R.T.: Subjective Aspects of Braking, Automobile Engineer, vol. 59, pp. 58-61, 1969

TODOSIEV, E.P.: The Action-Point Model of the Driver-Vehicle System, Ohio State University, Engineering Experiment Station, Rept.-No. 202A-3, 1963

VAN DER HORST, R.; GODTHELP, H.: Measuring Road User Behaviour With an Instrumented Car And an Outside-the-Vehicle Video Observation Technique, Transportation Research Record 1213, pp.72-81, 1989

VAUBEL, O.: Verkehrsablauf an Autobahneinfahrten in Ballungsräumen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 167, Hrsg.: BMV, 1974

WETTERLING, K.: Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 292, Hrsg.: BMV, 1980

WHITE, W.: Backward Waves in Highway Traffic Jams, Proc. of the IRE, pp.11-13, 1957

WINZER, TH.: Messung von Beschleunigungsverteilungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 319, Hrsg.: BMV, 1980

WIEDEMANN, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 74, Hrsg.: BMV, 1968

WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses, Institut für Verkehrswesen, Uni Karlsruhe, Schriftenreihe Heft 8, 1974

WIEDEMANN, R.; BECKER, U.; BUCK, A.: Geschwindigkeitsverhalten auf Bundesautobahnen und Landstraßen, FuE-Projekt im Auftrag der Porsche AG, Stuttgart, und der BMW AG, München, 1985

WIEDEMANN, R.; REITER, U.: Verkehrsflußsimulation, FuE-Projekt B2418 im Auftrag der Bosch GmbH, Stuttgart, noch nicht veröffentlicht

ZADEH, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol.8, pp. 338-353, 1965

ZIMMERMAN H.J.: Fuzzy Set Theory and it's Application, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 1991

8 Anhang

8.1 Herleitungen zur potentiellen Kollisionszeit

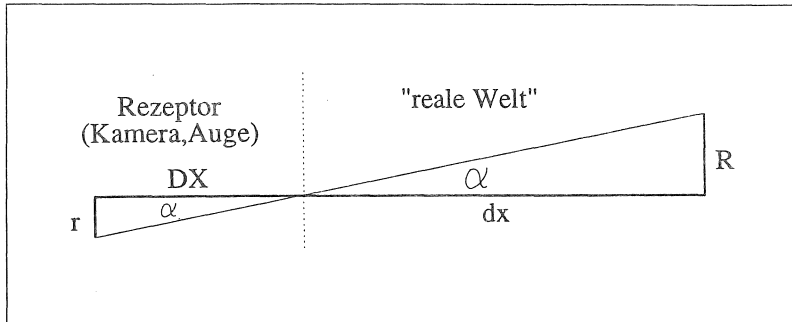


Abb. 8.1-1: Einfaches Modell für Abbildungseigenschaften optischer Rezeptoren

Variablendeklaration:

- R : Ausdehnung eines realen Objekts (z.B. Fahrzeugbreite), konstant
- r : Ausdehnung der Abbildung eines Objekts
- \dot{r} : Zeitliche Änderungsrate von r
- DX : Brennweite des Rezeptors (Auge, Kamera), konstant
- dx : Abstand zwischen Objekt (x_1) und Rezeptor (x_2), ($dx = x_1 - x_2$)
- dv : Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Objekt (v_1) und Rezeptor (v_2), ($dv = v_1 - v_2$)
- da : Beschleunigungsdifferenz zwischen Objekt (a_1) und Rezeptor (a_2), ($da = a_1 - a_2$)
- α : Öffnungswinkel, der sich aus der Ausdehnung des Objekts und dem Abstand zwischen Rezeptor und dem Objekt ergibt.
- $\dot{\alpha}$: Zeitliche Änderungsrate des Öffnungswinkels α

8.1.1 Äquivalenznachweis für die beiden Definitionen $-dx/dv$ und r/\dot{r} für die potentielle Kollisionszeit

Zu zeigen ist die Äquivalenz der beiden Definitionen:

$$t_k = - \frac{\text{Nettoabstand zwischen zwei Fahrzeugen}}{\text{Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge}} = - \frac{dx}{dv}$$

und

$$t_k = \frac{\text{Abstand der Abbildung zweier Punkte eines Objekts}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit des Abstands dieser Punkte}} = \frac{r}{\dot{r}}$$

Es gilt (mit DX , R = konstant):

$$\frac{r}{DX} = \frac{R}{dx} \quad (1)$$

1. Ableitung der Gleichung nach der Zeit für beide Seiten:

$$\frac{\dot{r}}{DX} = - \frac{R \cdot \dot{dx}}{(dx)^2}$$

Rechte Seite auftrennen:

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{r}}{DX} = - \frac{dx}{dx} \cdot \frac{R}{dx}$$

Einsetzen von (1):

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{r}}{DX} = - \frac{dx}{dx} \cdot \frac{r}{DX}$$

Kürzen und umformen:

$$\Leftrightarrow -\frac{dx}{\dot{dx}} = -\frac{dx}{dv} = \frac{r}{\dot{r}} \quad (2)$$

8.1.2 Äquivalenznachweis für die beiden Definitionen $-dx/dv$ und $\alpha/\dot{\alpha}$ für die potentielle Kollisionszeit:

Zur Begründung der physiologischen Wahrnehmbarkeitsgrenze für potentielle Kollisionszeiten ist die Äquivalenz der beiden folgenden Definitionen zu zeigen:

$$t_k = -\frac{\text{Nettoabstand zwischen zwei Fahrzeugen}}{\text{Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge}} = -\frac{dx}{\dot{dx}}$$

und

$$t_k = \frac{\text{Öffnungswinkel zwischen zwei Punkten eines Objekts}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit dieses Winkels}} = \frac{\alpha}{\dot{\alpha}}$$

Für $dx \gg R$ (bzw. $\alpha < 0,1$ rad) gilt:

$$\frac{R}{dx} = \tan \alpha \cong \alpha$$

bzw.

$$\alpha = \frac{R}{dx} \quad (3)$$

1. Ableitung der Gleichung nach der Zeit für beide Seiten:

$$\dot{\alpha} = - \frac{R \cdot \dot{dx}}{(dx)^2}$$

$$\Leftrightarrow \alpha = - \frac{\dot{dx}}{dx} \cdot \frac{R}{dx}$$

Einsetzen von (3)

$$\Leftrightarrow \alpha = - \frac{\dot{dx}}{dx} \cdot \alpha$$

Umformen

$$\Leftrightarrow - \frac{dx}{\dot{dx}} = \frac{\alpha}{\dot{\alpha}} \quad (4)$$

8.1.3 Herleitung für eine minimale potentielle Kollisionszeit tk_{min} bei vorgegebener Beschleunigungsdifferenz

Grenzwert tk_{min} bestehend aus einer minimalen Kollisionszeit tk , zu deren Beginn mit einer gegebenen Beschleunigungsdifferenz mit dem Bremsvorgang zur Kollisionsvermeidung begonnen werden muß, einschließlich einer vorhergehenden Adaptationszeit t_r für die Wahl der Beschleunigungsdifferenz. Zur Vermeidung einer Kollision muß gelten:

$$dx + dv \cdot t + \frac{da}{2} \cdot t^2 = 0 !$$

$$dv + da \cdot t = 0 !$$

Zweite Bedingung nach t auflösen und in die erste einsetzen:

$$dx - \frac{dv^2}{2 \, da} = 0$$

$$\Leftrightarrow - \frac{dx}{dv} = - \frac{dv}{2 \, da}$$

$$\Leftrightarrow tk = - \frac{dv}{2 \, da}$$

Einbeziehung von t_r :

$$tk_{\min} = t_r + tk$$

$$\Leftrightarrow tk_{\min} = t_r - \frac{dv}{2 \, da}$$

8.1.4 Herleitung des Grenzwerts tk_g für maximal wahrnehmbare potentielle Kollisionszeiten:

Mit:

$$\frac{R}{dx} = \tan \alpha \equiv \alpha \quad ; \quad \frac{1}{tk_g} = - \frac{dv}{dx}$$

gilt:

$$tk_g = \frac{\alpha}{\dot{\alpha}_g} = \frac{R}{dx} \cdot \frac{1}{\dot{\alpha}_g} = - \frac{R}{tk_g \cdot dv \cdot \dot{\alpha}_g}$$

Umformen:

$$tk_g^2 = - \frac{R}{\dot{\alpha}_g \cdot dv}$$

$$\Leftrightarrow tk_g = \sqrt{\frac{R}{\dot{\alpha}_g} \cdot \frac{1}{-dv}} \quad (5)$$

8.1.5 Zeitliche Änderung der potentiellen Kollisionszeit (1.Ableitung nach der Zeit)

Ob bei einem Annäherungsprozeß zweier Fahrzeuge (positive potentielle Kollisionszeit) eine gewählte konstante Beschleunigungsdifferenz ausreicht, um eine Kollision zu vermeiden, kann auch an der zeitlichen Entwicklung der potentiellen Kollisionszeit erkannt werden:

$$tk = - \frac{dx}{dv}$$

1. Ableitung nach der Zeit:

$$\begin{aligned} \dot{tk} &= - \left(\frac{dx \cdot dv - dx \cdot \dot{dv}}{dv^2} \right) \\ \Leftrightarrow \dot{tk} &= - \left(\frac{dv^2 - dx \cdot da}{dv^2} \right) \\ \Leftrightarrow \dot{tk} &= - 1 + \frac{dx \cdot da}{dv^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Für eine kollisionsfreie Annäherung muß gelten, daß die Geschwindigkeitsdifferenz null sein muß, bevor der Abstand gegen null gegangen ist. Also muß gelten:

$$dx \geq \frac{dv^2}{2da}$$

Umformen nach da :

$$\Leftrightarrow da \geq \frac{dv^2}{2dx}$$

Einsetzen in (6):

$$tk \geq -1 + \frac{dx}{dv^2} \cdot \frac{dv^2}{2dx}$$

$$\Leftrightarrow tk \geq -0,5 \quad (7)$$

Solange bei einem Annäherungsprozeß die 1. Ableitung der potentiellen Kollisionszeit nicht unter den Wert -0,5 abfällt, ist die Annäherung unkritisch.

8.2 Messung potentieller Kollisionszeiten mit Hilfe von Videoaufnahmen

Potentielle Kollisionszeit kann als Quotient aus dem Abstand der Abbildung zweier Punkte eines Fahrzeugs und der Änderungsgeschwindigkeit des Abstands dieser Punkte definiert werden. Zur Ermittlung empirischer potentieller Kollisionszeiten war es demnach erforderlich, Fahrsituationen, für die Kollisionszeiten zu messen waren, mit einer Kamera zu erfassen und im nachhinein diese Bilder zu vermessen.

Für die Videoaufnahmen wurde ein Meßfahrzeug häufigen Typs (VW-Passat) zunächst mit handelsüblicher Tönungsfolie im Heckbereich abgedunkelt, um die Videokamera für andere Verkehrsteilnehmer unsichtbar zu machen. Die Videokamera wurde mit Hilfe eines speziellen

Saugnapf-Stativs an der hintersten linken Seitenscheibe befestigt und so justiert, daß der Verkehrsablauf auf dem rückwärtigen Fahrstreifen¹⁷ und dem in Fahrtrichtung links angrenzenden Fahrstreifen im Blickfeld der Kamera lag (Abb. 8.2-1). Da einerseits die zu vermessenden Fahrzeuge möglichst groß abgebildet werden sollten, um Fehler bei der Bildvermessung möglichst gering zu halten, andererseits aber die Fahrstreifenwechsellvorgänge der sich von hinten nähernden Fahrzeuge auch bei sehr kleinen Distanzen noch vollständig zu vermessen sein sollten, wurde in mehreren Probefahrten ein Kompromißwert für eine größtmögliche Brennweite des Kameraobjektivs ermittelt. Im Verlauf von insgesamt 8h Autobahnfahrt wurden etwas über 200 Fahrstreifenwechselvorgänge erfaßt. Sowohl während der Fahrten als auch bei der Auswertung entstand nie der Eindruck, daß die Kamera für andere Verkehrsteilnehmer sichtbar und damit eventuell verhaltensverfälschend gewesen wäre.

Für die Auswertung des Bildmaterials wurde auf einer Work-Station (NeXT) mit Videoanschluß eine Auswerte-Software erstellt, die das Vermessen von Standbildern unterstützt. Dazu wird ein entsprechender Videorecorder vom Computer aus angesteuert. Bildsequenzen von Fahrstreifenwechseln können gesucht und Einzelbilder in diskreten Zeitabständen vermessen werden. Die Bildfrequenz von 25 Bildern/Sekunde wird als Zeitmaßstab verwendet. Bei der Untersuchung der Fahrstreifenwechsellvorgänge wurde jeweils eine Sequenz von mindestens 8 Standbildern im Abstand von 0,4 s (10/25 s) vermessen, die zeitlich durch das Überschreiten der Mittellinie durch das überholende Fahrzeug begrenzt war. Vermessen wurde dabei die Fahrzeugbreite durch zwei vertikale Meßbalken (Breite: 1 Pixel), deren x-Koordinatendifferenz für jedes Standbild gespeichert wurde. Die Bildauflösung von horizontal 640 Pixel erwies sich dabei als hinreichend fein, um auch von weiter entfernten und damit kleiner abgebildeten Fahrzeugen zuverlässig potentielle Kollisionszeiten ermitteln zu können.

¹⁷ Die Blickperspektive nach vorne würde nur das Verhalten des Meßfahrzeugfahrers protokollieren, nicht die empirische Verteilung über eine Stichprobe verschiedener Fahrer.

Zu welchem Zeitpunkt in der Realität ein Fahrstreifenwechselentscheid erfolgt, kann durch Videoaufnahmen nicht belegt werden. Vereinfachend wurden aber die beiden Zeitpunkte der zur Berechnung der potentiellen Kollisionszeiten notwendigen Einzelbilder einheitlich auf 2,8 s beziehungsweise 1,6 s vor Erreichen der Mittellinie festgelegt, womit Fahrstreifenwechselzeiten von 2-3 s und einer einheitlichen Reaktionszeit Rechnung getragen wurde.

Tabelle 8.2-1 zeigt einen Ausschnitt der Rohdaten der Bildvermessung. Mit "links" bzw. "rechts" sind die Positionen (in Pixel) der Meßbalken gekennzeichnet, Δt bedeutet den Zeitabstand zwischen den vermessenen Standbildern in 1/25 s. Daraus lassen sich die Breiten der Abbildung des Fahrzeugs zu den Zeitpunkten 2,8 s bzw. 1,6 s vor Erreichen der Mittellinie errechnen.

Δt	links	rechts	
...	
10	147	255	
10	136	249	Breite1 = 113 Pixel
10	130	249	
10	123	248	
10	138	267	Breite2 = 129 Pixel
10	154	290	
10	182	322	
10	199	346	
10	Erreichen der Mittellinie

Tab. 8.2-1

Die potentielle Kollisionszeit berechnet sich dann wie folgt:

$$\begin{aligned}
 tk &= \frac{(Breite\ 1 + Breite\ 2)/2}{(Breite\ 2 - Breite\ 1) / (t\ (Breite\ 2) - t\ (Breite\ 1))} \\
 &= \frac{(113 + 129) / 2}{(129 - 113) / 1,2} \text{ s} = 9,08 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Dabei ist die Wahl der Bezugsbreite (hier der Mittelwert beider Breiten) in gewisser Weise willkürlich. Es wäre ebenso gut denkbar, Breite 1 oder auch Breite 2 zu wählen. Allerdings läßt sich zeigen, daß der dadurch verursachte Unterschied systematischer Natur ist. Die Differenz dieser unterschiedlichen Kollisionszeiten ist nur von der Zeitdifferenz zwischen den beiden Standbildern abhängig:

$$\frac{Breite\ 1}{(Breite\ 2 - Breite\ 1) / dt} \quad (1)$$

$$\frac{(Breite\ 1 + Breite\ 2) / 2}{(Breite\ 2 - Breite\ 1) / dt} \quad (2)$$

$$\frac{Breite\ 2}{(Breite\ 2 - Breite\ 1) / dt} \quad (3)$$

$$(2) - (1) = 0,5 \cdot dt$$

$$(3) - (2) = 0,5 \cdot dt$$

Würde man also Breite 2 als Bezugsbreite verwenden, ergäbe sich eine potentielle Kollisionszeit von 9,68 s.

Bei der Meßdurchführung und -auswertung können sich an verschiedenen Stellen Fehler ergeben. Größte Fehlerquelle bei der Auswertung ist die Adjustierung der Meßbalken an das zu vermessende Objekt, da die Bildqualität des Videostandbildes dem Auswertepersonal ein gewisses Maß an "Fingerspitzengefühl" abverlangt. Aus Mehrfachauswertungen

gleicher Bildsequenzen ergaben sich nur geringe Unterschiede bei den errechneten Kollisionszeiten. Da die ausgewertete Stichprobe von 199 Fahrstreifenwechsellvorgängen lediglich dazu dienen sollte, eine erste Häufigkeitsverteilung für potentielle Kollisionszeiten beim Fahrstreifenwechsel zu erstellen, wurde auf eine Mehrfachauswertung der Gesamtstichprobe verzichtet.

Ein Fehler anderer Art kann sich dadurch ergeben, daß die vermessene Fahrzeugfront nicht orthogonal zur Kameraachse steht (Abb. 8.2-1). Für die "scheinbare Breite" b' gilt:

$$b' \leq b, \quad b = \text{Frontbreite des Fahrzeugs.}$$

$$b' = b \cdot \cos \alpha \quad \text{mit } \alpha = \arcsin \left(\frac{dy}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \right)$$

Aus dem Abstand dx und der Abweichung dy zwischen den beiden y-Koordinaten des Kameraobjektivs bzw. der Mitte der Fahrzeugbreite des überholenden Fahrzeugs läßt sich der Fehler b'/b berechnen.

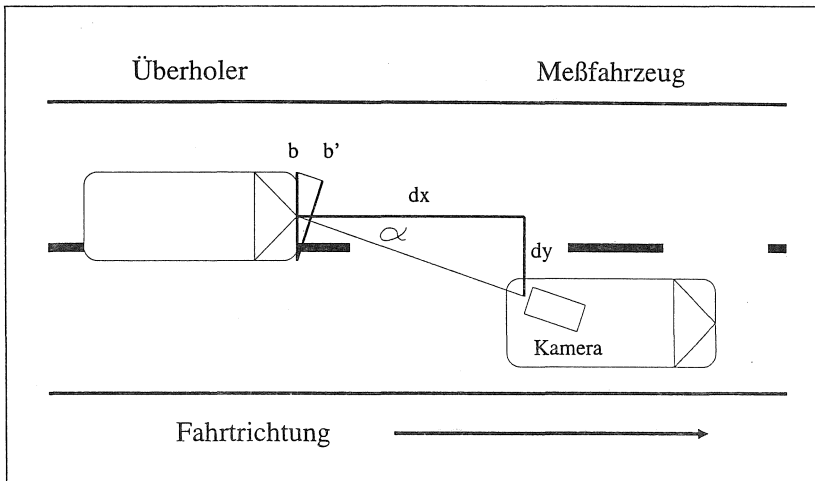


Abb. 8.2-1: Meßanordnung für Videoaufnahmen zur Ermittlung potentieller Kollisionszeiten

Beispiel:

$$dx = 15 \text{ m} , \quad dy = 3 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad \frac{b'}{b} = 0,981$$

Der Fehler wäre in diesem Fall kleiner als 2%. Da sowohl die Abstände dx beim Fahrstreifenwechsel i.d.R. größer als 15 m und der Verzug dy durch die Anordnung der Kamera meist erheblich geringer als 3 m waren, wurde auch diese Fehlerquelle nicht näher betrachtet.

Optische Einflüsse der Heckscheibe, die sich zwischen Kameraobjektiv und zu vermessenden Objekten befand, sowie Verzeichnungseigenschaften des Kameraobjektivs wurden ebenfalls vernachlässigt, da dem Fehlerpotential gemessen an der Aufgabenstellung keine Bedeutung beigemessen wurde.

8.3 Messung visueller Wahrnehmungsgrenzen im Straßenverkehr

Zur Überprüfung der ausschließlich unter Laborbedingungen ermittelten Wertebereiche für minimal wahrnehmbare Winkeländerungsgeschwindigkeiten $\dot{\alpha}_g$ (vgl. Abschnitt 2.5) wurden Messungen unter realen Verkehrsbedingungen auf Schnellstraßen durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Testpersonen während der Fahrt in einem Meßfahrzeug wiederholt aufgefordert, vorausfahrende Fahrzeuge dahingehend zu klassifizieren, ob sie sich momentan relativ dem Meßfahrzeug näherten, der Abstand gleichbleibend sei oder sie sich von ihm wegbewegten.

Die Versuchspersonen hatten erst auf Anforderung hin das vorausfahrende Fahrzeug zu fixieren und dann schnellstmöglich ihren Wahrnehmungseindruck durch Betätigen eines Schalters mitzuteilen. Bis zu Beginn einer Testsituation hatte die Testperson den Blick aus dem Seitenfenster zu richten, um im Vergleich zur eigentlichen Testsituation einen möglichst ähnlichen visuellen Eindruck bezüglich Helligkeit, Entfernungsbereich und Eigenbewegung zu gewährleisten. Das voraus-

fahrende Fahrzeug war dann erst auf eine akustische und visuelle Anforderung hin zu fixieren.

Die Meßfahrten wurden mit Hilfe einer Videokamera protokolliert, die sowohl das Verkehrsgeschehen auf dem Fahrstreifen voraus als auch Leuchtdioden in ihrem Sucherfeld erfaßte, die den Beginn und die Reaktion der Versuchsperson sowie das Ende einer Versuchssituation markierten.

Die rechnerische Ermittlung von Winkeländerungsgeschwindigkeiten fußt im folgenden auf den geometrischen Gegebenheiten, wie sie aus Abbildung 8.1-1 ersichtlich sind. Dort gilt:

$$\tan \alpha = \frac{R}{dx} = \frac{r}{DX} \quad (1)$$

oder mit $\alpha < 0,1$ rad vereinfachend:

$$\alpha = \frac{R}{dx} = \frac{r}{DX} \quad (2)$$

Um aus der Abbildung eines Objekts mit der Ausdehnung r den Öffnungswinkel α bestimmen zu können, muß demnach die Brennweite DX ermittelt werden. Sie ergibt sich aus einer Eichmessung mit einem Objekt (Eichbalken) bekannter Breite R_e und aus einem bekannten Abstand dx_e und der daraus resultierenden Abbildungsbreite r_e . Für den Öffnungswinkel α eines beliebigen Objekts mit der Abbildungsbreite r gilt damit (bei $\alpha < 0,1$ rad):

$$\alpha = r * \frac{R_e}{r_e * dx_e} \quad (3)$$

Die zeitliche Änderung dieses Winkels ist dann aus der Vermessung zweier Einzelbilder mit bekanntem zeitlichen Abstand in Form eines Differenzenquotienten bestimmbar:

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{(\alpha_{t_2} - \alpha_{t_1})}{(t_2 - t_1)} = \frac{R_e}{r_e * dx_e} * \frac{(r_{t_2} - r_{t_1})}{(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

Der Zeitpunkt t_1 für das erste der beiden jeweils zu vermessenden Einzelbilder war durch den Beginn der Meßsituation zuzüglich eines pauschalen Zeitintervalls für Reaktion und Blickzuwendung von 0,4 s festgelegt, die der Versuchsperson zur Fixierung des vorausfahrenden Fahrzeugs zur Verfügung stand. Zeitpunkt t_2 wurde durch das Aufleuchten einer der beiden "Antwort"-Dioden (Annäherung, Entfernung) bestimmt. Als maximale Zeitdifferenz für die Situationsbeurteilung wurde ein Zeitintervall von 3 s zugelassen; eine spätere oder ausbleibende Entscheidung der Versuchsperson wurde als nicht wahrnehmbare Winkeländerung interpretiert. Zur Zeitmessung diente die Zeitcodierung der Videoaufzeichnung, die mit der Bildfrequenz von 25 Hertz ein genaues und zuverlässiges Zeitraster bietet. Die Vermessung der Videobilder zur Erfassung der Abbildungsgrößen des Eichbalkens und der beobachteten Fahrzeuge erfolgte an einem Verbund aus Work-Station (NeXT) und Videorecorder auf der Basis von Abbildungsbreiten erfaßter Fahrzeuge in Form von Bildpunktdifferenzen. Die Brennweite der Kamera wurde so gewählt, daß ein Öffnungswinkel von 1 Grad einer Abbildungsbreite von etwa 60 Bildpunkten (Pixeln) entsprach.

Personenspezifische Schwellenwerte für visuelle Wahrnehmung von Winkeländerungsgeschwindigkeiten können auf der Grundlage aller nicht wahrgenommenen Winkeländerungen aus Abbildung 8.3-1 in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel der beobachteten Fahrzeuge entnommen werden. Die vorgestellten empirischen Meßdaten lassen für eine minimal wahrnehmbare Winkeländerungsgeschwindigkeit α_g bei einem Öffnungswinkel von $\alpha < 3$ Grad folgenden funktionalen Zusammenhang vermuten:

$$\frac{\alpha}{\alpha_g} = c \quad (5)$$

Allen Meßwerten dieser Abbildung ist ein einheitliches Meßintervall von 3 s gemeinsam, in dessen Verlauf die Probanden keine Winkeländerung feststellten. Aus Abbildung 8.3-1 lassen sich für die personen-spezifische Konstante c in etwa diese Werte angeben:

Annäherungsvorgänge: $c \in 20;...;50$ s

Entfernungsvorgänge: $c \in -50;...;-20$ s

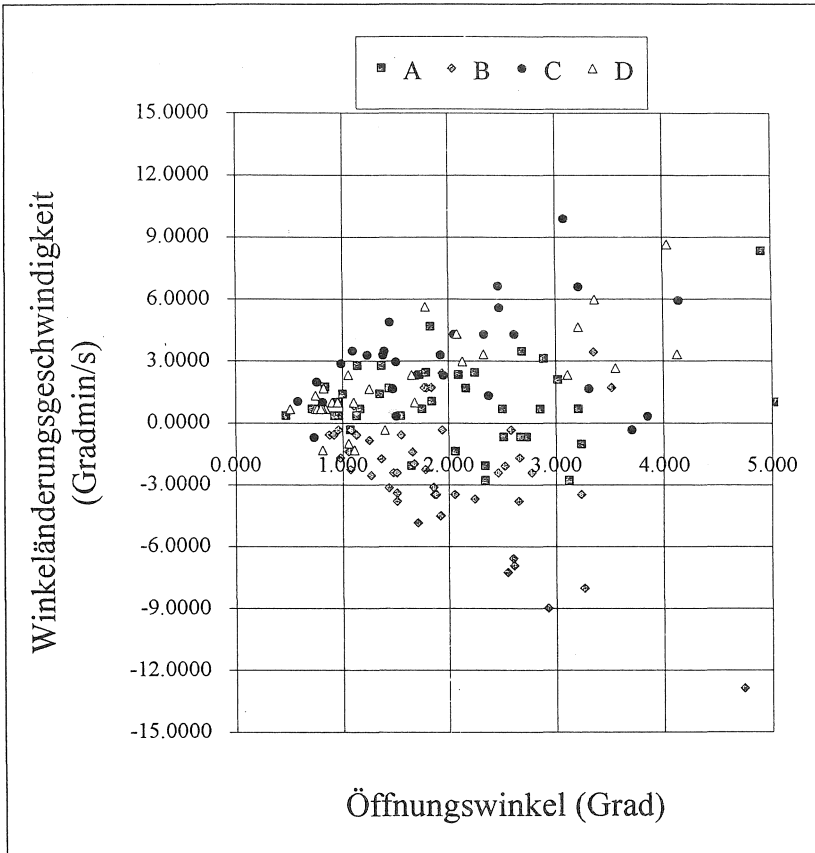


Abb.8.3-1: Nicht wahrgenommene Winkeländerungsgeschwindigkeiten verschiedener Versuchspersonen (A, B, C, D) in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel

Die Beziehung (5) unterscheidet sich von der bisher gängigen Betrachtungsweise, die einen konstanten Wert bzw. einen Wertebereich für eine minimal wahrnehmbare Winkeländerungsgeschwindigkeit unabhängig vom Öffnungswinkel des beobachteten Objekts vorschlägt. Dies würde jedoch bedeuten, daß bei größeren Öffnungswinkeln eine anteilig geringere Winkeländerung wahrnehmbar wäre als bei kleineren Öffnungswinkeln. Demgegenüber impliziert die Beziehung (5) daß eine Winkeländerung nur dann wahrzunehmen ist, wenn sie pro Zeiteinheit einen bestimmten Proportionalteil des Öffnungswinkels überschreitet (etwa 2 bis 5 %/s).

Betrachtet man den Bereich der gemessenen Öffnungswinkel von 0,5-3 Grad¹⁸ (Abb.8.3-1), läßt sich daraus jedoch mit (5) und unter Beachtung der oben genannten Werte für die Konstante c ein Wertebereich für α_g berechnen, der mit den unter Laborbedingungen ermittelten Werten (vgl. Tab.2.5-1) harmonisiert: $\alpha_g \in (0,6;...;9)$ Gradmin/s.

Die beschriebenen Messungen bestätigen insofern die bislang verwendeten Schwellenwerte, legen aber eine andere formale Beschreibung der Wahrnehmungsschwelle nahe. An dieser Stelle muß jedoch betont werden, daß der Umfang der vorgenommenen Messungen noch zu klein ist, um diesen Sachverhalt abschließend klären zu können. Dafür wäre eine eingehendere Untersuchung erforderlich, die unter anderem auch Fahrzeugtypen, Witterungseinflüsse und Fahrereigenschaften (Fahrerfahrung, Alter, ect.) systematisch miterfassen sollte. Allerdings steht für solche Untersuchungen nun ein Verfahren zur Verfügung, das es mit verhältnismäßig geringem Aufwand erlaubt, Wahrnehmungsgrenzen unter realen Verkehrsbedingungen auch für größere Stichproben zu erheben. Dies könnte speziell unter forensischen Aspekten von Interesse sein.

¹⁸ Bei einer Fahrzeugbreite von 1,6 m entspricht der oben genannte Wertebereich des Öffnungswinkels einem Entfernungsbereich von 30-180 m.

8.4 Herleitung der Beschleunigungsgrenzwerte $a_{max}(v)$, $a_{Gw}(v)$ und der geschwindigkeitsabhängigen Verlustleistung

$a_{max}(v)$: Maximal mögliche Beschleunigung in Abhängigkeit von v
$a_{Gw}(v)$: Bremsverzögerung bei "Gas wegnehmen" in Abhängigkeit von v
v	: momentane Geschwindigkeit
v_{max}	: Maximalgeschwindigkeit
m	: Gewicht (Masse)
L	: Verfügbare Leistung
L_{max}	: Maximalleistung
$L_{Vert.}(v)$: Verlustleistung in Abhängigkeit von v
$L_{Vert.}(v_{max})$: Verlustleistung in Abhängigkeit von v_{max}

Bei einfacher energetischer Betrachtung gilt (mit $L = \text{konstant in } \Delta t$):

$$L \cdot \Delta t = \frac{m}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (\text{mit } v_2 > v_1)$$

Auflösen nach v_2 :

$$\sqrt{v_1^2 + \frac{2 \cdot L \cdot \Delta t}{m}} = v_2 \quad (1)$$

Zur Berechnung eines verfügbaren Beschleunigungspotentials gilt:

$$v_2 - v_1 = a \cdot \Delta t \quad (2)$$

(1) in (2) einsetzen und nach a auflösen:

$$a = \frac{\sqrt{v_1^2 + \frac{2 \cdot L \cdot \Delta t}{m}}}{\Delta t} - v_1$$

Bei Verwendung metrischer Einheiten, setzen von $v = v_I$ und $\Delta t = 1s$ ergibt sich:

$$a \cong \sqrt{v^2 + \frac{2 \cdot L}{m}} - v$$

Damit die potentiell verfügbare Beschleunigung bei Erreichen der Maximalgeschwindigkeit v_{max} zu null wird, muß ein Korrekturfaktor K in die Formel eingefügt werden:

$$K = \frac{L_{max}}{L_{(Verl.)(v_{max})}}$$

Damit gilt dann für die beiden Beschleunigungsgrenzwerte mit $L := L_{max} - L_{(Verl.)(v)}$:

$$a_{max}(v) \cong \sqrt{v^2 + \frac{2}{m} \cdot (L_{max} - K \cdot L_{(Verl.)(v)})} - v$$

$$a_{Gw}(v) \cong \sqrt{v^2 - \frac{2}{m} \cdot K \cdot L_{(Verl.)(v)}} - v$$

Dabei ist die Verlustleistung eine durch Regression ermittelte Funktion der momentanen Geschwindigkeit:

$$L_{(Verl.)(v)} \cong 0,3456 \cdot v \quad \text{für } v \in [0, \dots, 13,9 \text{ m/s}]$$

$$13 - 1,408 \cdot v + 0,059 v^2 \quad \text{für } v > 13,9 \text{ m/s}$$

Diese Funktion entstand in Anlehnung an Abbildung 8.4-1, in der der Leistungsverbrauch eines Pkw durch Roll-, Luft- und Übertragungswiderstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt ist.

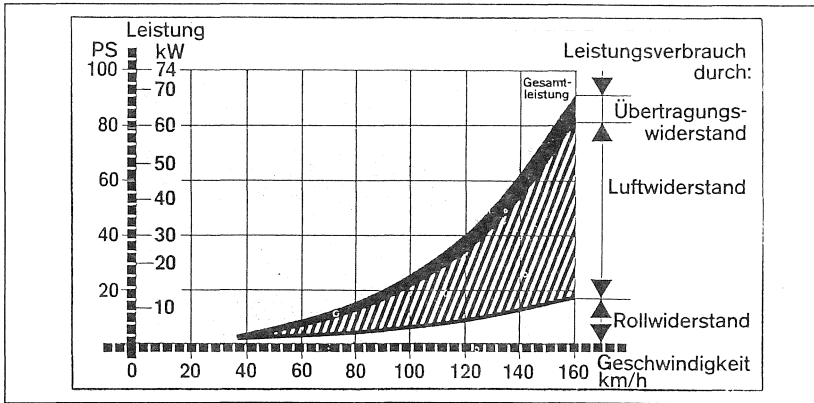


Abb. 8.4-1: Geschwindigkeitsabhängiger Leistungsverbrauch eines Pkw (1500 kg), Quelle: HÜTTEN, 1989

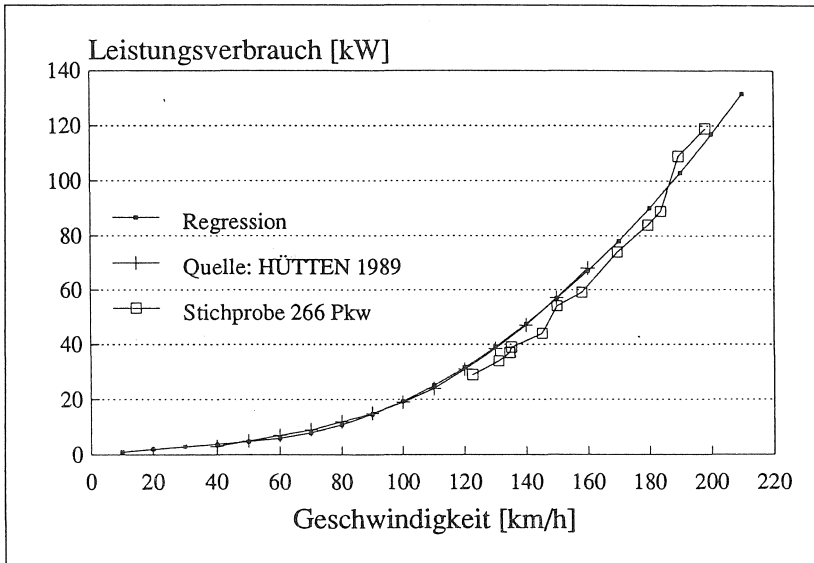


Abb. 8.4-2: Geschwindigkeitsabhängiger Leistungsverbrauch eines Pkw, Empirische Daten und Regression

Abbildung 8.4-2 zeigt die Daten aus Abbildung 8.4-1 zusammen mit der genannten, durch Regression nachgebildeten Funktion sowie Berech-

nungen auf der Grundlage der Stichprobe von 266 Pkw (AUTOZEITUNG, 1992). Diese Stichprobe bestand aus der Angabe von Maximalgeschwindigkeit, maximale Motorleistung und Masse für jedes Fahrzeug. Für zwölf Leistungsklassen wurden daraus mittlere Maximalgeschwindigkeiten berechnet. Diese wurden pauschal um 10 km/h reduziert, um zu realistischeren Maximalgeschwindigkeiten zu gelangen. Die daraus erhaltenen zwölf Wertepaare passen sich gut an die durch Regression ermittelte Funktion an.

8.5 Beispiel für einen Regelkatalog

[Kommentar]
Beispielkatalog

[Regel] [Wunschgeschwindigkeit erreichen 1]

B_v.Wunsch
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.Tempo_halten

[Regel] [Wunschgeschwindigkeit erreichen 2]

B_v.zu_niedrig
V_dx.sehr_weit
V_tk.negativ
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.starkBeschl

[Regel] [Wunschgeschwindigkeit erreichen 3]

B_v.zu_niedrig
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.leichtBeschl

[Regel] [Wunschgeschwindigkeit erreichen 4]

B_v.zu_hoch
B_v.Wunsch
B_v.zu_niedrig
----- OR_MaxMax 0.10 0.00
B_a.Tempo_halten

[Regel] [Wunschgeschwindigkeit erreichen 5]

B_v.zu_hoch
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.leichtVerz

[Regel] [Beschleunigen mit v und tk 1]

B_v.zu_niedrig
V_tk.n_lang
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.leichtBeschl

[Regel] [Beschleunigen mit v und tk 2]

B_v.zu_niedrig
V_tk.n_kurz
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.Beschl

[Regel] [Abstand regulieren 1]

V_dx.sehr_nah
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.Verz

[Regel] [Abstand regulieren 2]

V_dx.nah
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.leichtVerz

[Regel] [Kompensation Abstand bei neg Kollisionszeit 1]

V_dx.sehr_nah
B_v.zu_niedrig
V_tk.n_lang
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.leichtBeschl

[Regel] [Kompensation Abstand bei neg Kollisionszeit 2]

V_dx.nah
B_v.zu_niedrig
V_tk.n_lang
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.Beschl

[Regel] [Kompensation Abstand bei neg Kollisionszeit 3]

V_dx.nah
B_v.zu_niedrig
V_tk.n_kurz
----- AND_MaxMin 0.50 0.00
B_a.starkBeschl

[Regel] [Kompensation Abstand bei neg
Kollisionszeit 4]

V_dx.sehr_nah
B_v.zu_niedrig
V_tk.n_kurz
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.Beschl

[Regel] [tk 1]
V_tk.p_knapp
V_dtk.negativ
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.maxVerz

[Regel] [tk 2]
V_tk.p_kurz
V_dtk.negativ
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.starkVerz

[Regel] [tk 3]
V_tk.p_mittel
----- AND_MaxMin 0.60 0.00
B_a.leichtVerz

[Regel] [tk 4]
V_tk.p_kurz
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.Verz

[Regel] [tk 5]
V_tk.p_knapp
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.starkVerz

[Regel] [tk 6]
V_tk.p_sehr_knapp
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.maxVerz

[Regel] [k_dk 1]
V_k.mittel
V_dk.steigend
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.leichtVerz

[Regel] [k_dk 2]
V_k.mittel
V_dk.stark_steigend
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.Verz

[Regel] [k_dk 3]
V_k.hoch
V_dk.null
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.leichtVerz

[Regel] [k_dk 4]
V_k.hoch
V_dk.stark_steigend
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.starkVerz

[Regel] [k_dk 5]
V_k.hoch
V_dk.steigend
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_a.Verz

[Regel] [nach links 1]
B_v.zu_niedrig
V_dx.mittel
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_we.nach_links

[Regel] [nach links 2]
B_v.zu_niedrig
V_dx.nah
----- AND_MaxMin 1.00 0.00
B_we.nach_links

[Regel] [nach links 3, OR-Operator!]
HL_dx.zu_nah
VL_dx.zu_nah
----- OR_MaxMax 1.00 0.00
B_we.geradeaus

[Regel] [nach links 4, OR-Operator]
VL_tk.zu_kurz
HL_tk.zu_kurz
----- OR_MaxMax 1.00 0.00
B_we.geradeaus

[Regel] [nach links 5]
 V_tk.ok
 V_tk.zu_kurz
 V_tk.negativ
 ----- OR_MaxMax 0.05 0.00
 B_we.geradeaus

[Regel] [nach links 6]
 VL_tk.ok
 HL_tk.negativ
 V_tk.zu_kurz
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_links

[Regel] [nach links 7]
 VL_tk.negativ
 HL_tk.negativ
 V_tk.zu_kurz
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_links

[Regel] [nach links 8]
 VL_tk.negativ
 HL_tk.ok
 V_tk.zu_kurz
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_links

[Regel] [nach links 9]
 VL_tk.ok
 HL_tk.ok
 V_tk.zu_kurz
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_links

[Regel] [nach rechts 1, OR-Operator !]
 HR_tk.zu_kurz
 VR_tk.zu_kurz
 ----- OR_MaxMax 1.00 0.00
 B_we.geradeaus

[Regel] [nach rechts 2, OR-Operator !]
 HR_dx.zu_nah
 VR_dx.zu_nah
 ----- OR_MaxMax 1.00 0.00
 B_we.geradeaus

[Regel] [nach rechts 3]
 VR_tk.negativ
 HR_tk.ok
 V_tk.negativ
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_rechts

[Regel] [nach rechts 4]
 VR_tk.ok
 HR_tk.ok
 V_tk.negativ
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_rechts

[Regel] [nach rechts 5]
 VR_tk.ok
 HR_tk.negativ
 V_tk.negativ
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_rechts

[Regel] [nach rechts 6]
 VR_tk.negativ
 HR_tk.negativ
 V_tk.negativ
 ----- AND_MaxMin 1.00 0.00
 B_we.nach_rechts

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 VERKEHRSWESEN (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 Kleinkabinenbahnstationen
- 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 Parkstandwahl
- 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

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