

Stephan Schnittger
Einfluß von
Sicherheitsanforderungen
auf die Leistungsfähigkeit
von Schnellstraßen

INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN
UNIVERSITÄT (TH) KARLSRUHE
PROFESSOR DR.-ING. W. LEUTZBACH



Schriftenreihe Heft 45/91 ISSN 0341 - 5503

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

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Februar 1991

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Wiedemann

Korreferent: Univ.-Prof. Dr./UCB H. Keller

Vorwort

**Kraftfahrer sind ein Teil der Kraft,
Die Gutes will und Böses schafft.
Wir schwörn, zu fahren, jetzt und später,
Nie mehr als sechzig Kilometer,
Doch, statt wie wir uns vorgenommen,
schaun wir nur, daß wir weiter kommen,
Und lernen alsbald, nolens - volens,
Die heikle Kunst des Überholens.
(aus "Auto-Mobilmachung" von Eugen Roth)**

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Verkehrswesen.

Mein Dank gilt Herrn Prof. R. Wiedemann für die Betreuung und wichtigen Impulse für die Arbeit. Im gleichen Maße danke ich Herrn Prof. H. Keller für die Übernahme des Korreferats und für die konstruktive Kritik an der Arbeit, durch die die Verständlichkeit eine wesentliche Verbesserung erfahren hat. Herrn Prof. W. Leutzbach danke ich für den Freiraum und die freundliche Unterstützung, die diese Arbeit erst ermöglicht hat.

Dank an alle Kollegen zu sagen, ist bestimmt nicht ausreichend, denn das kollegiale Arbeitsklima ist mit verantwortlich für die schöpferischen Leistungen am Institut. Alle Kollegen haben die für einen Modellbilder notwendige Realitätsnähe immer wieder hergestellt und waren damit eine wichtige Hilfe ebenso wie die unermüdliche Hilfe von Gunter Hackenjos, der immer zur Stelle war, wenn näherrückende Termine verlängerte Arbeitszeiten unumgänglich erscheinen ließen. Ich bedanke mich auch bei Ulrich Schäfer, der durch seinen Fleiß die Anpassung an eine neue Rechnerumgebung beschleunigte. Ich möchte aber hier auch all jenen danken, die durch Kleinigkeiten zum Gelingen des Ganzen beigetragen haben.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern, die mir das Studium erst ermöglicht haben, und meiner Familie.

Kurzfassung

SCHNITTGER, STEPHAN:

Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen

121 Seiten, 46 Abbildungen, 10 Tabellen, Literaturverzeichnis, 26 Seiten Anhang

Die übliche Vorgehensweise, durch Messungen Grundlagen für die Planung von Straßen zu schaffen, schließt nicht faßbare Effekte (z.B. Risikoverhalten, Reaktionsvermögen der Fahrer) ein. Die vorliegende Arbeit versucht, den Verkehrsablauf und die möglichen Leistungsfähigkeiten bei mehrstreifigem Verkehrsfluß auf der Basis von Regeln für sicheres Fahren zu beschreiben.

Randbedingungen für das Modell sind verschiedene rechtliche Anforderungen an den Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Schnellstraßen. Als Grundlage dient ein mikroskopisches Fahrerverhaltensmodell, das durch seinen stochastischen Charakter tatsächlich zu messende Fahrvorgänge besonders gut nachbildet. Als Sicherheitsansatz wurde ein erweitertes relativ sicheres Abstandsverhalten gewählt, das für beliebige Fahrzeugcharakteristika gilt.

Das so formulierte Sicherheitsverhalten wurde als Automat nachgebildet, der parallel zum Fahrer agiert und dessen Fahrverhalten lediglich im Grenzbereich der Sicherheit einschränkt.

Eine vektorielle Betrachtungsweise der Fahrzeugbewegungen bildet auch sehr komplexe mehrstreifige Verkehrsabläufe korrekt nach.

Praktische Einsatzbereiche des Modells werden im Rahmen kollektiver und individueller Verkehrsbeeinflussungssysteme gesehen.

Summary

SCHNITTGER, STEPHAN:

Influence of safety requirements on traffic volume on motorways

121 pages, 46 figures, 10 tables, references, 26 pages annex

The use of measured databases for planning and designing roads includes unreachable effects (e.g. risk acceptance, reaction ability of drivers). The present paper is an attempt to describe the traffic flow and volume of multilane traffic based on rules for safe driving.

Requirements by law to traffic flow on multilane motorways are restrictive to the model. A microscopic model for driver following behaviour, which is most suitable with its stochastic character to reproduce measurable driving processes, is taken as a startpoint. An expanded relative safe distance behaviour for any kind of vehicle characteristics is chosen.

The outlined safety behaviour is realized as an automat acting parallel independent to the driver, only restricting his driving when he is close to the safety limit.

A vectorized definition of the vehicle movements models even very complex situations on multilane traffic.

Practical use of the model is given in the context of collective and individual traffic influence and information systems.

Résumé

SCHNITTGER, STEPHAN:

Influence des exigences de sécurité sur l'efficacité des routes à grandes circulations

121 pages, 46 figures, 10 tableaux, bibliographie, 26 pages en annexes

La méthode courante d'établir des bases pour la planification des routes à l'aide de métrages ne cerne pas les effets saisissables (p. ex. comportements en cas de risques, faculté de réactions du conducteur). Le présent travail tente de décrire le déroulement de la circulation ainsi que les capacités possibles de rendement sur des routes à grandes circulations, et ce sur la base de règles de conduite en sécurité.

Pour ce modèle, ce sont différentes exigences juridiques qui sont posées comme conditions marginales pour le déroulement de la circulation sur les routes à plusieurs voies et à grandes circulations. Un modèle microscopique de comportement de conducteur sert de base, et donne à travers son caractère stochastique une bonne image des procédés de conduire qui sont à mesurer. Comme ébauche pour la sécurité il a été choisi une distance de sécurité plus grande et relativement plus sûre, et qui est valable pour véhicules de tous genres.

Le comportement de sécurité ainsi défini a été reproduit comme un automate, qui agit de façon parallèle par rapport au conducteur, dont comportement pendant la conduite ne se réduit qu' à la zone limite de la sécurité. Une considération vectorielle de la circulation des véhicules donne également de façon correcte une bonne image des trafics très complexes sur routes à plusieurs voies.

Les domaines d'utilisation pratique du modèle seront étudiés dans le cadre de systèmes collectifs et individuels en matière de règlement de la circulation.

Resumen

SCHNITTGER, STEPHAN:

Capacidad vial en condiciones de circulación continua dependiendo de diferentes exigencias respecto a la seguridad

121 páginas, 46 ilustraciones, 10 tablas, índice de bibliografía, 26 páginas de anejos.

Habitualmente al planificar carreteras se utilizan datos recogidos por medio de aforos. En estos datos se reflejan sin embargo efectos que no son detectables (p.ej. comportamiento, aceptación de riesgo, capacidad de reacción de los conductores). La presente obra pretende modelar el tráfico y la capacidad de una vía de varios carriles basándose en una serie de reglas que definen un modo de conducir 'seguro'.

Diferentes aspectos legales con respecto a la seguridad vial en vías de varios carriles son condiciones de contorno para el modelo. El modelo es de carácter microscópico y se basa en el comportamiento de los conductores. Dado el carácter estocástico del modelo puede este formular correctamente las maniobras de conducción. El criterio de seguridad elegido es el de separación segura relativa ampliado y mejorado, que se puede utilizar para todo tipo de vehículos.

Una vez formulado este comportamiento seguro se incluyó en el modelo a modo de función automática que interviene apoyando al conductor en situaciones límites.

Gracias también a una representación vectorial de las trayectorias de los vehículos se pueden simular correctamente diferentes y complejas trayectorias en carreteras de varios carriles.

Los campos de aplicación del modelo en la práctica pueden ser en el marco de sistemas de control del tráfico tanto individuales como colectivos.

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Verkehrstechnische Grundlagen	3
2.1.1	Definition des Begriffs Leistungsfähigkeit	3
2.1.2	Anhaltspunkte zur Leistungsfähigkeit aus Richtlinien	4
2.1.3	Rechtsprechungen zum Fahrverhalten	6
2.1.4	Beispiele zur Leistungsfähigkeit in schienengebundenen Systemen	11
2.2	Modelltheoretische Grundlagen	11
2.2.1	Fahrzeugfolgenmodelle für den Individualverkehr	11
2.2.2	Fahrzeugfolgegleichungen	12
2.2.3	Wahrnehmungsbasiertes Folgeverhalten	15
2.2.4	Mikroskopische Verkehrsflußmodelle	19
2.2.5	Kolonnenverkehr und Pulkmodelle	21
3	Sicherheitsansatz für den Fahrablauf	24
3.1	Kinematische Abstandsmodelle	24
3.1.1	Absolute Sicherheit	28
3.1.2	Allgemein relative Sicherheit	28
3.1.3	Bedingt relative Sicherheit	29
3.1.4	Nähere Betrachtung der allgemein relativen Sicherheit	30
3.2	Sicherheitsansatz für den Folgevorgang	36
3.2.1	Voraussetzungen	37
3.2.2	Herleitung der notwendigen Bedingungen für die verschiedenen Zeitintervalle	38
3.2.3	Resultierende Definitionsbereiche für die Reaktionszeit	42
3.2.4	Ergebnis	43
3.3	Sicherheitsansatz für mehrstreifigen Verkehrsablauf	43
3.3.1	Übertragung auf die Fahrzeugkolonne	44
3.3.2	Bedingung für den Fahrstreifenwechsel	44

4	Modell des sicheren Verkehrsablaufs	47
4.1	Folgeverhalten der Fahrer-Fahrzeug-Einheit	47
4.1.1	Vorüberlegungen	47
4.1.2	Interaktionsbereiche	49
4.1.3	Verhaltensstrategie der Fahrer- Fahrzeug- Einheit .	51
4.1.4	Beschleunigungs- und Bremsverhalten	53
4.2	Modell des Fahrstreifenwechsels	57
4.2.1	Allgemeine Überlegungen	57
4.2.2	Entscheidungsstruktur für Fahrstreifenwechsel . .	59
4.2.3	Ablauf des Fahrstreifenwechselvorgangs	61
4.2.4	Aktionsabfolge zur Prüfung von Fahrstreifenwechseln	63
4.2.5	Algorithmen zur Überprüfung der Nachbarfahrzeuge	65
4.3	Gesamtüberblick über das Simulationssystem	68
4.4	Zur Problematik der Abbildung kontinuierlicher Vorgänge	71
4.4.1	Prozeß- oder ereignisorientierte Simulation	72
4.4.2	Zeitdiskrete Betrachtung	75
5	Vorgehensweise zur Simulation des sicheren Verkehrsablaufs	78
5.1	Umfang und Zielsetzung der Simulationen	78
5.1.1	Bestimmung der Einflußgrößen - Variablen	79
5.1.2	Durchführungskonzept	80
5.2	Eingabedaten - Datengrundmenge	82
5.3	Fahrzeugerzeugung	84
5.3.1	Einsetzen der Fahrzeuge	85
5.4	Erfassung des simulierten Verkehrsablaufs	86

6	Simulationsergebnisse	90
6.1	Auswertung der Ergebnisse ohne kapazitiven Engpaß	90
6.1.1	Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit	90
6.1.2	Auswirkung der Variablen auf die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsablaufs	94
6.1.3	Interpretation der Einzelergebnisse	95
6.1.4	Herleitung eines algebraischen Zusammenhangs zwischen der mittleren Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke	96
6.1.5	Einfluß des Bremsvermögens	100
6.2	Einfluß des Lkw - Anteils	101
6.3	Engpaßsituationen	103
6.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse	107
6.4.1	Vergleich mit empirischen Daten	107
6.4.2	Berechnung der Leistungsfähigkeit unter Sicher- heitsanforderungen mit einem deterministischen Folgemodell	111
7	Zusammenfassung und Interpretation	114
7.1	Vorgehen	114
7.2	Ergebnis	115
7.2.1	Auswirkungen auf den Verkehrsablauf	115
7.2.2	Leistungsfähigkeit	116
7.2.3	Resümee	117
7.3	Anwendungsmöglichkeiten	119
7.3.1	Gegenüberstellung von Simulation und realem Ver- kehrsablauf	119
7.3.2	Ausblick	119
8	Literatur	122

A	Anhang	128
A-1	Auswertung der einzelnen Simulationsergebnisse	128
A-1-1	Beispiele für v-q-Diagramme der Simulationen . . .	129
A-1-2	Statistik der eingespeisten Wunschgeschwindigkeiten	130
A-1-3	Analyse der Startwerte der Geradenparameter . . .	132
A-1-4	Ableitung eines Zusammenhangs zwischen dem Gleichungsfaktor und dem <i>SdVw</i> - Wert	135
A-2	Anwendung eines Stabilitätsverfahrens	137
A-3	Simulationsumgebung	138
A-3-1	Programmauszug zur Bestimmung des Interaktionspartners	141
A-3-2	Programmauszug zur Interaktionsberechnung . . .	144
A-4	Die Sprachgrammatik	149
A-5	Beispiel für eine Eingabedatei	151

1 Einleitung

In der Praxis wird sich ein Planer nach festgelegten Vorgaben, wie z.B. der Richtlinie zur Anlage von Straßen - Teil Querschnitte (RAS-Q) oder dem Highway Capacity Manual (HCM) richten, um sicherzustellen, daß bei einer bestimmten Bemessungsverkehrsstärke eine dem Straßentyp entsprechende Bemessungsgeschwindigkeit erreicht wird, bzw. daß bei einer vorgegebenen Bemessungsgeschwindigkeit die Bemessungsverkehrsstärke unterhalb der zulässigen Maximalverkehrsstärke liegt. Diese zulässige maximale Verkehrsstärke hängt von diversen Einflußgrößen ab und wird in ihrer quantitativen Dimension in der RAS-Q aufgrund umfangreicher Verkehrsablaufmessungen festgelegt.

Die Problematik der Dimensionierung anhand empirischer Messungen liegt in Belastungsschwankungen und in einem nicht meßtechnisch erfassbaren Sicherheitsempfinden der jeweiligen Verkehrsteilnehmer. Die Schwankungen würden sich zwar durch Dauermessungen verringern lassen, die zweite Komponente hingegen ist praktisch nicht faßbar.

Das Ziel dieser Arbeit ist darum die Entwicklung eines Leistungsfähigkeitsansatzes unter Berücksichtigung allgemein anerkannter Sicherheitsanforderungen, wie sie beispielsweise aus der Straßenverkehrsordnung (StVO) und geltender Rechtsprechung hervorgehen. Bei schienengebundenen Verkehrsmitteln finden sich entsprechende Vorbilder für solche Leistungsfähigkeitsbetrachtungen. Es wird ein Modell entwickelt, das in jeder Situation bestimmten Sicherheitsanforderungen genügt. Die eingehende Untersuchung von reinen Pkw-Verkehrsabläufen ohne kapazitive Engpässe führt zu umfangreichem Datenmaterial, das den zu erwartenden Verkehrsablauf und die Leistungsfähigkeit unter sicheren Verkehrsbedingungen verdeutlicht. Ergänzt wird die Betrachtung durch vereinfachte Betrachtungen von kapazitiven Engpässen und Lkw-Anteilen.

In Kapitel 2 werden kurz Richtlinien vorgestellt, rechtliche Randbedingungen angesprochen, und es wird ein Überblick über bestehende Modelle und Simulationsumgebungen gegeben.

In Kapitel 3 werden die Sicherheitsbedingungen definiert, es werden Grenzwert- und Stabilitätsbetrachtungen für diese Bedingungen durchgeführt, und es wird untersucht, unter welchen Randbedingungen ein Übergang zu Kolonnenbildung und mehrstreifigem Verkehrsablauf möglich ist.

Während sich Kapitel 3 mit grundsätzlichen, mathematisch behandelbaren Vorstellungen und Randbedingungen beschäftigt, wird in Kapitel 4 der für diese Untersuchung gewählte Ansatz, die eigentliche Modellbildung beschrieben. Es werden Entscheidungskriterien für die gewählte Simula-

tionstechnik, die Verhaltensbestimmung der einzelnen sogenannten Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) und die Strategie zur Simulation des Verkehrsablaufs aufgezeigt. Daran anschließend werden die wesentlichen Kernstücke des Modells näher erläutert.

Kapitel 5 beschreibt die Vorgehensweise bei der Simulation des Verkehrsablaufs. Es werden hier Variablen definiert, deren Einfluß auf die Leistungsfähigkeit zu bestimmen ist und diesen Größen Werte oder Wertebereiche zugeordnet.

Kapitel 6 stellt die Ergebnisse zusammenfassend dar. Die wesentlichen Resultate der sich auf die Bereiche:

- Verkehrsablauf auf Richtungsfahrbahnen ohne kapazitiven Engpaß bei reinem Pkw-Verkehr,
- Einfluß von Lkw-Anteilen und
- Auswirkungen von Engpässen

beschränkenden Untersuchung werden in einer übersichtlichen Form präsentiert.

Kapitel 7 enthält die Zusammenfassung der Ergebnisse und das Resümee der Arbeit. Im Anhang werden typische Auswertungen beispielhaft aufgezeigt und durchgeführte Rechenschritte protokolliert. Den Abschluß bildet eine kurze Zusammenfassung des Simulationssystems mit einer Kurzbeschreibung, der Auflistung der Befehle zur Dateneingabe und -manipulation und einem Beispieldatensatz. Auszugsweise wurden elementare Algorithmen des Programms wiedergegeben.

2 Grundlagen

Es sind folgende Begriffe zu unterscheiden:

- Kapazität oder Leistungsfähigkeit
- Verkehrsstärke

LEUTZBACH (1988) definiert als Kapazität eines Verkehrsweges die Anzahl der Fahrzeuge, die einen Querschnitt in einem bestimmten Zeitabschnitt durchfährt. Voraussetzung hierfür ist die vorhandene Leistungsfähigkeit. Die theoretische Kapazität ließe sich erreichen, wenn ein größtmöglicher Fahrzeugstrom den Verkehrsweg zu allen Zeiteinheiten auslasten würde. Die Verkehrsstärke hingegen ist eine qualitäts- und quantitätsneutrale Maßeinheit für den Durchsatz allgemein.

Das Highway Capacity Manual (HCM, 1985) verwendet äquivalent die Begriffe „capacity“, „service flow rates“ und „flow“. Die Definition der Kapazität entspricht der oben genannten. Der Begriff „service flow rates“ wird als maximal mögliche Verkehrsstärke innerhalb eines festen zeitlichen Bezugsintervalls bei gleichem „level of service“ (siehe unten) definiert.

Zusammenfassend kann man deswegen die Leistungsfähigkeit etwas allgemeiner als eine obere Grenze des Erreichbaren unter gegebenen Bedingungen bezeichnen.

2.1 Verkehrstechnische Grundlagen

2.1.1 Definition des Begriffs Leistungsfähigkeit

Im HCM (1985) wird unterschieden zwischen dem Begriff capacity und dem sogenannten Level of Service.

Unter „capacity“ wird die maximale Anzahl von Fahrzeugen verstanden, die an einem Querschnitt in einem bestimmten Zeitintervall ¹ gemessen werden können. Dieser Wert wird dann auf die Bezugsinheit „Stunde“ umgerechnet. Einfluß hierauf haben die vorherrschenden Verkehrszustände und eine eventuelle Verkehrsbeeinflussung. Es werden ebenfalls nahezu ideale Wetter- und Straßenverhältnisse vorausgesetzt.

Die vorherrschenden Verkehrszustände werden vom HCM in die angesprochenen Level of Services (LOS) unterteilt. Sie definieren die qualitativ möglichen Verkehrszustände einer Straße. Mit dem LOS wird die Wirkung von

¹Das HCM gibt eine Intervallgröße von 15 Minuten an.

Faktoren wie Geschwindigkeit, Reisezeit, Überholmöglichkeit, Verkehrsstörungen, Sicherheit, Fahrkomfort und Betriebskosten berücksichtigt. Unterschieden werden sechs Levels, die durch die Buchstaben A (freie Verkehrsbedingungen) bis F (gebundener Verkehrsfluß im Bereich niedriger Geschwindigkeiten) gekennzeichnet sind. Detaillierte, insbesondere quantitative Angaben zur Verkehrsleistungsfähigkeit kann man aus verschiedenen Quellen beziehen: Da sind zum einen die empirisch untermauerten Angaben in den RAS-Q sowie Werte aus entsprechenden Werken anderer Länder. Auf der anderen Seite existieren auch ergänzende und erläuternde Hinweise von juristischer Seite zu Problemen und Streitigkeiten bezüglich Verkehrssituationen, die direkten oder indirekten Einfluß auf die Leistungsfähigkeit nehmen können.

HEIDEMANN (1989) stellt ein anderes Verfahren zur Bewertung der Leistungsfähigkeit vor. Ausgehend von den typisierten, auf Stundenwerten basierenden Dauerlinien für Richtungsfahrbahnen führt er aus, daß die Leistungsfähigkeit durch die maximale stündliche Verkehrsstärke, die im stochastischen Mittel erreicht wird, bestimmt ist. Wesentlicher Punkt bei dieser Betrachtungsweise ist die Tatsache, daß er nicht von einzelnen, extremen Meßwerten ausgeht, sondern von den sich einstellenden mittleren Höchstwerten. Auf diese Weise kommt er auf einen Wert von 3800 Fz/h für eine zweistreifige BAB-Richtungsfahrbahn.

2.1.2 Anhaltspunkte zur Leistungsfähigkeit aus Richtlinien

Wie eingangs erwähnt, legen empirische Untersuchungen Richtwerte für Verkehrsleistungen auf bestimmten Straßentypen fest. Derartige Maßangaben finden sich in Richtlinien wie der deutschen RAS-Q oder dem amerikanischen HCM. In aller Regel werden konkrete Grenzwertangaben vermieden, dafür finden sich von Anwendung zu Anwendung verschiedene Anhaltswerte, d.h., für unterschiedliche Planungsaufgaben spezielle Richtwerte.

Die RAS-Q macht detaillierte Leistungsfähigkeitsangaben in Abhängigkeit von der Steigungsklasse, der Kurvigkeit und dem Anteil des Schwerverkehrs. Zum Vergleich dieser Angaben mit denen des HCM wurden in Tabelle 1 Leistungsfähigkeitsangaben aus der RAS-Q zusammengestellt. Die Zusammenstellung beschränkt sich auf Schnellstraßen mit zwei Fahrstreifen. Der Wert zur Leistungsfähigkeit ist ohne eine Größe des Bezugsintervalls angegeben.

Im HCM wird auf Autobahnen von einer maximalen Verkehrsstärke von ca. 2000 Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen als Richtwert ausgegangen.

Entwurfsgeschwindigkeit [km/h]	\bar{v} [km/h]	Leistungsfähigkeit [Fz/h]
100 - 120	110	1800
100 - 120	90	2400
90 - 100	90	2200
90 - 100	70	2600

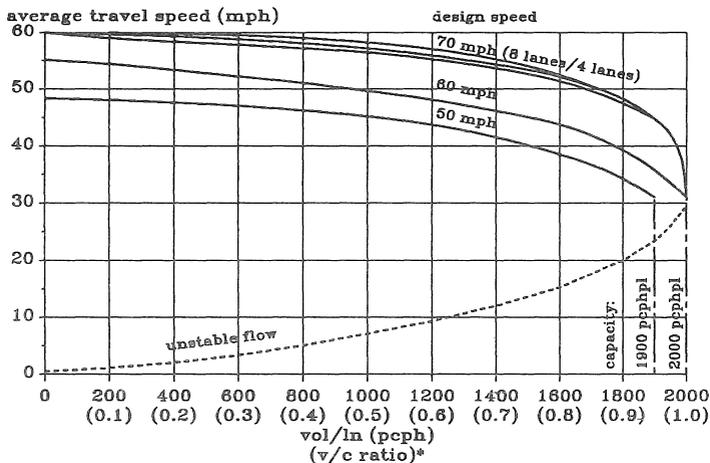
Tab. 1: Leistungsfähigkeitsangaben aus der RAS - Q, auszugsweise zusammengestellt für zweistreifige Schnellstraßen.

Entwurfsgeschwindigkeit [mph]	\bar{v} [km/h]	Leistungsfähigkeit [Fz/h]
70	90	1400
70	80	1700
70	55	2000
60	80	1000
60	60	1750
60	50	2000
50	50	1900

Tab. 2: Zusammenstellung von Grenzleistungswerten unter Einbeziehung der Entwurfsgeschwindigkeiten und Umrechnung der Fahrgeschwindigkeiten in Kilometer. Die Angaben gelten für einen Fahrstreifen. Quelle: HCM, 1985.

Es wird aber auch darauf hingewiesen, daß vereinzelt bei Messungen erheblich höhere Verkehrsstärkewerte gemessen wurden (bis zu 2907 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen, hochgerechnet aus 15 - Minuten - Werten). Diese Verkehrsleistungen werden als hoch instabil bezeichnet, d.h., daß geringste Störungen des Verkehrsflusses zu Staubildung führen. Abbildung 1 zeigt die Grenzen des Geschwindigkeits - Verkehrsstärke - Zusammenhangs unter idealen Bedingungen für verschiedene Entwurfsgeschwindigkeiten aus dem HCM.

In Abbildung 2 ist ein typisches Diagramm aus der RAS-Q wiedergegeben, das den Zusammenhang der Verkehrsstärke und der mittleren Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schwerverkehranteil für einen Schnellstraßenquerschnitt mit einer Bemessungsgeschwindigkeit von 100 - 120



* v/c ratio based on 2000 pcphpl valid only for 60 and 70 mph design speeds

Abb. 1: Geschwindigkeits - Verkehrsleistungs - Grenzen für Autobahnen unter idealen Bedingungen mit Entwurfsgeschwindigkeiten als Parameter. Quelle: HCM 1985.

km/h zeigt. Als Querschnittstyp wurde hier a4ms angegeben. Es handelt sich demnach um eine 4-streifige, durch Mittelstreifen getrennte Richtungsfahrbahn mit einer Fahrstreifenbreite von 3,75 m.

Im Gegensatz zum HCM sieht die RAS-Q die Angaben eher als Empfehlung an den Planer, nach denen er sich richten soll, damit der Verkehrsablauf eine gute Verkehrsqualität erreicht, während das HCM Grenzwerte aufzeigt.

2.1.3 Rechtsprechungen zum Fahrverhalten

Im Verkehr treten immer öfter Situationen auf, durch die es zu gerichtlichen Auseinandersetzungen kommt. In der Regel geschieht dies, wenn es zu Behinderungen anderer Fahrzeuge, zu Verstößen gegen Gebote oder gar zu Fahrnfällen kommt.

Aus Standardwerken für Verkehrsjuristen (CRAMER, BERZ, GONTARD, 1986 und JAGUSCH, HENTSCHEL, 1986) wurden deswegen einige Punkte herausgegriffen, die u.U. für eine Modellbildung relevant sein könnten. Die beiden Werke enthalten Sachverständigen-Gutachten und Urteile

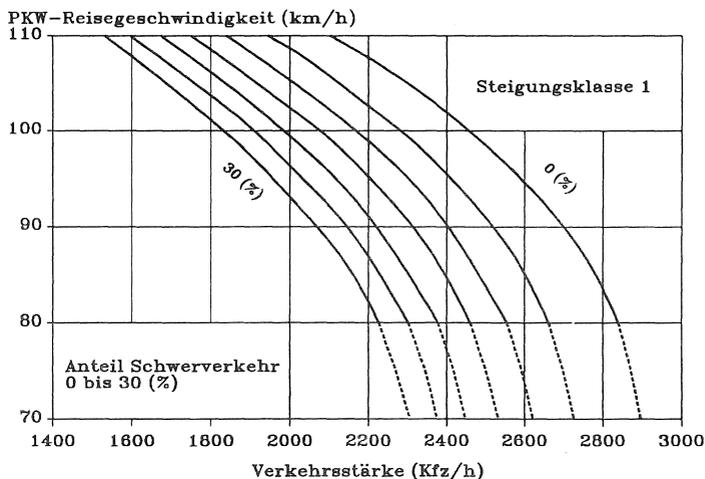


Abb. 2: Reisegeschwindigkeits - Leistungsfähigkeits - Diagramm aus der RAS - Q mit den Randbedingungen: Schwerverkehrsanteil, Steigungsklasse 1, a4ms.

von Verkehrsgerichten. Das Augenmerk wurde bei der Durchsicht auf die Punkte Geschwindigkeit Abstand und Überholen gelegt.

Die einzelnen Aussagen sind nachfolgend in Form von Punkten aufgeführt und teilweise mit ergänzenden Bemerkungen versehen.

Geschwindigkeit

- Die größte Fahrstreifenleistungsfähigkeit bei dichtem Verkehr und richtigem Abstand (siehe dazu Punkt „Abstand“) erhält man nach diesen Rechtsbeispielen bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 50 und 60 km/h. Diese Leistungsfähigkeit soll mit höheren oder niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten sinken.
- Über Überholgeschwindigkeiten wird nur gesagt, daß sie optimal hoch sein sollen, wobei die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten jedoch niemals überschritten werden dürfen.
Diese hier zusammengefaßt wiedergegebenen Aussagen lassen dem Fahrer einen Handlungsspielraum offen, der es ermöglicht, selbst zu entscheiden, wann er die Höchstgeschwindigkeit für angemessen hält und um wieviel höher die Überholgeschwindigkeit gegenüber dem Überhol-

ten zu sein hat.

- Die Geschwindigkeit soll darüber hinaus so gewählt werden, daß der Fahrer innerhalb der übersehbaren Strecke anhalten kann, auf schmalen Fahrbahnen und bei möglicher Gefährdung anderer schon auf der Hälfte der übersehbaren Strecke. Unter widrigen und / oder subjektiv ungünstigen Umständen (die z.B. vom Straßenausbau, von der Straßendecke, Straßenführung, Fahrbahnbreite, Witterung, Beleuchtung, Verkehrslage, dem Fahrzeugzustand und der Fahrfähigkeit des Fahrers abhängig sein können) ist die Geschwindigkeit nochmals so zu drosseln, daß der Bremsweg unterhalb dieser halben Sichtweite bleibt. Für diese Anforderungen werden ebenfalls keine konkreten Zahlen angegeben, da sie nach diesen Ausführungen nicht in Zahlen ausgedrückt werden können. Mit der Aussage, innerhalb der überschaubaren Strecke anhalten zu können, ist der Abstand zum Vordermann gemeint bzw. die tatsächlich aufgrund der Sichtbedingungen überschaubare Strecke.
- Bei Nässe, Feuchtigkeit, Glätte und Dunkelheit sind erhebliche Geschwindigkeiten bei gut geführter, breiter Strecke mit guter Fahrbahndecke erlaubt, sofern der Bremsweg innerhalb der Sichtweite bleibt. Es sind keine Angaben gemacht worden, was unter dem Begriff „erhebliche Geschwindigkeit“ zu verstehen ist. Diese Regelungen gelten im wesentlichen für Bundesautobahnen und ähnlich trassierte Schnellstraßen.
- Vor einem nicht einsehbaren Engpaß sind 60 km/h zu schnell. Beim Überholen einer stehenden Fahrzeugschlange in einem Bereich freigelassener Lücken sind 25 km/h unter Umständen zu schnell. Der Fahrzeugführer muß also im gegebenen Fall damit rechnen, daß Fahrzeuge plötzlich ausscheren. Eine völlige Blendung bei Dunkelheit beispielsweise kann vorübergehendes, totales Anhalten erfordern.
- Überholt werden darf nur ohne eine Überschreitung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. Als Ausnahme gilt es, wenn die Geschwindigkeitsüberschreitung als einziges Gefahrenabwehrmittel anzusehen ist.
- Wird ein zulässigerweise sehr schnell fahrender Kraftfahrer auf der BAB durch eine Geschwindigkeitsbegrenzung überrascht, trifft ihn nicht unbedingt ein Vorwurf, wenn er erst dann verlangsamt wie vorgeschrieben, da eine Vollbremsung in dieser Situation nicht zumutbar ist. Als Beispiel wird eine Reduzierung von 200 km/h auf 100 km/h innerhalb einer Strecke von 270 m genannt.
- Psychologische Untersuchungen zeigen, daß die Kraftfahrer angepaßte Geschwindigkeitsbegrenzungen zu beachten pflegen, unangebrachte (wirkliche oder scheinbare) jedoch nicht.
- Befährt ein Autofahrer die Bundesautobahn, ohne einem nachfolgenden, der rechtmäßig ein höheres Tempo fahren will, die Möglichkeit

zum Überholen zu geben, dann gilt dieses Verhalten als ordnungswidrig.

Abstand

- Die vom Bayerischen Oberlandesgericht geprägte Formel, daß der Abstand diejenige Strecke übersteigen müsse, die in einer Sekunde zurückgelegt werde, eignet sich nur als Faustregel. Das gilt auch für die Empfehlung der Fachliteratur und eines Zivilsenats des Bundesgerichtshofes, auf halbem Tachometerabstand zu fahren (Bei einer Geschwindigkeit von 100km/h errechnet sich nach dieser Empfehlung ein Abstand von 50 m, bei dem 1 - Sekunden - Abstand ~ 28 m).
- Als Sicherheitsabstand wird diejenige Strecke bezeichnet, die innerhalb von 1,5 Sekunden unter normalen Verhältnissen durchfahren wird. Bei Nässe gilt diese zeitliche Grenze als Minimalwert.
- Als gefährdender Abstand wird eine Zeitlücke von 0,8 Sekunden und weniger bezeichnet (CRAMER, BERZ, GONTARD, 1986).

Überholen

Regeln für den Überholvorgang können in folgende Bereiche untergliedert werden:

• Rechtsüberholen:

Es gilt als zulässig, wenn jemand auf einem BAB - Fahrstreifen gleich schnell weiterfährt, obwohl auf dem Überholstreifen ein Fahrzeug, das ihn überholt hatte, mangels Motorkraft wieder zurückfällt. Nach dieser Definition kann dies aber auch bedeuten, daß ein Fahrzeug, das sich auf dem Überholstreifen befindet und eine nur unwesentlich höhere Geschwindigkeit hatte als der Überholte, möglicherweise noch weiter die Geschwindigkeit erhöhen muß, um nicht wieder rechts überholt zu werden. Auch darf ein Kraftfahrer auf dem freien rechten Fahrstreifen der BAB vorsichtig und mit geringer Mehrgeschwindigkeit an einer auf dem Überholstreifen stockenden Kolonne vorbeifahren.

• Fahrstreifenfahren:

Die Straßenverkehrsordnung (StVO) lehnt das amerikanische stay-in-lane-Prinzip außerorts für europäische Verhältnisse als zu gefährlich ab. Bei drei Fahrstreifen auf einer Richtungsfahrbahn darf der mittlere Fahrstreifen durchgängig befahren werden, soweit auch nur hin und wieder rechts davon ein Fahrzeug hält oder fährt. Bei vier gleichgerichteten Fahrstreifen darf analog nach der StVO der zweite von rechts

durchgängig befahren werden. Auch auf einer BAB mit drei gleichgerichteten Fahrstreifen ist nach dem Überholen wieder auf den mittleren einzuscheren, bei Verkehrsstille auf den rechten. Was unter dem Begriff „Verkehrsstille“ zu verstehen ist, wird nicht näher erläutert.

Einzelne Überholvorgänge oder Vorbeifahrten sollen nicht zum Fahren gestreckter Schlangenlinien zwingen. Diese Aussage erlaubt ein zeitweiliges Beharren auf einem einmal angenommenen Fahrstreifen, selbst wenn die Einscherabstände Fahrstreifenwechsel zulassen würden. Die Länge der Strecke, auf der kein Fahrzeug den rechten Fahrstreifen befährt, ist dabei allein nicht entscheidend; vielmehr kommt es auf die Dauer des möglichen Fahrens auf dem rechten Fahrstreifen an. Die wiederum ist von den gefahrenen Geschwindigkeiten und dem fahrerischen Empfinden abhängig.

Ist auf einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn (BAB) der rechte Fahrstreifen geschwindigkeitsbeschränkt, so können Verkehrsteilnehmer den mittleren Fahrstreifen durchgängig benutzen, wenn sie schneller fahren dürfen.

- Linksüberholen:

Beabsichtigen auf einer dreistreifigen Fahrbahn zwei Kraftfahrzeuge jeweils von rechts und von links her auf den mittleren Fahrstreifen zu wechseln, so muß dem Kraftfahrzeug mit deutlichem Vorsprung der Vortritt gelassen werden. Dies bedeutet in der Praxis, daß es keine Regelung gibt, wenn zwei Fahrzeuge gleichauf sind. Es kann aber - in Verbindung mit oben Genanntem - auch heißen, daß das Fahrzeug auf dem Überholstreifen so lange dort bleiben muß, bis ein genügend großer Abstand zum rechten Fahrzeug hergestellt ist.

Das Rechtsfahrgebot schreibt ein Einscheren nach dem Überholen erst dann vor, wenn die zeitliche Verweildauer in der Lücke mindestens 10 Sekunden bei beibehaltener Fahrgeschwindigkeit beträgt. Als zusätzlicher Hinweis ist noch vermerkt, daß die Einscherregel strenge Beachtung verdient, weil ihre korrekte Befolgung vorbildlich wirkt und sperrendes Linksfahren bei den hohen BAB - Fahrgeschwindigkeiten gefährliche Aggressionen auslösen und zum verbotenen Rechtsüberholen verleiten kann.

Sind die Bedingungen zum Rechtseinscheren nach dem Überholen erfüllt, so gilt: Übersteigt die Überholgeschwindigkeit diejenige des Überholten erheblich und ist die Lücke ausreichend, so muß der Überholer alsbald nach Erreichen des Sicherheitsabstandes zum Überholten nach rechts einscheren.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß sich teilweise Aussagen finden,

die sich widersprüchlich anhören. Ihre Bedeutung muß stark situationsbedingt gesehen werden.

2.1.4 Beispiele zur Leistungsfähigkeit in schienengebundenen Systemen

Mögliche Ausprägungen der makroskopischen Beschreibungsgrößen des Verkehrsablaufs unter Sicherheitsanforderungen wurden bereits in diversen anderen Arbeiten untersucht. Derartige Anforderungen gelten z. B. seit längerem für schienengebundene Systeme. Es existieren aber auch Abschätzungen der Leistungsfähigkeit durch Berechnungen unter der vereinfachenden Annahme stationärer Verhältnisse. Eine sehr umfangreiche Untersuchung über Nahverkehrstechniken wurde von der Studiengesellschaft Nahverkehr (SNV, 1974) durchgeführt. Dort wurden Leistungsfähigkeitsbetrachtungen schienengebundener Nahverkehrsfahrzeuge ebenfalls auf der Basis kinematischer Sicherheitsanforderungen untersucht. Die Studie basiert darauf, daß gleiche Geschwindigkeit für alle Kolonnenfahrzeuge angenommen worden ist. Es wird darauf hingewiesen, daß das Problem der Kolonnenstabilität bei geringen Geschwindigkeitsschwankungen nicht untersucht worden ist.

Es wird ein Faktor B als Verhältnis b_{max}/b_{min} definiert, wobei b_{max} das maximal mögliche und b_{min} das minimal geforderte Bremsvermögen sind. Die Betriebsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der die Strecke im Betrieb befahren wird.

Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Betriebsgeschwindigkeit für verschiedene Fahrzeugauslegungen (SNV, 1974). Die Abbildung spiegelt in etwa die Verhältnisse bei Kleinkabinebahnen wieder. Dem Diagramm liegt ein angenommener Bruttoabstand von 2,3 m, eine Reaktionsverzögerung von $\tau = 0,1$ s und eine Mindestbremsverzögerung von $b_{min} = 2,5$ m/s² zugrunde.

2.2 Modelltheoretische Grundlagen

2.2.1 Fahrzeugfolgemodelle für den Individualverkehr

Zur fahrzeugfeinen und somit mikroskopischen Simulation des Verkehrsablaufs ist es notwendig, ein Beschreibungsmodell für das Folge- und Fahrverhalten eines Fahrzeugs zur Verfügung zu haben. Die existierenden Modelle können in zwei Arten unterteilt werden:

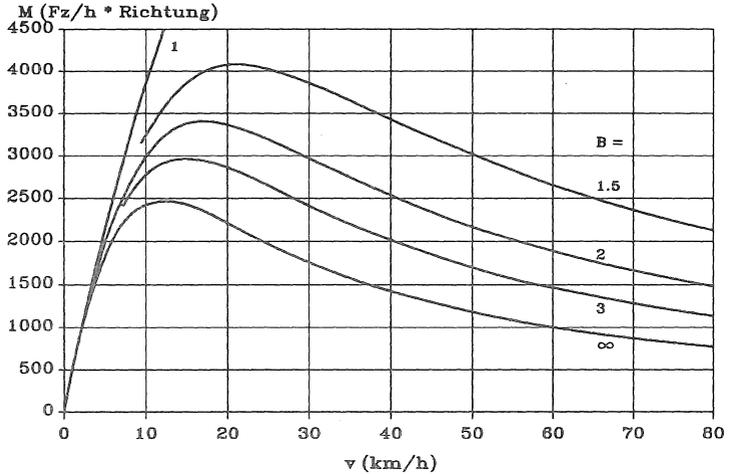


Abb. 3: Theoretische Streckenleistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Betriebsgeschwindigkeit für unterschiedliche Fahrzeugauslegungen (Kleinkabinenbahnen).

1. kontinuierliche Fahrzeugfolgegleichungen und
2. bereichsabhängige, d.h, vom Folgezustand des Fahrzeugs abhängige Bewegungsgleichungen.

2.2.2 Fahrzeugfolgegleichungen

Die Modellvorstellungen eines Fahrzeugfolgevorgangs reichen von relativ einfachen bis hin zu komplexen, im allgemeinen nicht geschlossen weiterverarbeitbaren Abstands- bzw. Folgemodellen. Allen angegebenen Formeln ist gemeinsam, daß durch den Index i das betrachtete Fahrzeug gemeint ist und das Führungsfahrzeug den Index $i-1$ hat.

Das erste realisierte Modell mit deterministischem Charakter wurde von REUSCHEL (1950) vorgestellt. Seine Folgegleichung basierte auf der Annahme, daß ein Fahrer seine Geschwindigkeit proportional dem Nettoabstand zum Vordermann anzupassen versucht.

$$kv_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t) - L$$

Hierin ist L die Länge des vorderen Fahrzeugs und k eine Konstante. Dieser Ansatz erwies sich als zu einfach, um das tatsächliche Folgeverhalten eines Fahrzeugs nachzubilden. Die nachfolgenden Modellvorschläge versuchten, das Beschleunigungsverhalten zu beschreiben. WHITE (1957) stellte eine Gleichung vor, die die Beschleunigung des Folgefahrzeugs proportional zum Abstand der Fahrzeuge berechnet.

$$b_n(t) = \lambda(x_{n-1}(t) - x_n(t) - kv_n(t))$$

Neben der Konstanten k wird hier erstmalig eine Sensitivitätskonstante λ eingeführt, durch die eine unterschiedliche Verhaltensweise von Fahrern realisiert werden kann. Das Modell zeigte ebenso wie ein anderes, von CHANDLER, HERMAN und MONTRÖLL (1958) vorgestelltes, individuelles Bruttoabstandsmodell Unzulänglichkeiten bei der Nachbildung des Folgeverhaltens. Diese letzten Autoren erweiterten ihr Modell daraufhin um eine Reaktionsverzögerung τ , mit der ein Fahrer auf einwirkende Reize reagiert.

$$b_n(t + \tau) = \lambda(v_{n-1}(t) - v_n(t))$$

Diese Gleichung erzielte zu ihrer Zeit die besten Resultate im Vergleich zu gemessenen Werten. Durch die Einführung nichtlinearer Folgegleichungen verbesserte sich die Realitätsnähe der Ergebnisse nochmals. GAZIS, HERMAN und POTTS (1959) stellten die nichtlineare Gleichung

$$b_n(t + \tau) = \lambda \frac{v_{n-1}(t) - v_n(t)}{x_{n-1}(t) - x_n(t)}$$

vor. EDIE (1961) baute darauf auf und stellte eine modifizierte Version vor. Er bezog neben den momentanen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs nach Ablauf der Fahrerreaktionszeit mit ein und quadrierte den Abstand im Nenner.

$$b_n(t + \tau) = \lambda v_n(t + \tau) \frac{v_{n-1}(t) - v_n(t)}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^2}$$

Das schließlich bis heute anerkannte deterministische Fahrzeugfolgemodell resultiert aus den Arbeiten von GAZIS, HERMAN und ROTHERY (1961). Die Beschleunigung des Folgefahrzeugs zum Zeitpunkt $t + \tau$ ist abhängig

von der erreichten Eigengeschwindigkeit, der Relativgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen zum momentanen Zeitpunkt und dem momentanen Abstand der Fahrzeuge.

$$b_n(t + \tau) = \frac{\lambda_{l,m} (v_n(t + \tau))^m (v_{n-1}(t) - v_n(t))}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^l} \quad (1)$$

Die Exponentialparameter m und l bestimmen die Einflüsse der Eigengeschwindigkeit und des Abstandes. $\lambda_{l,m}$ ist ein Proportionalitätsfaktor.

HOEFS (1972) legte wohl eine der umfangreichsten empirischen Untersuchungen zur Überprüfung der Fahrzeugfolgegleichung 1 für deutsche Verhältnisse vor. Mit einer photogrammetrischen Meßeinrichtung ermittelte er die Abhängigkeit der Parameter l und m von der Art des Folgevorgangs. Er bestimmte vier optimale $l - m$ - Kombinationen:

Fall	l	m
alle Fahrvorgänge	1,1	0,4
Öffnungsvorgänge	0,5	0,2
Schließvorgänge	1,5	0,4
Bremsvorgänge des Führungsfahrzeuges	2,5	0,4

GIPPS (1980) stellte eine Variante der Fahrzeugfolgegleichung 1 vor:

$$b_n(t + \tau) = \iota \frac{|v_{n-1}(t) - v_n(t)|^m}{[x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1}]^p} \text{sign}(v_{n-1}(t) - v_n(t)) \quad (2)$$

Auch in dieser Gleichung ist mit τ die Reaktionszeit des Folgefahrzeugs gemeint, $x_n(t)$ bestimmt den Ort des Fahrzeugs zum Zeitpunkt t , $v_n(t)$ die Geschwindigkeit dieses Fahrzeugs zu diesem Zeitpunkt, S_{n-1} ist die effektive Länge des Führungsfahrzeugs und $b_n(t + \tau)$ ist die Beschleunigung des Folgefahrzeugs nach Ablauf der Reaktionszeit. Die Parameter ι , m und p müssen jeweils durch Messung bestimmt werden.

Ein Vergleich mit der Gleichung 1 zeigt, daß der wesentliche Unterschied der beiden Betrachtungsweisen in der Verwendung des Absolutwertes v_n nach Ablauf der Reaktionszeit τ in Gleichung 1 zusammen mit der Verwendung des Exponenten m und der Verwendung der Differenz der momentanen Geschwindigkeiten in der Gleichung 2 liegen.

2.2.3 Wahrnehmungsbasiertes Folgeverhalten

Einen anderen Ansatz verfolgte WIEDEMANN (1974). Er entwarf ein nichtstetiges Modell für den Folgevorgang, das er anhand eines Simulationssystems für den einstreifigen Verkehr, also bei Überholmöglichkeit, validierte. Das Modell basiert auf Wahrnehmungsschranken und Sensitivitätsbereichen eines Fahrers.

WIEDEMANN zog für sein Modell die Fähigkeiten und Eigenschaften eines Fahrers und des Fahrzeugs in einer Einheit zusammen. Er bezeichnete es als Fahrer-Fahrzeug-Element (FFE). Die Berechnung des gewünschten Folgeverhaltens wird von einem sogenannten Interaktionsteil und die Ausführung der Bewegung von einem getrennten Bewegungsteil ausgeführt. Die Interaktion kann als Fahrerteil des FFE und die Bewegung als Fahrzeugteil charakterisiert werden.

Jedes FFE verfügt über einen Satz Kenngrößen, die sein Fahrverhalten beeinflussen. Diese Kenngrößen bestehen aus:

- der (μ, σ) - normalverteilten Wunschgeschwindigkeit, die Fahrerwünsche, Fahrvermögen, Streckencharakteristika und geltende Rechtsvorschriften (z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeit) impliziert
- einer $(0.5, 0.15)$ - normalverteilten Größe, die dem unterschiedlichen Sicherheitsbedürfnis der Fahrer Rechnung trägt
- einer $(0.5, 0.15)$ - normalverteilten Größe, die unterschiedliche Wahrnehmungs- und Schätzvermögen berücksichtigt
- einer $(0.5, 0.15)$ - normalverteilten Größe zur Beschreibung der Brems- und Beschleunigungsvorgänge
- einer $(0.5, 0.15)$ - normalverteilten Größe, mit der die untersten Schwellenwerte einer noch möglichen Kontrolle des Gaspedals zum Ausdruck gebracht werden sollen

Mit den damit definierten Verteilungen lassen sich individuelle Reaktionen eines FFE auf bestimmte Reize hin realisieren. Auslöser dieser Aktionen sind jedoch Wahrnehmungsschwellen, die sich in einem Δx - Δv -Diagramm (Abbildung 4) gut erklären lassen. In Abbildung 4 werden die folgenden Schwellenwerte definiert (die indizierten k sind Faktoren, die abhängig vom Fahrverhalten zu kalibrieren sind):

AX:

Vom FFE gewünschter Bruttoabstand beim Stillstand

$$AX = L + k_1 + k_2 Z_1,$$

mit der Fahrzeuglänge L des vorausfahrenden Fahrzeuges und der $(0.5,$

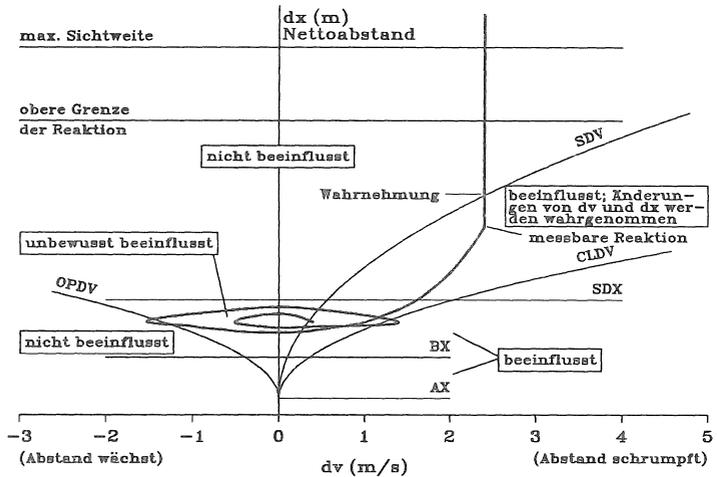


Abb. 4: Wahrnehmungsschwellen im Δ -x- Δ -v-Diagramm.
Quelle: WIEDEMANN, 1974

0.15) - normalverteilten Größe Z_1 , mit der der Schwankungsbereich des gewünschten Sicherheitsabstandes durch die Parameter k_1 und k_2 in Meter festgelegt werden kann.

BX:

Der vom Fahrer gewünschte minimale Folgeabstand (Bruttoabstand) bei etwa gleicher Geschwindigkeit wie das vorausfahrende Fahrzeug. Dieser Abstand wird so berechnet, daß ein parabolischer Zusammenhang zwischen dem Abstand und der Geschwindigkeit gilt, womit das nichtlineare Abstandsverhalten bei höheren Geschwindigkeiten berücksichtigt wird.

$$BX = AX + (k_3 + k_4 Z_1) \sqrt{v}$$

Für den Fall des abnehmenden Abstandes soll die Geschwindigkeit des Vordermannes, für den Fall des zunehmenden Abstandes die eigene Geschwindigkeit relevant sein.

SDV:

Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei großen Abständen. Nach MICHAELS (1965) und HOEFS (1972) liegt dieser Wert bei $k_5 \cdot \sqrt{\Delta v}$ und $k_6 \cdot \sqrt{\Delta v}$. Diese Größe wird durch

$$SDV = \left(\frac{\Delta x - AX}{CX} \right)^2 \quad \text{mit} \quad CX = k_5 \cdot (1 + Z_1 + Z_2)$$

berechnet. Z_2 ist ebenfalls (0.5, 0.15) - normalverteilt.

SDX:

bildet eine obere Grenze beim Abdriften während des Folgevorgangs. Nach TODOSIEV (1963) und HOEFS (1972) liegt sie im Bereich des 1.5-fachen bis 2.5-fachen des Abstandes BX. Da sie auch bei ein und demselben Fahrer über der Zeit schwanken kann, wird hier zur Beschreibung eine weitere Größe NZ eingeführt, die ebenfalls (0.5, 0.15) - normalverteilt ist. Damit ergibt sich

$$SDX = AX + EX \cdot (BX - AX),$$

mit der Hilfsgröße:

$$EX = 2 - Z_2 + NZ.$$

CLDV:

ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen, abnehmenden Abständen. Nach TODOSIEV und HOEFS liegt sie bei etwa dem 4-fachen von SDV. Da die Schwelle schief normalverteilt ist und bei CLDV die gleichen Bedingungen gelten wie für SDV, kann man mit

$$CLDV = SDV \cdot EX^2$$

diese Größe beschreiben. Die Schiefe wird durch das Quadrat von EX realisiert.

OPDV:

ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen, zunehmenden Abständen. Da der Schwankungsbereich der Werte noch größer ist als bei CLDV, muß man hier mit dem 1-fachen bis zum 3-fachen Betrag von CLDV rechnen.

$$OPDV = CLDV \cdot (-1 - 2 \cdot NZ)$$

WIEDEMANN stellte damit das Ablaufdiagramm in Abbildung 5 für den Folgevorgang vor. Die einzelnen Prozeduren BREMSAX, BREMSBX, FOLGEN und WUNSCH realisieren den Interaktionsprozeß, der im wesentlichen die gewünschte Beschleunigung zum Ergebnis hat. Mit dieser Größe wird anschließend die Bewegung an sich berechnet. WIEDEMANN definiert die Funktionsweise der einzelnen Prozeduren wie folgt:

WUNSCH	für unbeeinflusstes Fahren
FOLGEN	für unbewußt beeinflusstes Fahren
BREMSBX	für bewußt beeinflusstes Fahren
BREMSAX	für das Abwenden einer Gefahrensituation

Die Prozedur WUNSCH steht für das unbeeinflusste Fahren. Das FFE ist durch kein anderes FFE in seiner Fahrweise beeinflusst und wählt sowohl

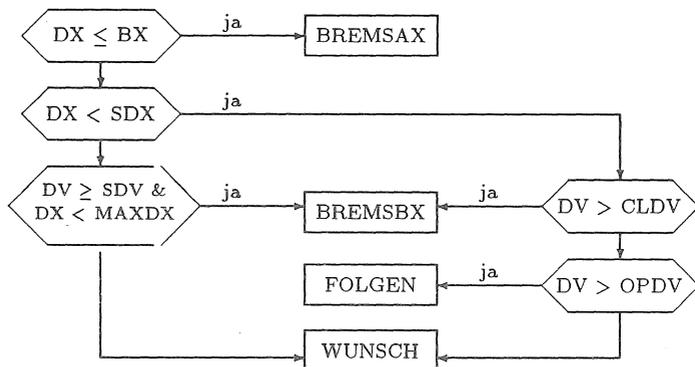


Abb. 5: Ablaufdiagramm für den Folgevorgang. Quelle: WIEDEMANN, 1974

seinen Fahrstreifen als auch seine Geschwindigkeit nach eigenen Vorstellungen bzw. anhand rechtlicher Vorgaben oder Einschränkungen. Das FFE wird nach dieser Fahrvorschrift mit mehr oder weniger großen Ausschlägen um seine Wunschgeschwindigkeit pendeln, äquivalent zur Fähigkeit eines Fahrers, eine Geschwindigkeit konstant einzuhalten. Die Prozedur FOLGEN realisiert das unbewußt beeinflusste Fahren. Ein FFE folgt einem vorausfahrenden FFE mit einer Geschwindigkeitsdifferenz, die zu gering ist, um aktive Brems- bzw. Beschleunigungsmanöver einzuleiten. Das FFE vollführt im Rahmen dieses Folgevorgangs ebenfalls Pendelmanöver um die gewünschte Folgegeschwindigkeit, die sich in einem wechselnden Abdriften und Annähern äußert (siehe auch HOEFS, 1972, bzw. Abbildung 4). Die Prozedur BREMSBX zwingt das FFE dazu, seine Geschwindigkeit aktiv zu reduzieren. Das FFE ist bewußt durch das vorausfahrende FFE beeinflusst. Es findet ein Annäherungsvorgang mit positiver Geschwindigkeitsdifferenz (Geschwindigkeit des annähernden FFE abzüglich der des vorausfahrenden) und kleiner werdenden Abständen statt. Das FFE fühlt sich in dieser Situation durch das vorausfahrende behindert. In der Prozedur BREMSAX wird die Bremsaktion verschärft. Das sich annähernde FFE hat einen so großen Geschwindigkeitsüberschuß oder einen so kleinen Abstand, daß es mit einer Gefahrenbremsung reagiert. Reicht der verbleibende Abstand für eine Geschwindigkeitsreduktion nicht mehr aus, so führt dies zu einer Unfallbehandlung durch das Simulationssystem.

In der bei WIEDEMANN angewandten zeitorientierten Simulationstechnik werden alle FFE in einem festen Zeittakt (1 s) folgendermaßen behandelt: Für alle FFE wird ihr Fahrverhalten aufgrund der kinematischen Konstellationen und anhand ihrer Wunschvorstellungen für den nächsten Zeitschritt festgelegt. Unter Fahrverhalten wird die Geschwindigkeit, die das FFE wählen kann oder muß, verstanden. Anschließend werden alle FFE bewegt, d.h., daß hier die Bewegung im kinematischen Sinne durchgeführt wird. Damit existieren zwei Schritte, die in jedem Zeitschritt für alle Fahrzeuge nacheinander durchgeführt werden müssen:

- Berechnung des Interaktionsverhaltens und
- kinematisches Bewegen der Fahrzeuge

Die Erzeugung der FFE erfolgt im Verlauf der Simulation an einem vorgegebenen bestimmten Querschnitt (Anfangsquerschnitt, auch als Quelle bezeichnet) anhand einer Verteilungsfunktion für die Zwischenzeiten. Für den einstreifigen Verkehr liegen für Zwischenzeiten ausführliche Untersuchungen vor (z.B. SCHUHL 1955, CHIMINI und DAWSON 1968). Die Erzeugung eines FFE geht so vor sich, daß mit Hilfe eines (0,1)-Zufallszahlengenerators aus der gegebenen Zeitlückenverteilung eine Zwischenzeit ermittelt wird, nach deren Ablauf ein neues FFE in den simulierten Streckenabschnitt eingesetzt wird.

2.2.4 Mikroskopische Verkehrsflußmodelle

Die vorgestellten Fahrzeugfolgemodelle können nur Kern eines Simulationssystems sein, mit dessen Hilfe der Verkehrsfluß auf Streckenabschnitten unter einer Bandbreite unterschiedlicher Bedingungen untersucht werden kann.

Im Laufe der Zeit wurden eine Vielzahl mikroskopischer Modelle zur Nachbildung von Verkehrsabläufen erstellt. Übersichten findet man z.B. bei GIBSON/ROSS (1977), STEGEMANN (1979), LEICHTER (1981) und WIEDEMANN / HUBSCHNEIDER (1987). Allen Modellen gemeinsam ist, daß sie für spezielle Fragestellungen entwickelt worden und in aller Regel auf die vorhandene Rechenanlage zugeschnitten sind.

Mit dem Modell NETSIM/UTSC (WORRAL/LIEBERMAN, 1974) können Stadtstraßennetze in der Größenordnung bis zu 100 Knoten simuliert werden. Es basiert auf der Fahrzeugfolgegleichung nach GAZIS, HERMAN, ROTHERY (Gleichung 1), das durch Modelle des Pulk- und Abbiegeverhaltens ergänzt worden ist. Das Verhalten der Einzelfahrzeuge ist, so weit es möglich war, vereinfacht worden, um die angestrebten großen Netze

bearbeiten zu können. So ist z.B. das Beschleunigungsverhalten oder das Verhalten auf der freien Strecke fest vorgegeben. Es besteht keine Möglichkeit, das Verhalten einzelner Fahrzeuge direkt zu beeinflussen.

Das Modell MULTSIM (GIPPS, 1980) baut auf der Folgegleichung 2 auf. Es ist dahingehend modifiziert worden, daß es sichere Folgegeschwindigkeiten unter Berücksichtigung vorausfahrender Fahrzeuge, Lichtsignalanlagen und fester Hindernisse gibt. Das Modell ist nicht in der Lage, den Einfluß von Fahrzeugen in der näheren Umgebung des betrachteten in dessen Fahrentscheidungen einzubeziehen, und es ist strikt auf den Fahrstreifen fixiert.

Das Modell MISSION (Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Oeffentlichen Personennahverkehr, HUBSCHNEIDER, 1983) baut auf dem bereichsorientierten Verhaltensmodell nach WIEDEMANN (1974) auf. Es handelt sich um ein modulares Programmsystem, mit dessen Hilfe eine freie Konfiguration des Eingabedatensatzes für spezielle Fragestellungen einfach zu realisieren ist. Das System ist in Modellbereiche gegliedert, deren Auftrennung sich an vernünftigen und zusammengehörenden Funktionen orientiert. Es verfolgt das Konzept des modularen Aufbaus (siehe GOOS, 1982). Auszugsweise ist der Anwendungsbereich „Richtungsfahrbahn“ aus den drei möglichen Bereichen „Richtungsfahrbahn“, „Stadtverkehr“ und „Stadtverkehr mit ÖV“ herausgenommen und in tabellarischer Form wiedergegeben.

Funktion	Möglichkeiten
Streckenbeschreibung	Freie Strecke, Fahrstreifenaddition, Fahrstreifensubtraktion
Erzeugung von Verkehrsströmen	Zeitlückenverteilung am Streckenanfang
Entscheidungen	Wunschgeschwindigkeitsänderungen
Verhaltensmodell	hohe Geschwindigkeiten, Rechtsfahrgebot
lokale Fahrzeugfassung	Querschnittsmessungen
Datenerfassung	Fahrzeugein- / -ausfahrt, Fahrzeugpositionen und -zustände

Das System stellt demnach für die Simulation von unterschiedlichen Verkehrsabläufen eine Umgebung zur Verfügung, die den Anforderungen zur flexiblen Handhabbarkeit verschiedener Eingabevarianten genügt. So existiert ein Baustein „Streckenbeschreibung“, der die Aufgabe hat, das zu

simulierende reale Straßennetz modellrelevant zu kodieren. Diese Kodierung geschieht durch Unterteilung in Elemente mit gleichen Charakteristika (z.B. Anzahl Fahrstreifen, Steigung), die dann zu dem gewünschten Netzausschnitt zusammengesetzt werden. Für den Übergang zwischen den im einzelnen homogenen Netzteilen stellt das System spezielle Funktionen zur Verfügung.

2.2.5 Kolonnenverkehr und Pulkmodelle

Ein weiterer wichtiger Teilbereich eines gezeigten Simulationsmodells muß spezielle Probleme des Kolonnenverkehrs berücksichtigen. Auf dem Gebiet des Abstandsverhaltens, besonders innerhalb von Fahrzeugpulk- oder Fahrzeugkolonnen, gibt es zahlreiche Veröffentlichungen. Hierunter finden sich einige, die sich auch mit dem Fahrverhalten unter sicherheitsrelevanten Aspekten befassen. Alle bisher hierzu bekannten Arbeiten behandeln jedoch die sich aus der mikroskopischen Bewegung der Fahrzeugkolonne ergebende makroskopische Verkehrsleistung nur für den einstreifigen Planfall.

KÖHLER (1974) betrachtete den Fahrzeugpulk unter dem Gesichtspunkt eines Regelkreises. Er untersuchte die Auswirkungen von dynamischen Schwankungen in dem System „Pulk“ mit den Komponenten „Fahrer-Fahrzeug“ und der Störgröße „Geschwindigkeitspendeln des Führungsfahrzeugs“. Auch er verwendete für die Berechnung der Bewegung der Folgefahrzeuge die Gleichung von GAZIS, HERMAN und ROTHERY (Gleichung 1).

Er wies in einem ersten Schritt mit der einfachsten Kombination der Parameter ($l = 0, m = 0$) auf analytischem Wege die Grenzfälle und Bedingungen auf, unter denen ein stabiles bzw. instabiles Folgeverhalten eines Einzelfahrzeugs resultiert. Daraus resultieren folgende Bereiche für die Parameterkombinationen $\lambda_{0,0} * \tau$, wobei unter Amplitude der Ausschlag der Geschwindigkeitsganglinie verstanden wird.

- $\lambda_{0,0} * \tau > \frac{\pi}{2}$: Der Folgevorgang ist mit diesen Parameterkombinationen instabil. Die Amplitude des Folgefahrzeugs wächst unbegrenzt an, wenn durch das Führungsfahrzeug eine Störung ausgelöst wird, indem es z.B. mit einer Geschwindigkeitsganglinie zu fahren anfängt, die einer harmonischen Schwingung entspricht.
- $\lambda_{0,0} * \tau = \frac{\pi}{2}$: Grenzfall zwischen Stabilität und Instabilität der Geschwindigkeitsganglinie einzelner Fahrzeuge.
- $\frac{1}{e} < \lambda_{0,0} * \tau < \frac{\pi}{2}$: Die Amplitude des Folgevorgangs kann zwar größer sein als die Amplitude des Führungsfahrzeugs, wächst jedoch mit der

Zeit nicht an.

- $\lambda_{0,0} * \tau \leq \frac{1}{2}$: Die Amplitude der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs ist kleiner als die des Führungsfahrzeugs. Auch bei einer Sprungfunktion als Störung treten keine Überschwinger auf.

Die Untersuchung auf Kolonnenstabilität mit dieser einfachen l, m -Kombination führte zu der Lösung, daß gerade bei $\lambda_{0,0} * \tau = 0,5$ der Grenzfall für die Kolonnenstabilität für alle Störfunktionen erreicht ist. Mit $\lambda_{0,0} * \tau > 0,5$ wachsen die Amplituden von Fahrzeug zu Fahrzeug an und mit $\lambda_{0,0} * \tau < 0,5$ nehmen die Amplituden ab. Eine wesentliche Aussage der Arbeit von KÖHLER stellt die Schlußfolgerung über die Stabilitätskriterien für das untersuchte Fahrzeugfolgemodell dar. Die Stabilität ist nur von den Parametern $\lambda_{0,0}$ und τ abhängig und nicht von der Amplitude oder der Frequenz der Störfunktion und damit nicht von der Höhe des Geschwindigkeitsniveaus, auf dem sich der Folgevorgang abspielt.

Beobachtungen von HOEFS (1972) und von MAY, KELLER (1967, bzw. 1969) zeigen, daß in der Realität andere Parameterkombinationen gemessen werden. KÖHLER selbst stellte auch fest, daß sich aus der untersuchten Parameterkombination l und $m = 0$ keine wirklichkeitsgetreue makroskopische Beziehung herleiten läßt. Er untersuchte daher auch andere Parameterkombinationen auf numerischem Wege.

Um eine Abschätzung der zu erwartenden Leistungsfähigkeit unter Verwendung des KÖHLER'schen Berechnungsverfahrens geben zu können, wurde das in ALGOL geschriebene Programm umgesetzt und nachprogrammiert. Mit den von KÖHLER verwendeten Startwerten wurden Fundamentaldiagramme (siehe LEUTZBACH, 1988) berechnet. Die Beschreibung des Programms, die Startwerte und beispielhafte Ergebnisse sind im Anhang zu finden. Es bleibt grundsätzlich zu überprüfen, ob eine derartige Vorgehensweise zur Berechnung der Leistungsfähigkeit zulässig ist.

In HOEFS (1972) findet sich eine übersichtliche Zusammenstellung von makroskopischen Gleichungen und Randbedingungen, die aus der Fahrzeugfolgegleichung nach GAZIS, HERMAN und ROTHERY herleitbar sind.

$l < 1, m < 1$ ($m < l$)	$q = \bar{v}_{m,opt} \left(\frac{1-m}{1-l} \right)^{\frac{1}{1-m}} k \left[\frac{k_{max}^{1-l}}{k} - 1 \right]^{\frac{1}{1-m}}$ $\lambda_{l,m} = \frac{1-m}{1-l} (\bar{v}_{m,opt})^{1-m} (k_{max})^{1-l}$
$l=1,$ $m < 1$	$q = \bar{v}_{m,opt} (1-m)^{\frac{1}{1-m}} k \left[\ln \frac{k_{max}}{k} \right]^{\frac{1}{1-m}}$ $\lambda_{l,m} = \bar{v}_{m,opt}^{1-m}$
$l > 1,$ $m < 1$	$q = \bar{v}_{m,w} k \left[1 - \frac{k}{k_{max}} \right]^{1-l}$ $\lambda_{l,m} = \frac{l-1}{1-m} \frac{\bar{v}_{m,w}^{1-m}}{k_{max}^{l-1}}$
$l > 1,$ $m=1$	$q = \bar{v}_{m,w} k e^{-\frac{1}{l-1} \left[\frac{k}{k_{opt}} \right]^{\frac{1}{m-1}}}$ $\lambda_{l,m} = \frac{1}{k_{opt}^{l-1}}$
$l > 1, m > 1$ ($m < l$)	$q = \bar{v}_{m,w} k \left[1 + \frac{m-1}{l-m} \frac{k}{k_{opt}} \right]^{l-1}$ $\lambda_{l,m} = \frac{l-1}{1-m} \frac{1}{\bar{v}_{m,w}^{m-1} k_{opt}^{l-1}}$

3 Sicherheitsansatz für den Fahrablauf

Sicherheit im kinematischen Sinne kann in vielfältiger Weise definiert werden, kommt es hier doch stark auf die Zielsetzungen und die Randbedingungen der Betrachtung an. In dieser Arbeit soll die Sicherheit jedoch immer in Bewegungsrichtung definiert sein: Es soll sich um eine „kinematische Sicherheit“ handeln, die darauf abzielt, zu verhindern, daß das betrachtete Fahrzeug aus seiner Bewegung heraus mit einem anderen Fahrzeug kollidiert. Fahrerische Aspekte (insbesondere psychologische) bleiben hier unberücksichtigt (eine kurze Betrachtung hierzu folgt in Kapitel 4). Die Herleitung der notwendigen Formeln geschieht zunächst unter der Annahme, daß sich die kritischen Situationen durch eine Bremsung bis zum Stillstand einstellen.

Aus der Bewegung eines Fahrzeugs heraus wird der Bremsvorgang zwei einander folgender Fahrzeuge betrachtet. Während bei der Herleitung noch übliche Bezeichnungen für den Weg (x), die Geschwindigkeit (v) und die Beschleunigung (b) verwendet werden, wird später bei der Erweiterung der Definitionen zu einer Unterscheidung von zeitveränderlichen (Zeit t) und zeitunveränderlichen Größen übergegangen.

3.1 Kinematische Abstandsmodelle

Die kinematische Bewegung eines Fahrzeugs kann man als zeitliche Ortsveränderung beschreiben. Die Veränderung ist abhängig von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Fahrzeugs.

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t v(t) dt \quad \text{mit} \quad v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t b(t) dt. \quad (3)$$

$b(t)$ könnte ebenfalls von der Zeit abhängig sein, indem man z.B. eine Größe k definiert, die die Änderung der Beschleunigung (den Ruck) beschreibt. Zur Vereinfachung der Beschreibung des zeitlichen Verlaufs wird $b(t)$ abschnittsweise konstant angenommen. Damit können die Bereichsgrenzen so gewählt werden, daß über ein konstantes b integriert werden kann. Da die Stetigkeit des Weges gilt, lassen sich die somit bereichsweise berechneten Wegstrecken additiv zusammensetzen. Aus (3) wird:

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t v_0 dt + \iint_{t_0}^t b dt^2 \quad (4)$$

Betrachtet man nun einen Bremsvorgang, der als Reaktion auf ein Ereignis folgt, so werden die Bereiche, in die sich dieser Vorgang gliedert, wie folgt aufgeteilt (unter der Bedingung, daß das betrachtete Fahrzeug bisher $v = \text{const}$ fährt) :

1. Fahrt mit unveränderter Geschwindigkeit über eine als Verlustzeit, Totzeit oder Reaktionszeit bestimmte Zeit τ .
2. Erreichen der vollen Bremswirkung.

In LEUTZBACH (1972) wird eine Auswirkzeit Δt_a definiert, die vom Auftreten eines Hindernisses bis zum Beginn des Bremsvorgangs vergeht. Diese Auswirkzeit setzt sich aus der Wahrnehmungszeit, der Zeit, die der Fahrer für die Reaktion benötigt, der Zeit für einen evtl. Pedalwechsel und der Zeit für den Pedaldurchtritt zusammen. Die Verlustdauer, die im weiteren als Reaktionszeit bezeichnet wird, entspricht der Zeitspanne, die vom Beginn der Wahrnehmung bis zum Erreichen der gewünschten Bremswirkung vergeht.

Geht man zudem zu einer bestimmten Betrachtungsweise über mit einem Ursprung $x_0, t_0 = 0$ der Raum-Zeit-Ebene, der sich auf das Folgefahrgewerk bezieht, so erhält man unter Berücksichtigung des Anteils der Konstantfahrt über τ

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v_0 dt + \iint_{\tau}^t b dt^2. \quad (5)$$

Da v_0 und b in den Integrationsgrenzen konstant sein sollen, ergibt die abschnittsweise Integration:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} b (t - \tau)^2 \quad (6)$$

Das Ereignis, auf das das Fahrzeug reagiert, soll nun der Bremsvorgang eines vorausfahrenden Fahrzeugs sein. Es wird angenommen, daß dieses Fahrzeug zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ mit seinem maximalen Bremsvermögen übergangslos zu verzögern beginnt. Die beiden Fahrzeuge werden entgegen der Fahrtrichtung indiziert. Das vordere erhält den Index 1 und das folgende den Index 2. Damit kommt das Fahrzeug 1 am Ort x'_1 zum Stillstand (Das Schema des Vorgangs zeigt Abbildung 6.).

$$x'_1 = x_{10} + v_{10} t_1 - \frac{1}{2} b_1 t_1^2 \quad (7)$$

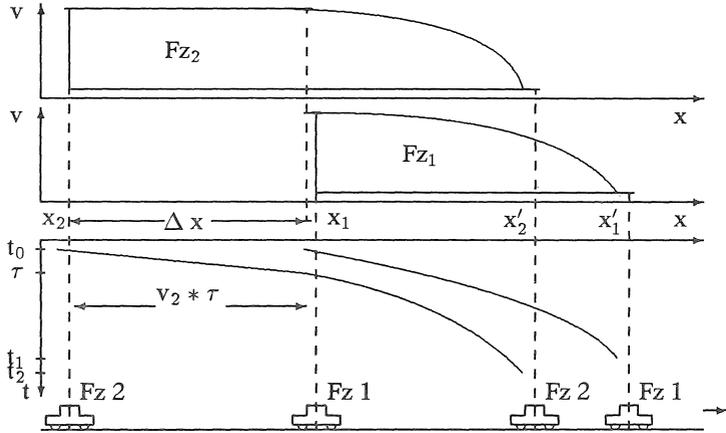


Abb. 6: Schematische Darstellung der Ausgangssituation für die kinematische Betrachtung des relativ sicheren Abstandes zweier Fahrzeuge

Da sich die Betrachtung relativ auf das Fahrzeug 2 bezieht ($x_{20} = 0$), kommt beim Fahrzeug 1 der Abstand zum Fahrzeug 2 hinzu. Um die relative Beziehung zum Ausdruck zu bringen, wird x_{10} durch den Ausdruck Δx ersetzt. t_1 ist der Zeitpunkt, zu dem das Fahrzeug 1 zum Halten kommt, b_1 der Betrag der maximalen Verzögerung und v_{10} ist die Ausgangsgeschwindigkeit. Nach der Verlustzeit τ reagiert Fahrzeug 2 ebenfalls mit maximalem Bremseneinsatz. Es folgt:

$$x'_2 = v_{20}\tau + v_{20}(t_2 - \tau) - \frac{1}{2}b_1(t_2 - \tau)^2 \quad (8)$$

Der Fahrer 2 wird auch im Stillstand einen Sicherheitsabstand zum Vordermann einhalten wollen. Die x -Koordinate soll in der Fahrzeugmitte gemessen werden, wodurch sich ein Faktor $c = s + 0,5 \cdot (l_1 + l_2)$ ergibt, der sich aus Sicherheitsabstand s und jeweils halber Wagenlänge zusammensetzt.

Beide Fahrzeuge bremsen bis zum Stillstand, deswegen kann man den Zeitpunkt, zu dem sie jeweils zum Stehen kommen, durch $v = bt$ bestimmen. Im Stillstand soll sich $c = x'_1 - x'_2$ ergeben. Mit

$$\begin{aligned}
 t_2 - \tau &= \frac{v_{20}}{b_2} & \text{und } t_1 &= \frac{v_{10}}{b_1} \\
 \text{folgt} & & c &= \frac{v_2^2}{2b_1} + \Delta x - v_2\tau - \frac{v_2^2}{2b_2}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Der Abstand, den das Fahrzeug zum Zeitpunkt t_0 (zeitlicher Ausgangspunkt der Betrachtung) haben muß, um dem oben genannten Anspruch zu genügen, ist damit durch

$$\Delta x = v_2\tau + \frac{v_2^2}{2b_2} - \frac{v_1^2}{2b_1} + c
 \tag{10}$$

berechenbar (vergl. auch Gleichung 17).

Die verwendeten Begriffe müssen exakter definiert bzw. untergliedert werden. Für eine allgemein gültige Anwendung der Formel 10 empfiehlt sich der Übergang zur Indizierung mit i , bzw. $i-1$. Dies ist problemlos möglich, da keine einschränkenden Annahmen gemacht wurden, die nicht generell für alle betrachteten Fahrzeuge gelten können. Es ist darüber hinaus festzulegen, um welches Δx und um welches c es sich handelt, schließlich werden sich für jedes zu betrachtende Fahrzeugpaar andere Werte ergeben.

Es wird definiert, daß Δx und c zu dem betrachteten Fahrzeug (Index i) gehören sollen. Ebenso muß der Faktor τ sich auf das betrachtete Fahrzeug beziehen, da in der Regel andere Fahrzeuge mit anderen Verlustzeiten charakterisiert werden müssen.

Die momentanen Geschwindigkeiten für den Betrachtungszeitpunkt (t_0) wurden mit v_1 bzw. v_2 angegeben. Da diese Werte jedoch Funktionen der Zeit sind und es andererseits Faktoren gibt, die zeitlich unabhängig sein sollen (z.B. das maximale Bremsvermögen), müssen diese unterscheidbar sein. Die zeitabhängigen Größen werden im weiteren mit

- Weg x und Abstand Δx
- Geschwindigkeit \dot{x}
- Beschleunigung \ddot{x}

bezeichnet. Alle zeitinvarianten Größen sollen durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet sein (z.B. maximales Bremsvermögen b , Sicherheitsabstand s , Fahrzeuglänge l). Wird im weiteren von dieser Bezeichnungsweise abgewichen, so wird dies ausdrücklich vermerkt. Damit ergibt sich für Gleichung 10:

$$\Delta x_i = \dot{x}_i\tau_i + \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} + c_i
 \tag{11}$$

3.1.1 Absolute Sicherheit

Unter der absoluten Sicherheit versteht man im allgemeinen die Möglichkeit eines Fahrzeugs innerhalb seines Abstands zum Vordermann anhalten zu können. Praktisch bedeutet das, daß das vordere Fahrzeug durch z.B. einen Unfall unmittelbar zum Stehen kommen kann und dem Folgefahzeug der Abstand allein als Anhalteweg zu genügen hat. In Gleichung 11 muß somit $b_{i-1} \rightarrow \infty$ gehen. Damit reduziert sich die Gleichung für den einzuhaltenden Abstand, der den Sicherheitsvorstellungen genügt, auf

$$\Delta x_i = \dot{x}_i \tau_i + \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} + c_i \quad (12)$$

(vergl. auch Gleichung 19). Das Modell der absoluten Sicherheit ist hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Es soll für eine Modellbildung nicht weiter untersucht werden, da auf Richtungsfahrbahnen Situationen, in denen diese Sicherheitsanforderungen notwendig werden, extrem selten sind.

3.1.2 Allgemein relative Sicherheit

Eine relative Sicherheit wird in LEUTZBACH (1972) wie folgt definiert: Ausgehend von der eingangs beschriebenen Situation wird vorausgesetzt, daß die beiden Geschwindigkeiten (\dot{x}_{i-1} , \dot{x}_i) und die beiden Bremsvermögen (b_{i-1} , b_i) der Fahrzeuge annähernd gleich seien.

Die hier mit „allgemein relative Sicherheit“ bezeichnete Vorstellung geht dagegen davon aus, daß sehr wohl Unterschiede dieser Faktoren in der Abstandsgleichung berücksichtigt werden müssen.

Damit wird die hier verwendete allgemein relative Sicherheit (im weiteren zur Vereinfachung nur kurz: relative Sicherheit) zum Gegenstand der eigentlichen Untersuchung. Analog zum sicheren Abstand kann natürlich auch die Folgegeschwindigkeit errechnet werden, mit der das Folgefahzeug mit dem momentanen Abstand sicher folgt. Ausgehend von Gleichung 11 ergibt die quadratische Gleichung

$$\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i 2b_i \tau_i - \frac{b_i}{b_{i-1}} \dot{x}_{i-1}^2 - 2b_i(\Delta x_i - c_i) = 0,$$

nach \dot{x}_i aufgelöst:

$$\dot{x}_i = -b_i \tau_i \pm \sqrt{(b_i \tau_i)^2 + \frac{b_i}{b_{i-1}} \dot{x}_{i-1}^2 + 2b_i(c_i - \Delta x_i)}$$

Diese verlangte Folgegeschwindigkeit darf nicht negativ werden, deswegen gibt es nur eine Lösung. Man erhält für die sichere Folgegeschwindigkeit:

$$\dot{x}_i = -b_i \tau_i + \sqrt{(b_i \tau_i)^2 + \frac{\dot{x}_{i-1}^2 b_i}{b_{i-1}} + 2b_i(\Delta x_i - c_i)} \quad (13)$$

Analog kann nun noch unter einem gegebenen Abstand und einer gegebenen Geschwindigkeit für das Folgefahrzeug das erforderliche Bremsvermögen berechnet werden:

$$b_i = \frac{\dot{x}_i^2}{\frac{\dot{x}_{i-1}^2}{b_{i-1}} + 2(\Delta x_i - c_i - \dot{x}_i \tau_i)} \quad (14)$$

3.1.3 Bedingt relative Sicherheit

Ergänzend zur allgemein relativen Sicherheit könnte noch gefordert werden, daß sich die Sicherheit nicht am Maximum, sondern am tatsächlichen Ist-Wert der Geschwindigkeitsänderung des Führungsfahrzeugs orientiert. Es wird hier vorausgesetzt, daß Möglichkeiten zur ständigen Erfassung der Ist-Zustandswerte (x, \dot{x}, \ddot{x}) des Vordermanns gegeben sind. Damit wird in Gleichung 11 der Faktor b_{i-1} durch \ddot{x}_{i-1} ersetzt.

Dieser momentane Wert der Geschwindigkeitsänderung kann sowohl positiv als auch negativ sein. Der positive Wert entspricht einer Geschwindigkeitszunahme, der negative ist mit einer Verzögerung identisch. Es kann deswegen nicht mehr davon ausgegangen werden, daß die Größen, die zur Berechnung herangezogen werden, beide das gleiche Vorzeichen besitzen. Es müssen Fallunterscheidungen betrachtet werden:

1. Das Führungsfahrzeug verzögert.
2. Das Führungsfahrzeug beschleunigt oder
3. fährt mit konstanter Geschwindigkeit ($\ddot{x}_{i-1} = 0$).

zu 1.:

In Gleichung 11 wird das maximale Verzögerungsvermögen b_{i-1} gegen die tatsächliche Verzögerung \dot{x}_{i-1} ausgetauscht. Damit ergibt sich:

$$\Delta x_{iSoll} = \dot{x}_i \tau_i + \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{x}_i^2}{b_i} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{\dot{x}_{i-1}} \right) + c_i \quad (15)$$

und für die Folgegeschwindigkeit analog zu Gleichung 13:

$$\dot{x}_{iSoll} = -b_i \tau_i + \sqrt{(b_i \tau_i)^2 + \frac{\dot{x}_{i-1}^2 b_i}{\dot{x}_{i-1}} + 2b_i (\Delta x_i - c_i)} \quad (16)$$

zu 2.:

Eine Abschätzung der bisher verwendeten Art ist hier nicht mehr möglich, da die Gleichung für den Abstand und die Folgegeschwindigkeit darauf beruht, daß es einen Punkt gibt, an dem die beiden Fahrzeuge zum Stillstand kommen.

Es besteht die Notwendigkeit, eine Strategie für diesen Folgefall festzulegen. Läßt man z.B. zu, daß das Fahrzeug sich dem Vorausfahrenden bis zum Reaktionsabstand ($\Delta x_R = \dot{x}_i \tau$) nähert, kann der Fall eintreten, daß ein plötzlich einsetzendes maximales Verzögern des Führungsfahrzeugs mit $b_{i-1} < b_i$ dazu führt, daß das Folgefahrzeug nicht mehr rechtzeitig zum Stehen kommen kann. Diese Überlegung führt unmittelbar zu der Forderung, daß der relativ sichere Folgeabstand nach Gleichung 11 einzuhalten ist. Daher wurde dieser bedingt relative Sicherheitsaspekt nicht weiter verfolgt.

Aus der nachfolgenden Tabelle geht hervor, welche der bisher angesprochenen möglichen Sicherheitsmodelle weiter verfolgt werden:

Sicherheitsmodell	$v_i \neq v_{i-1}$		$v_i = v_{i-1}$	
	$b_i \neq b_{i-1}$	$b_i = b_{i-1}$	$b_i \neq b_{i-1}$	$b_i = b_{i-1}$
Absolut sicher	-	-	-	-
Relativ sicher	ja	ja	ja	ja
Bedingt relativ sicher	-	-	-	-

3.1.4 Nähere Betrachtung der allgemein relativen Sicherheit

Es ist bei einer modellhaften Behandlung eines Phänomens immer hilfreich, wenn Abschätzungen von Extrem- bzw. Maximalwerten existieren. Durch

Rechnung unter der Annahme der Stationarität (JACOBS, 1970) soll versucht werden, eine obere Schranke der erreichbaren Leistungsfähigkeit unter verschiedenen Bedingungen zu finden. Stationäre Verhältnisse, insbesondere unter der weiter vereinfachenden Annahme gleicher Parameterausprägung, lassen sich besonders leicht auf ihre Auswirkungen bezüglich der Leistungsfähigkeit betrachten.

Erste Untersuchungen zur Problematik dieser Leistungsfähigkeitsangaben wurden von WIEDEMANN (1987) für Richtungsfahrbahnen durchgeführt. Ausgangsbasis war die sichere Zeitlücke z_i , die sich wie folgt aus einer kinematischen Betrachtungsweise ergibt:

$$z_2 \geq \tau_2 + \frac{v_2}{2b_2} - \frac{v_1^2}{v_2 2b_1} + \frac{1}{v_2} * l_1 \quad (17)$$

mit

- r Reaktionszeit eines Fahrers
- v, b Geschwindigkeit, Bremsvermögen der Fahrzeuge
- l Fahrzeuglänge des vorderen Fahrzeugs

Die Indizes geben die Reihenfolge der Fahrzeuge entgegen der Fahrtrichtung an. Das Fahrzeug 1 ist demnach der Vordermann des Fahrzeugs 2.

Mit dem umgekehrt proportionalen Verhältnis des Erwartungswertes einer Zeitlückenverteilung zu der Verkehrsstärke und der Einschränkung, daß sich bei einem Verkehrsstärkemaximum dann günstige Fälle im sicheren Sinn ergeben, wenn die Geschwindigkeitsunterschiede der einzelnen Fahrzeuge gegen Null gehen, folgt aus dieser Forderung unter Berücksichtigung von Gleichung 17 für die sichere Zeitlücke und $v_1 = v_2 = v$:

$$z_2 \geq \tau_2 + \frac{v}{2b_2} - \frac{v}{2b_1} + \frac{1}{v} * l_1 \quad (18)$$

Der Kehrwert dieser Funktion (ggf. mit 3600 multipliziert), ergibt den jeweiligen Verkehrsstärkewert, der unter den Sicherheitsanforderungen nicht überschritten werden sollte.

Weiterhin hat man die Möglichkeit, nach relativ sicherem Abstand und absolut sicherem Abstand zu untergliedern. Bei absolut sicherem Abstand wird angenommen, daß die Verzögerung des vorderen Fahrzeuges gegen ∞ geht (das Fahrzeug unmittelbar zum Stehen kommt) und sich dadurch der Ausdruck reduziert auf:

$$z_2 \geq \tau_2 + \frac{v}{2b_2} + \frac{1}{v} * l_1 \quad (19)$$

Mit Hilfe dieser Ausdrücke lassen sich Betrachtungen über den sicheren Verkehrsablauf auf einstreifigen Richtungsfahrbahnen durchführen. Diese Vorgehensweise ist zur Leistungsfähigkeitsabschätzung bei stark gebundenem Verkehr auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen durchaus geeignet, unter der Annahme, daß Fahrstreifenwechsel vernachlässigbar sind.

Für die weiteren Grenzwertabschätzungen wird wegen der übersichtlicheren Schreibweise wieder auf die Schreibweise der Indizierung 1 für das Führungsfahrzeug und 2 für das Folgefahrzeug übergegangen. Die Abschätzung erfolgt anhand des minimalen Abstandsverhaltens, das durch Gleichung 11 bestimmt ist. Im weiteren wird für die Geschwindigkeit wieder der Bezeichner v verwendet, da hier der Erwartungswert betrachtet wird. Ausgehend vom Abstandsverhalten, das sich als kleinster Wert bei Verwendung von Gleichung 11 einstellt und der Fahrzeugdichte

$$\Delta x = c_2 + \tau_2 v_2 + \frac{v_2^2}{2b_2} - \frac{v_1^2}{2b_1} \quad \text{und} \quad k = 1/\Delta x \quad (20)$$

kann eine Gleichung bestimmt werden, die für die beiden betrachteten Sicherheitsmodelle die Möglichkeit der mathematischen Auflösung bietet. Mit

$$k_{max} = 1/c \quad (21)$$

folgt für die Verkehrsdichte

$$k = \frac{k_{max}}{1 + \tau v_2 k_{max} + \left(\frac{v_2^2}{2b_2} - \frac{v_1^2}{2b_1} \right) k_{max}} \quad (22)$$

und damit für die Verkehrsstärke ($q = k \bar{v}_m$):

$$q = \frac{v_2 k_{max}}{1 + \tau v_2 k_{max} + \left(\frac{v_2^2}{2b_2} - \frac{v_1^2}{2b_1} \right) k_{max}} \quad (23)$$

Ausgehend von einem völlig harmonisch verlaufenden Verkehrsstrom kann man eine optimale Geschwindigkeit voraussetzen, bei der sich die maximale Verkehrsstärke einstellt. v_{opt} läßt sich aus $dq/dv = 0$ ermitteln.

In einem ersten Schritt wird angenommen, daß die beiden Bremsvermögen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge gleich seien. Dann reduziert sich Gleichung 23 auf

$$q = \frac{vk_{max}}{1 + \tau vk_{max}} \quad (24)$$

Damit ergibt sich für dq/dv :

$$\frac{dq}{dv} = \frac{k_{max}}{(1 + \tau vk_{max})^2} \quad (25)$$

Für konstante Werte für τ und k_{max} kann diese Gleichung nur für $v = v_{opt} = \infty$ erfüllt sein. Setzt man v_{opt} in

$$q = \frac{k_{max}}{\frac{1}{v} + \tau k_{max}} \quad \text{ein, erhält man} \quad q = \frac{1}{\tau}$$

als Maximum für die allgemein relative Sicherheit unter den genannten Vereinfachungen. Die Leistungsfähigkeit kann demnach nicht größer sein als der Kehrwert der mittleren Reaktionszeit, sofern man sicheres Fahren voraussetzt.

Die Frage, ob unter den Bedingungen (identische Geschwindigkeiten und Bremsvermögen) sich tatsächlich bei dieser Betrachtungsform das erreichbare Maximum ausprägt, drängt sich unmittelbar auf. Ausgehend von Gleichung 23 sollen Parameterkombinationen von v und b näher betrachtet werden.

Betrachtung des Falls $v_1 \neq v_2, b_1 = b_2$:

In Abbildung 7 sind für die Voraussetzung $b_1 = b_2$ Grenzverläufe von v_1 als Funktion von v_2 aufgetragen. Die Rechnung basiert auf dem Ansatz, daß der Abstand gerade verschwindet ($\Delta x = 0$ in Gleichung 11). Für gleiche Verzögerungsvermögen wurden dann die Fälle berechnet, für die die Gleichung erfüllt ist. Man sieht, daß ein Öffnungsvorgang zu einer Überschätzung der Leistungsfähigkeit führen kann. Dieser Fall muß auf mehrstreifigem Verkehrsablauf keine Seltenheit sein, da dies immer dann eintreten kann, wenn ein schnelleres Fahrzeug vor ein langsamerer nach einem Überholvorgang wechselt. Wie man erkennen kann, würde ein Algorithmus, der den Abstand allein nach Gleichung 11 ermittelt, zu Fehlern führen.

Betrachtung des Falls $v_1 = v_2, b_1 \neq b_2$:

In Abbildung 8 sind Grenzverläufe bei gleichen Geschwindigkeiten beider Fahrzeuge für b_1 in Abhängigkeit von v mit b als Parameter aufgezeigt.

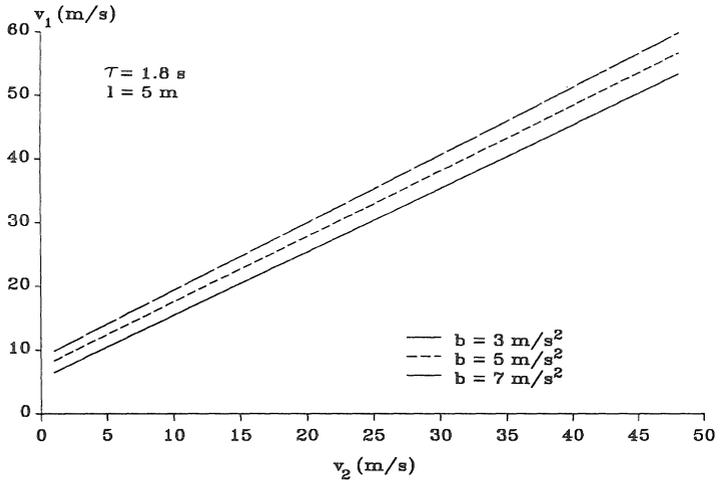


Abb. 7: Grenzverläufe von v_1 bei identischem b über v_2 mit b als Parameter.

Es existiert eine Kolonne, deren einzelne Fahrzeuge identische Geschwindigkeiten fahren und deren maximale Verzögerungsvermögen derart verteilt sind, daß ein folgendes Fahrzeug ein deutlich höheres Verzögerungsvermögen besitzt als das vorausfahrende. Auch hier wurde in Gleichung 11 der Grenzwert für $\Delta x = 0$ berechnet, jedoch mit gleichen Geschwindigkeiten für beide Fahrzeuge. Dieser Fall kann immer dann eintreten, wenn ein Fahrzeug mit sehr gutem Bremssystem einem vielleicht kleineren oder älteren Fahrzeug mit nicht so guten Bremsen folgt. Auch hier führt die reine Abstützung auf Gleichung 11 als Sicherheitsmaßstab zu Fehlern.

Es sind also Nebenbedingungen einzuhalten, die verhindern sollen, daß die reine Berechnung anhand der Gleichung 11 zu einem zu dichten Auffahren führt. Hierzu ist die Bedingung

$$x_1(\tau) \geq x_2(\tau)$$

zu berücksichtigen. Dies führt unter den bei der Herleitung der Abstandsformel gemachten Vereinbarungen zu:

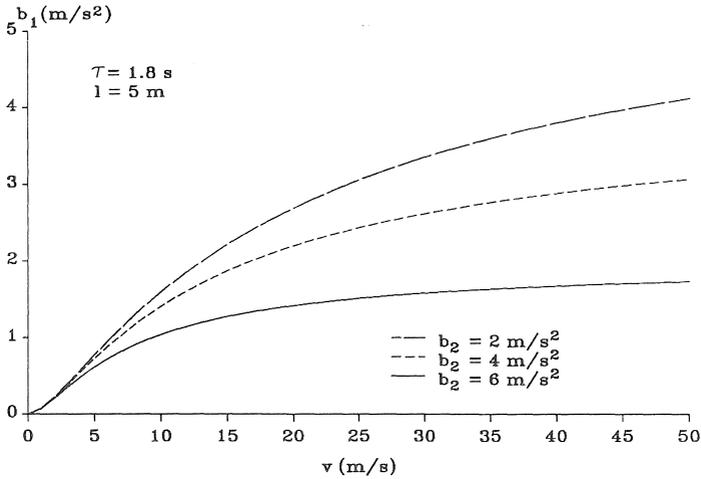


Abb. 8: Grenzverläufe von b_1 bei identischem v über v mit b_2 als Parameter.

$$\Delta x + v_1 \tau - \frac{1}{2} b_1 \tau^2 \geq v_2 \tau$$

Hieraus läßt sich die notwendige Bedingung

$$\Delta x \geq v_2 \tau - v_1 \tau + \frac{1}{2} b_1 \tau^2 \quad (26)$$

unmittelbar ableiten.

Anscheinend sind demnach durchaus weitere Nebenbedingungen zu beachten, wenn man eine vollständige Betrachtung des sicheren Folgevorgangs mit allen denkbaren Parameterkombinationen durchführen will.

Im Rahmen einer Forschungsarbeit über Fahrzeug- und Fahrwerksleistungen führte beispielweise DREYER (1976) ähnliche Rechnungen auf der Basis angenommener Stationarität durch. Er betrachtete Fahrzeugpuls ebenfalls unter der Annahme, daß Parameter wie Beschleunigungs- und Bremsvermögen sowie Fahrzeuglängen für alle Fahrzeuge des Pulks gleich seien.

Er ermittelte unter diesen Voraussetzungen die theoretisch maximale Leistungsfähigkeit sowohl bei absolut als auch bei relativ sicherem Abstand.

Folgende Feststellungen lassen sich allgemein aus stationären Betrachtungen festhalten:

- Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten ist der Einfluß der Fahrzeuglänge auf die Verkehrsstärke vernachlässigbar gering.
- Diese Feststellung gilt ebenso bei absolut sicherem Abstandsverhalten.
- Bei relativ sicherem Abstand dagegen ist die Verkehrsstärke durchaus von der Fahrzeuglänge beeinflusst.
- Beide Modelle werden stark von der Verlustdauer (Verzögerungszeit) beeinflusst. Das absolut sichere Modell ist weiterhin von dem maximalen Bremsvermögen abhängig.

Für das absolut sichere Modell errechnet DREYER den Grenzwert

$$q_{max,abs} = \frac{1}{\tau + \frac{v}{2b_{max}}}$$

3.2 Sicherheitsansatz für den Folgevorgang

Gleichung 11 stellt sicher, daß die einander folgenden Fahrzeuge mit einem gewissen Sicherheitsabstand zueinander zum Stehen kommen. Nun bleibt jedoch die Möglichkeit, daß es im Verlauf der Bewegung zu einer Kollision kommen kann, wie bereits die vorhergehende Betrachtung gezeigt hat.

Damit stellt sich automatisch die Frage: Welche Nebenbedingungen unter welchen Parameterausprägungen sind zusätzlich zu der Gleichung 11 einzuhalten, um bei einer kontinuierlichen Bewegung des Führungs- und des Folgefahrzeugs immer zu gewährleisten, daß es zu keiner Kollision kommen kann?

Zur Lösung wird der Zeitraum der Bewegung in verschiedene Intervalle unterteilt, deren Grenzen t_0, τ, t_1, t_2 sein sollen (disjunkte Zerlegung). Danach werden die Abstandsfunktionen für die verschiedenen Intervalle berechnet. Hieraus lassen sich nun Bedingungen herleiten, welchen der relative Sicherheitsabstand genügen muß.

3.2.1 Voraussetzungen

Zwei Fahrzeuge fahren hintereinander her und haben zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ den Abstand (Gleichung 11) ²

$$\Delta x = \dot{x}_i \tau + \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} \quad (27)$$

- \dot{x}_{i-1} Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs und
- \dot{x}_i Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs zum Zeitpunkt t_0
- b_{i-1} maximale Verzögerung des Führungsfahrzeugs
- b_i maximale Verzögerung des Folgefahrzeugs
- τ Reaktionszeit des Folgefahrzeugs

Zum Zeitpunkt t_0 beginnt das Führungsfahrzeug mit maximaler Verzögerung zu bremsen und ab dem Zeitpunkt $t_0 + \tau$ bremsst das Folgefahrzeug ebenfalls mit maximaler Verzögerung. Im weiteren wird davon ausgegangen, daß alle auftretenden Parameter positiv und konstant sind. Mit $t_0 = 0$ erhält man die Weg-Zeit-Funktion für das Führungsfahrzeug mit:

$$x_{i-1}(t) = \begin{cases} \Delta x + \dot{x}_{i-1}t - \frac{1}{2}b_{i-1}t^2 & 0 < t \leq \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} \\ \Delta x + \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} & t > \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} \end{cases}$$

und die Weg-Zeit-Funktion für das Folgefahrzeug:

$$x_i(t) = \begin{cases} \dot{x}_i t & 0 < t \leq \tau \\ \dot{x}_i t - \frac{1}{2}b_i(t - \tau)^2 & 0 < t \leq \tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i} \\ \dot{x}_i \tau + \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} & t > \tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i} \end{cases}$$

$t_1 = \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}}$ ist der Zeitpunkt an dem das Führungsfahrzeug zum Stehen kommt und

$t_2 = \tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i}$ der Zeitpunkt an dem das Folgefahrzeug zum Stehen kommt.

²Die Betrachtung bezieht sich nur auf den Bereich der Bewegung beider Fahrzeuge. Die Gültigkeit der Gleichung zum Zeitpunkt des Stillstands beider Fahrzeuge wird selbstverständlich vorausgesetzt. Die Fahrzeuglängen werden für diese Betrachtung vernachlässigt. Da es sich jedoch um zeitinvariante Größen und damit für eine gegebene Fahrzeugpaarung um Konstante handelt, ist eine Einbindung jederzeit möglich, ohne den Charakter der Analyse zu beeinflussen. Die Koordinaten könnten z.B. beim Fahrzeug i-1 auf das Heck und beim Fahrzeug i auf den Bug bezogen sein.

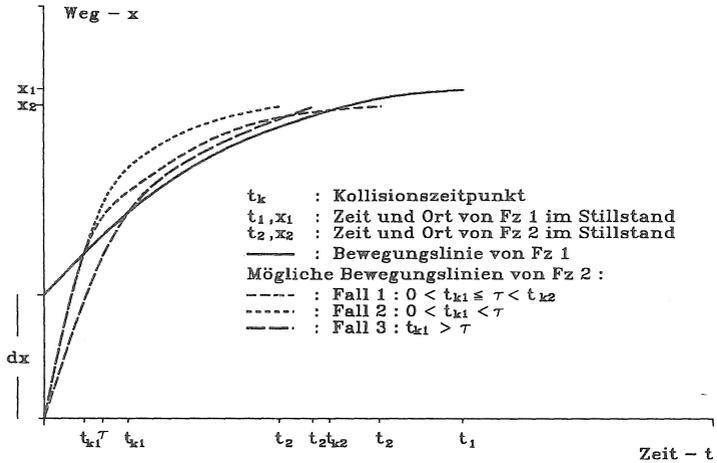


Abb. 9: Mögliche Bewegungslinien während des Bremsvorgangs. Trotz der Tatsache, daß der Verlauf der Bewegungslinie mit einem sicheren Abstand der Fahrzeuge endet, kann es zu Kollisionen im Verlauf des Bremsvorgangs kommen.

3.2.2 Herleitung der notwendigen Bedingungen für die verschiedenen Zeitintervalle

In den folgenden Betrachtungen kommen die nachstehend genannten Fälle häufiger vor:

1. Fall : $h(t)$ ist eine nach unten geöffnete Parabel
2. Fall : $h(t)$ ist eine nach oben geöffnete Parabel
3. Fall : $h(t)$ ist eine Gerade und $h(\tau) > 0$

Sie werden deswegen zur Vereinfachung nur abgekürzt angegeben. Die Abstandsfunction soll mit

$$h(t) := x_{i-1}(t) - x_i(t)$$

bezeichnet werden. Bei der Betrachtung eines Intervalls wird stets vorausgesetzt, daß es im bisherigen Verlauf zu keiner Kollision gekommen ist und keiner der anderen Zeitpunkte im Intervall liegen.

1. Intervall $(0, \tau]$:

$$h(t) = \Delta x - (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})t - \frac{1}{2}b_{i-1}t^2 \quad (28)$$

Fall 1. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn $h(\tau) < 0$. Resultierende Bedingung:

$$\Delta x \geq (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})\tau + \frac{1}{2}b_{i-1}\tau^2 \quad (29)$$

2. Intervall $(0, t_1]$, $t_1 < \tau$:

$$h(t) = \Delta x - (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})t - \frac{1}{2}b_{i-1}t^2 \quad (30)$$

Gleicher Fall wie 1. Die hieraus folgende Bedingung:

$$\Delta x \geq \frac{\dot{x}_i \dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} \quad (31)$$

3. Intervall $(\tau, t_1]$:

$$h(t) = \Delta x + \frac{1}{2}b_i\tau^2 + (\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - b_i\tau)t + \frac{1}{2}(b_i - b_{i-1})t^2 \quad (32)$$

- Fall: $b_i = b_{i-1}$

Fall 3. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn $h(t_1) < 0$. Die notwendige Bedingung hieraus:

$$\Delta x \geq \frac{\dot{x}_i \dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{b_{i-1}} + \frac{\dot{x}_{i-1} b_i}{b_{i-1}} \tau - \frac{1}{2}b_i \tau^2 \quad (33)$$

- Fall: $b_i < b_{i-1}$

Fall 1. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn $h(t_1) < 0$. Resultierende Bedingung:

$$\Delta x \geq -\frac{1}{2}b_i\tau^2 - \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - b_i\tau) - \frac{1}{2}\frac{\dot{x}_{i-1}^2}{b_{i-1}^2}(b_i - b_{i-1}) \quad (34)$$

- Fall: $b_i > b_{i-1}$

Fall 2. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn

$$(i) \quad h(t_1) < 0 \quad \text{oder}$$

$$(ii) \quad t_{min} \in (\tau, t_1] \wedge h(t_{min}) < 0 \quad (t_{min} = \frac{\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - b_i \tau}{b_{i-1} - b_i})$$

Notwendige Bedingungen:

(i): dieser Fall ist durch Gleichung 34 erfüllt.

(ii):

$$\Delta x \geq -\frac{1}{2}b_i\tau^2 - \frac{1}{2} \frac{(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - b_i\tau)^2}{b_{i-1} - \dot{x}_i} \quad (35)$$

4. Intervall $(\tau, t_2]$, $t_1 \leq \tau$:

$$h(t) = \Delta x + \frac{1}{2}b_i\tau^2 + \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} - (\dot{x}_i + b_i\tau)t + \frac{1}{2}b_it^2 \quad (36)$$

Fall 2. Eine Kollision ist nur möglich, wenn

$$(i) \quad h(t_2) < 0 \quad \text{oder}$$

$$(ii) \quad t_{min} \in (\tau, t_2] \wedge h(t_{min}) < 0 \quad (t_{min} = t_2)$$

Aus (i),(ii) folgt die notwendige Bedingung:

$$\Delta x \geq -\frac{1}{2}b_i\tau^2 - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} + (\dot{x}_i + b_i\tau)(\tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i}) - \frac{1}{2}b_i(\tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i})^2 \quad (37)$$

5. Intervall $(\tau, t_2]$, $t_1 \geq t_2$:

$$h(t) = \Delta x + \frac{1}{2}b_i\tau^2 + (\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - b_i\tau)t + \frac{1}{2}(b_i - b_{i-1})t^2 \quad (38)$$

- Fall: $b_i = b_{i-1}$

Fall 3. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn $h(t_2) < 0$. Hieraus folgt die Bedingung:

$$\Delta x \geq -\frac{1}{2}b_i\tau^2 - (\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i + b_i\tau)(\tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i}) \quad (39)$$

- Fall: $b_i < b_{i-1}$

Fall 1. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn $h(t_2) < 0$. Resultierende Bedingung:

$$\Delta x \geq \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} - \frac{\dot{x}_{i-1}\dot{x}_i}{b_i} + \frac{\dot{x}_i^2 b_{i-1}}{b_i^2} + (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1} + \frac{b_{i-1}}{b_i}\dot{x}_i)\tau + \frac{1}{2}b_{i-1}\tau^2 \quad (40)$$

- Fall: $b_i > b_{i-1}$

Fall 2. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn

(i) $h(t_2) < 0$ oder

(ii) $t_{min} \in (\tau, t_2] \wedge h(t_{min}) < 0 \quad \left(t_{min} = \frac{\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - b_i\tau}{b_{i-1} - b_i} \right)$

Fall (i) wird von Gleichung 40 erfüllt und (ii) liefert Gleichung 35

6. Intervall $(t_1, \tau]$:

$$h(t) = \Delta x + \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} - \dot{x}_i t \quad (41)$$

$h(t)$ ist eine streng monoton fallende Gerade. Eine Kollision ist nur dann möglich, wenn $h(\tau) < 0$. Notwendige Bedingung:

$$\Delta x \geq \dot{x}_i\tau - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} \quad (42)$$

7. Intervall $(t_1, t_2]$:

$$h(t) = \Delta x + \frac{1}{2}b_i\tau^2 + \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} - (\dot{x}_i + b_i\tau)t + \frac{1}{2}b_it^2 \quad (43)$$

Fall 2. Eine Kollision ist nur möglich, wenn

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad & h(t_2) < 0 && \text{oder} \\ \text{(ii)} \quad & t_{min} \in (t_1, t_2] \wedge h(t_{min}) < 0 \end{aligned}$$

Die beiden Fälle (i),(ii) liefern die notwendige Bedingung:

$$\Delta x \geq (\dot{x}_i + b_i \tau) \left(\tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i} \right) - \frac{1}{2} b_i \left(\tau + \frac{\dot{x}_i}{b_i} \right)^2 - \frac{1}{2} \dot{x}_i \tau^2 - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} \quad (44)$$

8. Intervall $(t_2, t_1]$:

$$h(t) = \Delta x - \dot{x}_i \tau - \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} + \dot{x}_{i-1} t - \frac{1}{2} b_{i-1} t^2 \quad (45)$$

Fall 1. Eine Kollision ist nur möglich, wenn $h(t_1) < 0$. Notwendige Bedingung:

$$\Delta x \geq \dot{x}_i \tau + \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}} \quad (46)$$

Durch die so gewonnenen Bedingungen erhält man durch Einsetzen von Δx_{min} Definitionsbereiche für die Reaktionszeit.

3.2.3 Resultierende Definitionsbereiche für die Reaktionszeit

Aus Gleichung 29 mit der Voraussetzung

$$\tau \leq \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} \quad \text{folgt} \quad \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} - \sqrt{\frac{\dot{x}_i^2}{b_{i-1} b_i}} \leq \tau \leq \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} \quad (47)$$

Aus Gleichung 31 unter der Voraussetzung

$$\tau \geq \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}}$$

folgt, daß für diese τ die Bedingung immer erfüllt ist. Die Gleichungen 33, 34, 35, 39 gelten für beliebige τ , und in den Gleichungen 37, 44, 46 erhält man durch einfaches Umformen den relativen Sicherheitsabstand sowie in Gleichung 42 die Bedingung

$$\frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} > 0$$

welche immer erfüllt ist. Aus Gleichung 40 folgt unter der Voraussetzung: $\tau < t_1 \leq t_2, b_i < b_{i-1}$:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} - 2\frac{\dot{x}_i}{b_{i-1}} + \frac{\dot{x}_i}{b_i} - 2\sqrt{\frac{\dot{x}_i \dot{x}_{i-1}}{b_i b_{i-1}} - \frac{\dot{x}_i \dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}^2} + \frac{\dot{x}_i^2}{b_{i-1}^2} - \frac{\dot{x}_i^2}{b_i b_{i-1}}} \\ \leq \tau \leq \\ \frac{\dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}} - 2\frac{\dot{x}_i}{b_{i-1}} + \frac{\dot{x}_i}{b_i} + 2\sqrt{\frac{\dot{x}_i \dot{x}_{i-1}}{b_i b_{i-1}} - \frac{\dot{x}_i \dot{x}_{i-1}}{b_{i-1}^2} + \frac{\dot{x}_i^2}{b_{i-1}^2} - \frac{\dot{x}_i^2}{b_i b_{i-1}}} \quad (48) \end{aligned}$$

3.2.4 Ergebnis

Der relative Sicherheitsabstand ist immer ein Garant für kollisionsfreies Fahren, solange $\tau > t_1$ gilt. Ist dies nicht der Fall, so müssen die vorkommenden Parameter die Bedingung 47 erfüllen, damit es zu keiner Kollision kommt. Gilt nun $\tau < t_1 \leq t_2$ und $b_i < b_{i-1}$, so muß auch noch Gleichung 48 erfüllt sein. Das führt zu folgender Zusammenstellung:

1. Es gilt immer: $\Delta x \geq \dot{x}_i \tau + \frac{\dot{x}_i^2}{2b_i} - \frac{\dot{x}_{i-1}^2}{2b_{i-1}}$
2. Im Bereich $(0, \tau]$: $\Delta x \geq (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})\tau + \frac{1}{2}b_{i-1}\tau^2$
3. Im Bereich $(\tau, t_2], b_i < b_{i-1}$: Gleichung 40

In allen Gleichungen sind die Fahrzeuglängen zusätzlich zu berücksichtigen. Es ist demnach immer das Maximum aus der Berechnung der drei Gleichungen zur Berechnung des sicheren Abstands zu verwenden.

3.3 Sicherheitsansatz für mehrstreifigen Verkehrsablauf

Von zentraler Bedeutung für diese Arbeit ist die Übertragbarkeit und konsequente Umsetzung des oben genannten Sicherheitssatzes auf mehrstreifigen

Verkehrsablauf. Dazu ist es jedoch notwendig, die Bedingungen zu definieren, unter denen eine Verallgemeinerung erfolgen kann:

1. Übertragung auf die Fahrzeugkolonne
2. Bedingung für den Fahrstreifenwechsel

3.3.1 Übertragung auf die Fahrzeugkolonne

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, fahren zwei hintereinander fahrende Fahrzeuge unter Einhaltung eines Abstandes nach Gleichung 11 und den Nebenbedingungen nach Gleichung 29 und 40 tatsächlich zu jedem Zeitpunkt sicher. Die Gleichungen gelten, da sie parameterisiert sind, für jedes beliebige Fahrzeugpaar auf einem Fahrstreifen. Damit fährt eine Kolonne, in der die Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugen nach diesen Sicherheitskriterien eingehalten werden, auch als Ganzes sicher.

Betrachtet man z.B. eine Kolonne, die aus 4 Fahrzeugen besteht, so sei der Aktionsbeginn der maximalen Verzögerung des ersten Fahrzeugs der Zeitpunkt t_{12} ($t_{12} \hat{=} t_0$ für das Fahrzeugpaar 1 - 2). Der Rest der Kolonne (Fahrzeuge 2, 3 und 4) fährt bis zum Zeitpunkt τ_2 unverändert weiter. Zu diesem Zeitpunkt beginnt Fahrzeug 2 mit maximalem Vermögen zu verzögern. Dieser Zeitpunkt soll mit t_{23} bezeichnet werden und entspricht einem t_0 für die Paarung der Fahrzeuge 2 und 3. Die Fahrzeuge 3 und 4 fahren bis zum Zeitpunkt τ_3 unverändert weiter. Zum Zeitpunkt τ_3 beginnt dann Fahrzeug 3 mit seinem maximalem Verzögerungsvermögen zu bremsen. Dies kann als Zeitpunkt t_{34} bzw. als t_0 für das Fahrzeugpaar 3 und 4 betrachtet werden.

Fazit:

1. Eine Kolonne fährt sicher, wenn jederzeit der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen mindestens dem erlaubten Minimum nach Gleichung 11 entspricht.
2. Der Mindestabstand muß für jedes Fahrzeugpaar getrennt berechnet werden.

3.3.2 Bedingung für den Fahrstreifenwechsel

Wichtig für den mehrstreifigen Verkehr ist der sichere Ablauf des Fahrstreifenwechsels. Unter Beachtung der bisherigen Feststellungen läßt sich klar abgrenzen: Der Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Fahrbahnen ist dann sicher, wenn das wechselnde Fahrzeug zu seinem neuen Vorderfahrzeug und

der neue Hintermann zu dem wechselnden Fahrzeug einen Sicherheitsabstand nach Gleichung 11 besitzen. Um eine algorithmisch handhabbare Beschreibung zu erhalten, wird folgende Formulierung gewählt:

Die Bewegungsebene der Fahrzeuge ist von \vec{x} aufgespannt und in die Komponenten \vec{x}_x (Bewegungsrichtung der Fahrzeuge) und \vec{x}_y (quer zur Bewegungsrichtung vom rechten Fahrbahnrand ausgehend) zerlegbar. Ein Fahrzeug wird schematisch durch ein Rechteck mit den Ausdehnungen L (Länge des Fahrzeugs) und B (Breite des Fahrzeugs) auf der Bewegungsebene dargestellt. Für ein wechselndes Fahrzeug auf Richtungsfahrbahnen wird angenommen: $\dot{x}_x \gg \dot{x}_y$. Daher soll der Fahrstreifenwechsellvorgang als Parallelverschiebung des Rechtecks in Wechselrichtung betrachtet werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Wechsellvorgangs muß der verwendete Begriff „Überdeckung“ näher erläutert werden (Abbildung 10):

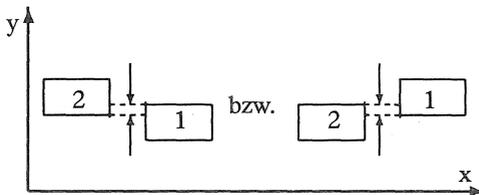


Abb. 10: Schema der Überdeckung beim Fahrstreifenwechsellvorgang.

Als Überdeckung zwischen zwei Fahrzeugen mit den Indizes 1 und 2 wird definiert:

Überdeckung : $\cap_{(2,1)}$

$$\begin{aligned} y_{u2}(t) \geq y_{u1}(t) & : y_{o1}(t) - y_{u2}(t) \geq 0 \\ \text{oder } y_{u2}(t) \leq y_{u1}(t) & : y_{o2}(t) - y_{u1}(t) \geq 0 \end{aligned}$$

Vereinfacht ausgedrückt heißt dies: Überschneiden sich die Projektionen auf der y - Achse zweier Fahrzeuge, so soll dies Überdeckung genannt werden.

Betrachtet man nun einen schematisch dargestellten Wechsellvorgang wie in Abbildung 11, so kann man den sicheren Fahrstreifenwechsel wie folgt detaillieren: Wechselt das Fahrzeug 3 von seinem Ausgangsstreifen auf den benachbarten, so wird zum Zeitpunkt $t_{s,k}$ eine Überdeckung mit Fahrzeug

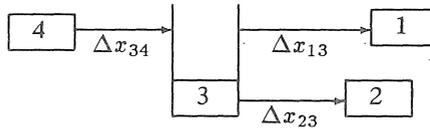


Abb. 11: Schema des Fahrstreifenwechsels zur Definition des Sicherheitskriteriums.

4 existieren. Zu diesem Zeitpunkt muß der Sicherheitsabstand nach Gleichung 11 zwischen diesen beiden Fahrzeugen vorhanden sein. Gleichzeitig muß zu jedem Zeitpunkt der Sicherheitsabstand zum Fahrzeug 1 oder 2 oder auch zu beiden (in Abhängigkeit der jeweiligen Überdeckung) vom Fahrzeug 3 aus vorhanden sein.

Verallgemeinerung:

Bezeichnet man den nach Gleichung 11 berechneten Sicherheitsabstand mit $\Delta x_{s(i,i-1)}$ für das Fahrzeugpaar $i, i-1$, so muß zu jedem Zeitpunkt gelten:

$$\forall(i, j) : \exists \cap_{(i,j)} \rightarrow \Delta x_{j-i} \geq \Delta x_{s(i,j)}$$

mit

- $\cap_{(i,j)}$: Überdeckung zwischen dem Fahrzeugpaar i und j
- Δx_{j-i} : Betrag des Abstands ($\vec{x}_{jx} - \vec{x}_{ix}$ zwischen dem Fahrzeugpaar i und j)
- $\Delta x_{s(i,j)}$: Betrag des sicheren Abstands nach Gleichung 11 (Auch hier nur Betrachtung der x -Anteile des Abstandsvektors)

4 Modell des sicheren Verkehrsablaufs

Unter der Modellierung wird hier die Umsetzung der modellhaften, theoretischen Vorstellung in eine simulationstechnisch handhabbare, funktionelle Beschreibung verstanden. Hierfür sind folgende Schritte notwendig:

1. Die Festlegung eines Folgemodells für die FFE
2. Eine Entscheidungsstrategie für Fahrstreifenwechsel
3. Die Erstellung eines Modells für diesen Ablauf
4. Die Auswahl einer geeigneten Simulationstechnik

Diese Schritte werden im folgenden beschrieben. Für die Realisierung der Simulation kamen aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit von vornherein nur Digitalrechner in Frage. Die auf diesen Rechenanlagen übliche Vorgehensweise bietet zudem eine einfachere Behandelbarkeit stochastischer Prozesse.

4.1 Folgeverhalten der Fahrer-Fahrzeug-Einheit

Die Festlegung auf das in Kapitel 2.2.3 beschriebene Fahrzeugfolgemodell wurde im wesentlichen durch zwei Gründe bestimmt: Zum einen entspricht das schwellenwertbasierte Folgeverhalten eher der Stochastik des realen Verkehrsablaufs als die gleichungsbasierten Folgemodelle. Zum anderen ist die Modellierung durch diese Wahrnehmungsschwellen erheblich einfacher als die Berücksichtigung der Fahrzustände in den deterministischen Gleichungen und den entsprechenden Werten der Exponenten.

4.1.1 Vorüberlegungen

Mit den in Kapitel 3 zusammengestellten Abstandsformeln konnte das in Kapitel 2.2.3 vorgestellte Interaktionsmodell auf das sichere Fahren hin modifiziert werden. Die dort als Gefahrenbremsung bezeichnete Zone soll nach Möglichkeit nicht erreicht werden, da bei einer kontinuierlichen Einhaltung des erforderlichen Sicherheitsabstandes eine gefährdende Situation nicht auftreten kann. Überträgt man dieses Grenzverhaltensmuster auf das in WIEDEMANN (1974) ausgearbeitete $\Delta v - \Delta x$ -Diagramm, so kann man die Grenze BX mit der Grenze Δx_{Soll} (Gleichung 11) gleich setzen. In der vorliegenden Arbeit wurde dies so realisiert, wobei für die Modellbeschreibung im weiteren folgende Vereinbarungen gelten:

- Grundsätzlich wird die Einheit Fahrer-Fahrzeug im Ganzen modelliert. Zum besseren Verständnis der zugrunde gelegten Modellvorstellung werden jedoch
- Aktionen und Wahrnehmungen, die typischerweise der Fahrer eines Fahrzeugs durchführt, auch sprachlich diesem zugeordnet. Daher wird dann vom „Fahrer“ gesprochen.
- Aktionen, die typischerweise das Fahrzeug durchführt, werden diesem zugeordnet, und die Ausführungen beziehen sich auch auf das „Fahrzeug“.
- Für alle anderen Beschreibungen, die sich wieder auf die Einheit Fahrer-Fahrzeug als Ganzes beziehen, wird dann die Bezeichnung „FFE“ verwendet.
- Die Koordinatenangaben eines FFE beziehen sich auf seinen geometrischen Mittelpunkt. In der Simulation werden dann selbstverständlich zu jeder der nachfolgend beschriebenen Berechnungen, die sich auf diese Koordinaten beziehen, die Ausdehnungen des Fahrzeugs mit berücksichtigt.

Der Fahrer wird nicht nur von den direkt vom Vordermann ausgelösten Wahrnehmungsreizen beeinflusst, der Fahrverlauf wird daneben sicher von weiter entfernten, aber bereits wahrnehmbaren Ereignissen abhängen. Abb. 12 zeigt eine mögliche Variante der Einflußnahme bestimmter Faktoren auf die für das FFE verwendeten Beschreibungsgrößen. Insbesondere können entferntere Ereignisse (bis zu der Reaktions- oder Wahrnehmungsgrenze) die Wunschgeschwindigkeit und den Fahrstreifenwunsch beeinflussen. Zum Fahrstreifenwechsel existieren Messungen über Wechselhäufigkeiten (z.B. SPARMANN, 1978 oder LEUTZBACH, BUSCH, 1984), jedoch kaum Untersuchungen über Anlässe, die den Fahrer zum Wechsel bewegen. Es ist deswegen notwendig, die Entscheidungsstrukturen zu durchdenken.

WILLMANN (1978) legte folgende Prioritätenfolge fest: Die Fahrer sollten im Bereich der erhöhten Reaktionsbereitschaft während einer Annäherung an den Vordermann mit Geschwindigkeitsüberschuß zuerst auf diesen reagieren, ehe sie sich mit Nachbarfahrzeugen zwecks Fahrstreifenwechsel befassen. Die Einhaltung des sicheren Abstands auch während des Wechsels soll eine der Grundlagen des hier vorgestellten Modells sein.

Das Fahrverhalten wird sich von Fahrstreifen zu Fahrstreifen unterscheiden. So wird sich ein Fahrer auf dem äußersten rechten Fahrstreifen kaum von einem herannahenden Fahrzeug zu einem Wechsel drängen lassen. Hingegen erhöht sich das mittlere Geschwindigkeitsniveau zunehmend zu den inneren Fahrstreifen bei fließendem Verkehr. Weiter wurde versucht, die vorne

Neues Ereignis in Sichtweite?			
nein		ja	
Festes Hindernis?			
nein		ja	
Ist die Wunschgeschwindigkeit größer als die mittlere Lkw-Geschwindigkeit, so werden frühzeitig als notwendig erachtete Reaktionen eingeleitet (→ Fahrstreifen, → Vw)		Reaktionen werden entsprechend der Art des Hindernisses und der Kenntnis des Fahrers so früh wie möglich eingeleitet (→ Fahrstreifen, → Vw)	
$dv > 0$?			
nein		ja	
$dx < BX$?		$dv > Sdv$?	
nein	ja	nein	ja
Folgen & Fahrstreifenwechsel prüfen	Folgen	Fahren nach Wunsch Freie Fahrstreifenwahl	$dx < BX$?
			nein
			ja
			Annäherung
			Gefahrenbremsung

Abb. 12: Eine Variante der möglichen Zuordnung von Einflüssen auf Beschreibungsgrößen des FFE.

aufgezeigten, nach der Rechtsprechung erlaubten Verhaltensmuster einzubauen. Damit muß ein Fahrer z.B. nicht unbedingt nach rechts wechseln, wenn er erkennt, daß er nur für eine begrenzte Zeit auf dem rechten Fahrstreifen bleiben kann.

4.1.2 Interaktionsbereiche

Damit können folgende Interaktionsbereiche unterschieden werden:

- Reaktionsbereich: Das vorausfahrende Fahrzeug ist nahe genug, um Reaktionen des Fahrers auszulösen. Es werden hier zwei Bereiche unterschieden: der Annäherungs- und der Folgevorgang. Die Annäherung wiederum kann in die Bereiche
 - hohe Differenzgeschwindigkeit und geringer Abstand:
akuter Handlungsbedarf

- geringe Differenzgeschwindigkeit und / oder großer Abstand: es liegt Handlungsspielraum vor

unterteilt werden. In beiden Fällen kann jedoch ein Wunsch zum Fahrstreifenwechsel anstehen.

- Akuter Handlungsbedarf: Abstand und Differenzgeschwindigkeit liegen in Größenordnungen, die ein Verzögern unbedingt notwendig machen. Die Grenze ist gegeben, wenn die notwendige Verzögerung über einem bestimmten Schwellenwert liegt, der für die hier vorliegende Untersuchung auf $1,0 \text{ m/s}^2$ gesetzt wurde. Das Fahrzeug reagiert zuerst auf seinen Vordermann mit dieser Verzögerung, bevor sein Fahrer eine Überholmöglichkeit prüft.
- Handlungsspielraum vorhanden: Der Fahrer hat die Möglichkeit, zuerst die Konstellation auf dem links gelegenen Fahrstreifen zu prüfen, um gegebenenfalls das vorausfahrende Fahrzeug ohne vorherige Verzögerung überholen zu können.
- Folgevorgang: Das Fahrzeug fährt mit angepaßter Geschwindigkeit hinter dem Vordermann her. Unterschieden werden hier zwei Verhaltensmuster:
 - Ein Überholwunsch ist vorhanden, kann aber aufgrund der Situation auf dem weiter links gelegenen Fahrstreifen nicht erfolgen.
 - Das Beharren hinter einem Fahrzeug wird akzeptiert, da das Fahrzeug entweder nicht schneller fahren will als das Vorausfahrende oder die Differenz zur Wunschgeschwindigkeit annehmbar ist bzw. diese außerhalb seines Empfindungsbereiches liegt. Der Fahrer prüft einen Rechtswechsel oder verharrt auf dem Fahrstreifen.

Fährt das FFE außerhalb des Reaktionsbereiches zu seinem eventuell vorhandenen Vordermann, so soll der Fahrer, falls er nicht bereits ganz rechts fährt, die Situationen auf dem rechten Fahrstreifen für einen Wechsel nach rechts prüfen. Grundsätzlich wird für jedes einzelne FFE zuerst eine Berechnung der Interaktionswerte zum Vordermann durchgeführt. Im Fall des akuten Handlungsbedarfs unterbleibt die Überprüfung der Interaktionspartner auf den Nachbarstreifen.

Überholt wird auf dem linken Fahrstreifen, nur im Falle des sehr dichten Verkehrs kann auch der rechte Fahrstreifen herangezogen werden (siehe Kap. 2.1.3).

Eine Reaktion auf den Vordermann findet immer statt, sei er nun der unmittelbar auf dem Fahrstreifen vorausfahrende oder der neue Vordermann nach einem Fahrstreifenwechsel. Eine Ausnahme bildet die „Freie Fahrt“,

bei der entweder kein Vordermann vorhanden oder der Abstand so groß ist, daß er außerhalb des Reaktionsbereiches liegt.

Diese Vorgehensweise soll durch eine prozeßorientierte Darstellung mittels Petrinetze verdeutlicht werden (Abb. 13). Die beiden unabhängigen Prozesse „Fahrer“ und „Sicherungseinrichtung“ erzeugen anhand ihrer Wahrnehmung bzw. Messung von Differenzabständen und -geschwindigkeiten Wünsche bzw. berechnete Werte für die Fahrzeugbeschleunigung / -verzögerung. Das Struktogramm zeigt den Ablauf, der mit der Berechnung eines einzuhaltenden Beschleunigungswerts nach Gleichung 14 beginnt, um dann anhand der Interaktionsgrößen des Fahrers eine von diesem gewünschte Beschleunigung zu ermitteln. Dieser Wert wird dann mit dem der Sicherheitseinrichtung verglichen und der kleinere der beiden in der Fahrzeugbewegung realisiert. Diese Vorgehensweise soll es dem Fahrer ermöglichen, stärker zu bremsen als es die Sicherheitseinrichtung für notwendig befindet.

Unterschiede im Verhaltensmuster der einzelnen Fahrzeuge - Abweichungen im Beschleunigungsverhalten - gibt es nur solange, wie die vorgegebene Sicherheitsgrenze nicht unterschritten wird. Das bedeutet, daß die FFE zu einem sicheren Fahren gezwungen werden, wenn sie in die „Grenzregion“ des sicheren Abstands kommen.

Die Berechnung der Beschleunigung für freies Fahren soll an dieser Stelle nur erwähnt werden. Sie ist ohne weitere Modifikationen aus WETTERLING (1980) bzw. HUBSCHNEIDER (1983) übernommen worden, die auf der Routine WUNSCH (siehe Kap. 2.2.3) von WIEDEMANN aufbauen. In den genannten Arbeiten wird dieses freie Fahren gewählt, soweit es möglich ist. Ein vorhandenes Gefährdungspotential durch ein anderes Fahrzeug kann jedoch die überlagerte Sicherheitseinrichtung ebenfalls zum Eingreifen veranlassen.

4.1.3 Verhaltensstrategie der Fahrer- Fahrzeug- Einheit

Die oben angeführte Abfolge zeigt bereits, daß es mehrere Möglichkeiten gibt, die Prozesse „Abstandsverhalten Fahrer ↔ Sicherheitseinrichtung“ zu verknüpfen. Im Forschungsprogramm PROMETHEUS (Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) wird intensiv an der Frage gearbeitet, wie verschiedene Fahrer-Informationssysteme das Fahrerverhalten beeinflussen. Es handelt sich hier in der Hauptsache um informative Systeme, die die Reaktionszeit eines Fahrers herabzusetzen versuchen. Diese Systeme verbessern im allgemeinen die Sicherheit deutlich, bieten jedoch keinen sicheren Schutz vor Auffahrunfällen.

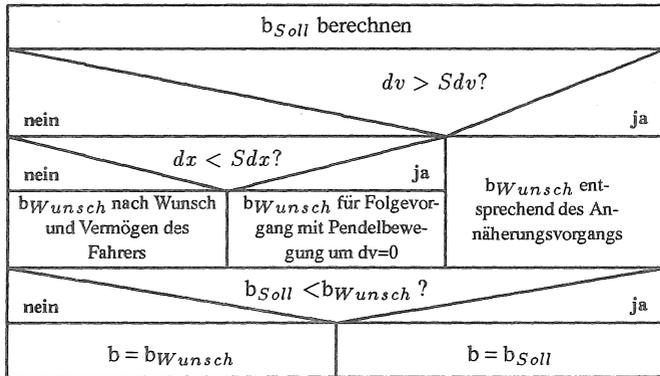
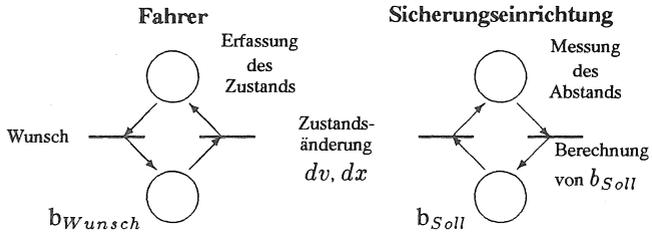


Abb. 13: Struktogramm zum Interaktionsablauf. Die beiden unabhängigen Prozesse „Fahrer“ und „Sicherungseinrichtung“ werden durch die Petrinetzdarstellung abgebildet. Das Diagramm zeigt den tatsächlichen Ablauf.

Ein weiterer Bereich der Forschung liegt bei vollautomatisch arbeitenden, gepulkten Systemen, deren Betrachtungsweise den Untersuchungen von Kleinkabinebahnen recht nahe kommen (SNV, 1974). In dieser Arbeit wurde Wert auf eine Einrichtung gelegt, die zwar dem Fahrer Spielraum für die eigene Fahrweise läßt, jedoch eingreift, wenn der Sicherheitsabstand unterschritten wird. Für den Arbeitspunkt des Eingreifens der Einrichtung kann es wiederum unterschiedliche Strategien geben. So kann ein Ziel die Vermeidung eines Rucks beim Übergang vom freien Fahren hin zum Eingriff der Sicherheitseinrichtung sein. In den Untersuchungen der SNV (1974) beispielsweise wurden Ruckbegrenzungen ($d\ddot{x}/dt$) für Kabi-

nenbahnsysteme von $1,5 \text{ m/s}^3$ betrachtet.

Die in dieser Arbeit verwendete Strategie betrachtet die Verzögerung als Maßstab für den Einsatz, und die Beschleunigung des FFE wird von dem Moment an von der Sicherheitseinrichtung bestimmt, von dem der Wert der notwendigen Verzögerung kleiner ist als die momentane. Ein deutlicher Ruck wird dann nur auftreten, wenn der Fahrer sich in diesem Moment in einer Beschleunigungsphase befand oder wenn der Fahrer ein geringes Sicherheitsbewußtsein besitzt und einen kleineren Folgeabstand als zulässig wählen möchte. Das Zeitverhalten ist ein weiterer kritischer Punkt, der in Abschnitt 4.4.2 eingehend betrachtet wird.

4.1.4 Beschleunigungs- und Bremsverhalten

Die im Simulationsmodell verwendeten Brems- und Beschleunigungswerte sind von verschiedenen Einflüssen abhängig. Da sind zum einen die rein fahrzeugtechnisch realisierbaren Möglichkeiten, die vom technischen Stand des Fahrzeugs abhängig sind. Hinzu kommen die Witterungseinflüsse, die beispielsweise den Reibkoeffizienten der Straße verändern. Weiter ist die Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn bereits ein wesentlicher Faktor. Längsneigungen der Fahrbahn haben ebenfalls einen mehr oder weniger deutlichen Einfluß auf die Brems- und Beschleunigungswerte. Deswegen werden maximale Brems- und Beschleunigungswerte über Verteilungen in den Eingabedaten vorgegeben.

Es sind die Werte anzugeben, die unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten, der Witterungsbedingungen und der Fahrbahnbeschaffenheit maximal erreichbar sind. Sollen unterschiedliche Reibkoeffizienten untersucht werden, so hat dies durch getrennte Simulation der zu betrachtenden Fälle zu geschehen. WIEDEMANN (1974) verwendete für seine Simulationen folgende Beschreibungen für den Einfluß der momentanen Geschwindigkeit auf das momentane Brems- (BMIN) bzw. Beschleunigungsvermögen (BMAX) vom Fahrzeug i (Pkw):

$$\begin{aligned} \text{BMAX} &= (0.2 + 0.8ZF3_i) * (7 - \sqrt{v_i}), \text{ bzw.} \\ \text{BMIN} &= -8 - 2ZF3_i + 0.5\sqrt{v_i} \end{aligned}$$

Hierin ist ZF3 eine (0.5, 0.15) - normalverteilte Größe, mit der die Brems- und Beschleunigungsvorgänge beschrieben werden.

In HUBSCHNEIDER, LEUTZBACH, WIEDEMANN (1977) ist der Zusammenhang zwischen der maximalen Geschwindigkeit und dem maximalen Beschleunigungsvermögen für Pkw wie folgt angegeben (v und v_{MAX} in $[m/s]$):

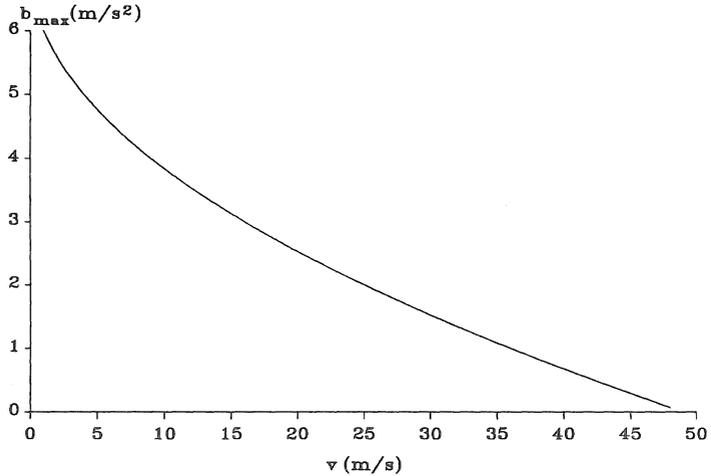


Abb. 14: Beispiel für den Verlauf des Beschleunigungsvermögens eines Pkw über seiner Geschwindigkeit.

$$b_{Max} = 0.06(v_{Max} - v)$$

In SCHWERTFEGER (1987) findet man eine Zusammenfassung von modellhaften Beschreibungen der Zusammenhänge zwischen dem Beschleunigungsvermögen einerseits und der Maximalgeschwindigkeit bzw. Wunschgeschwindigkeit andererseits.

Das Simulationsprogramm berechnet die Einflüsse der momentanen Geschwindigkeit (siehe Abbildungen 14 und 15) und der Fahrbahngradienten auf diese beiden Werte. Die Fahrbahngradienten finden durch die Rechenanweisung

$$b = b_0 - \frac{s}{100} * G$$

Berücksichtigung. b_0 ist die unter den gegebenen Umständen realisierbare Geschwindigkeitsänderung auf ebener Fläche, s ist die Gradienten der Fahrbahn in Prozent³ und G ist das Fahrzeuggewicht.

³Bei den betrachteten kleinen Winkeln wird die vereinfachende Annahme getroffen, daß der Tangens durch den Sinus substituiert werden kann.

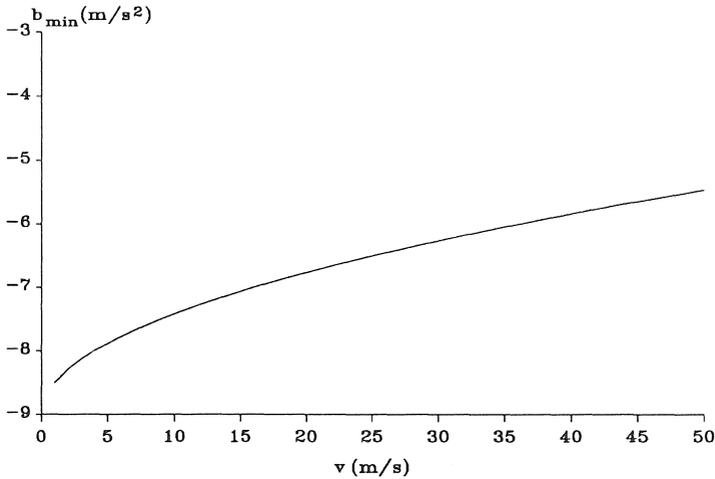


Abb. 15: Beispiel für den Verlauf des Bremsvermögens eines Pkw über seiner Geschwindigkeit.

In Abbildung 16 ist das Beschleunigungsverhalten eines Pkw über seiner Geschwindigkeit mit dem Parameter der Wunschgeschwindigkeit aufgetragen. Die Größe b_{max} entspricht dem nach Abbildung 14 resultierenden Beschleunigungsvermögen. Die hier verwendeten Zusammenhänge sind nachfolgend nochmals zusammengefaßt.

$$\begin{aligned}
 \text{Beschleunigungsverhalten :} & \quad b_{max} - \sqrt{v} \\
 \text{Bremsverhalten :} & \quad b_{min} + 0.5\sqrt{v} \\
 \text{Beschleunigung - Wunschgeschwindigkeit :} & \quad (v_w - v)b_{max} \\
 \text{Gradienteneinfluß :} & \quad b - \frac{s}{100} * G
 \end{aligned}$$

Ergänzend zu den Untersuchungen über den Ablauf bei reinem Pkw- Verkehr wurde der Einfluß des Lkw - Anteils an einigen Beispielen betrachtet. Hierzu ist es notwendig, für Lkw ebenfalls eine Beschreibungsform für die Zusammenhänge zwischen der Geschwindigkeit und dem Brems- bzw. dem Beschleunigungsvermögen zu finden. In BRANNOLTE (1980) sind Ausführungen zu diesem Thema zusammengefaßt. BRANNOLTE wählte einen linearen Zusammenhang zwischen dem Bremsvermögen und der Ge-

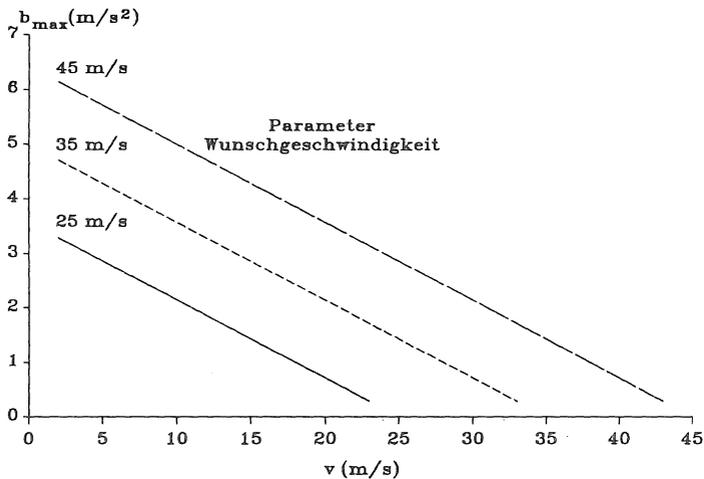


Abb. 16: Mögliches Beschleunigungsverhalten von Pkw über der Momentangeschwindigkeit und dem Parameter ihrer Wunschgeschwindigkeit.

schwindigkeit mit

$$-5.0 + 0.1 * v - 2.0 * ZF3,$$

wobei die Größe ZF3 äquivalent zu der bei WIEDEMANN verwandten Größe ist. Für das Beschleunigungsvermögen der Lkw entwickelte HUBSCHNEIDER (1983) aus den Untersuchungen BRANNOLTES einen Regressionsansatz, mit dem die vorliegenden Meßwerte simulationstechnisch einfacher zu behandeln waren. Der Ansatz kann für eine erste Untersuchung durchaus verwendet werden, da sich zwar die Motorisierungsleistung erhöht hat, aber gleichzeitig auch die zulässigen Lasten gestiegen sind. Der Ansatz sieht wie folgt aus:

$$-0.332 + 0.135 * KW/t * e^{((-0.054 - 0.00192 * KW/t) * v)}$$

Die vorzugebende Verteilung für die effektive Leistung (KW/t) kann durch eine empirische Verteilung angenähert werden, die die folgenden Stützstellen besitzt:

0	15	50	85	100	[%]	
7	9	12	22	30	[KW/t]	

Diese Berechnungsmethodik soll auch in der vorliegenden Untersuchung Verwendung finden.

Die Berechnung des Beschleunigungsvermögens geht in folgender Reihenfolge vor sich:

1. Berechnung der gewünschten Beschleunigung als Funktion der Wunschgeschwindigkeit, dann
2. Berechnung der möglichen Beschleunigung als Funktion der Geschwindigkeit.

4.2 Modell des Fahrstreifenwechsels

Für mehrstreifigen Verkehrsablauf ist eine Strukturierung der Wechselentscheidungen die zur Erzeugung eines Wechselwunsches führen und die Formulierung eines Ablaufs – Prüfung auf Wechselmöglichkeit und Durchführung des Wechsels – notwendig. Als Grundlage zur algorithmischen Beschreibung dieser Vorgänge ist darüberhinaus eine Technik zur Abbildung auf Rechenanlagen erforderlich.

4.2.1 Allgemeine Überlegungen

In YOUNG et.al. (1989) sind Überlegungen für ein Fahrstreifenwechselmodell angestellt worden, wobei die Autoren von der Frage der Möglichkeit, der Notwendigkeit und dem Wunsch nach einem Fahrstreifenwechsel ausgehen. Typische Fälle, die zu einer anstehenden Entscheidung führen, sind:

- Existieren feste Hindernisse irgendeiner Art auf der eigenen Fahrbahn oder auf Nachbarstreifen?
- Sind Lkw auf dem Fahrstreifen?
- Einhaltung der gewünschten Geschwindigkeit?

Die Autoren stellen damit ein Modell vor, das im wesentlichen den Entscheidungsprozeß nachbildet, der einen Fahrer zu seiner Wechselentscheidung führt. Das Modell besitzt jedoch für deutsche Verhältnisse Schwächen, die z.T. aus dem im Heimatland der Autoren erlaubten „stay-in-lane“-Fahren herrühren. Von Momentan-Werten ausgehend sucht das Modell einen Zielfahrstreifen, der einen aktuellen Vorteil verspricht. Berücksichtigt

werden dabei allerdings feste Hindernisse und Lkws auch weiter stromabwärts. Nicht berücksichtigt wird z.B. das mittlere Geschwindigkeitsniveau auf dem Zielfahstreifen in bezug auf die eigene Wunschgeschwindigkeit. Dies rührt vom australischen Geschwindigkeits- und Fahrverhalten her. Deshalb basiert das hier beschriebene Fahrstreifenwechselmodell auf dem Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten bundesdeutscher Schnellstraßen.

FERRARI (1989) beschreibt eine mögliche Modellvorstellung so: Jeder Fahrer besitzt einen Wunschfahrstreifen und wird diesen nur unter gewissen Bedingungen kurzzeitig verlassen. Im Rahmen seines Wunsches, diesen Fahrstreifen beizubehalten, wird er einen Schwankungsbereich nach oben und unten um seine tatsächliche Wunschgeschwindigkeit akzeptieren. Erst wenn diese Grenzen über- bzw. unterschritten sind, sieht sich der Fahrer zum Verlassen des Fahrstreifens veranlaßt. Daraus ergeben sich folgende zu berücksichtigende Punkte:

- Auf einem Fahrstreifen hinter einem langsameren Fahrzeug beharren, bis entweder die akzeptierte Minderung der Wunschgeschwindigkeit unterschritten ist oder bis eine gewisse Verweildauer überschritten ist
- Wechsel des Fahrstreifens, um einem schnelleren Fahrzeug Platz zu machen
- Versuchen, wieder auf den gewünschten Fahrstreifen zu wechseln
- Berücksichtigung des Rechtsfahrgebots, wenn mehr als 10 s auf dem rechten Fahrstreifen ohne Geschwindigkeitsminderung gefahren werden kann.

Zur Modellierung sind aber auch folgende Aspekte zu berücksichtigen:

1. Alle Fahrzeuge werden mehr oder weniger versuchen, sich auf der Mitte des Fahrstreifens zu bewegen.
2. Der Bewegungsbereich eines Fahrzeugs wird durch die flächige Ausdehnung (Breite und Länge) des Fahrzeugs, der sie umgebenden Verkehrsteilnehmer sowie der verfügbaren Fahrbahnbreite eingeschränkt.
3. Einhaltung der Sicherheitsabstände während des Wechsels.

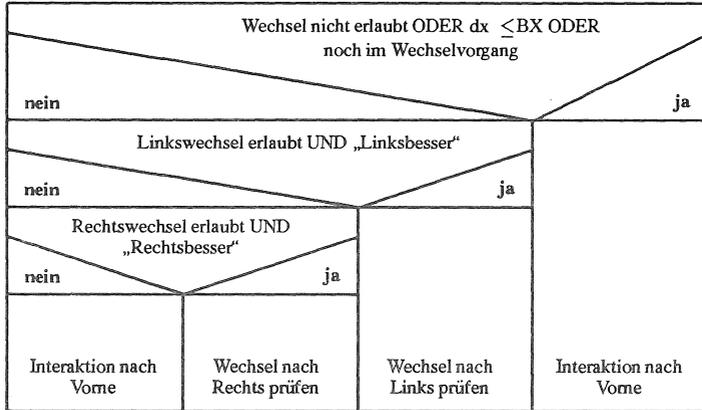
Bei einer Umsetzung im Modell sind demnach die oben definierten Punkte zu beachten. Wechselvorgänge auf BAB wurden bereits in früheren Arbeiten untersucht. So führte die Arbeit von SPARMANN (1978) zu umfangreichem empirischen Material, das eine Kalibrierung der simulierten Streifenwechselvorgänge erlaubte. WETTERLING (1980) untersuchte Wechselvorgänge auf Schnellstraßen bei unterschiedlichen Fahrvorschriften. Diese Arbeiten können als Grundlage für eine Modellierung herangezogen werden.

Eine realistische Nachbildung der Wechselvorgänge muß Zustände, die zwischen den beiden Endpunkten eines Fahrstreifenwechsels - Ausgangs- und Zielfahrstreifen - auftreten können, abbilden können. Dies scheint aber nur über eine flächige Betrachtungsweise aller Bewegungsvorgänge präzise möglich zu sein. Dies gilt besonders für sehr dichten Verkehr oder für Engstellen. Abbildung 11 kann bereits entnommen werden, welche Modellvorstellung hinter der flächigen Betrachtungsweise steht. Stellt man sich die miteinander reagierenden Fahrzeuge als Rechtecke vor, die aus den Fahrzeugabmessungen zuzüglich eines jeweilig individuellen Sicherheitsabstandes bestehen, so kommt man zu den Grundzügen der hier realisierten Modellierung.

4.2.2 Entscheidungsstruktur für Fahrstreifenwechsel

Abbildung 17 gibt das Struktogramm für die Wechselentscheidung wieder. Hierin ist auch die zugrunde gelegte Fahrphilosophie enthalten. Fahren die FFE beispielsweise entweder nach der StVO oder nach dem Prinzip der freien Fahrstreifenwahl (siehe WETTERLING, 1980), so unterscheiden sich die entsprechenden Grenzen und Aktionsabfolgen im Struktogramm.

Von vielen möglichen Strategien wird ein hypothetisches Verhalten realisiert, das sich z.T. auf das Rechtsfahrgebot stützt, z.T. die eingangs erwähnten Überlegungen berücksichtigt und z.T. durch Schwellenwerte beeinflussbar ist. Es wird ein Schwellenwert ($SdVw$ = Schwellenwert für den Betrag der Wunschgeschwindigkeitsunterschreitung) eingeführt, der als Differenz zwischen der Wunschgeschwindigkeit und der momentanen Geschwindigkeit definiert sein soll. Überschreitet die durch ein langsamerer Fahrzeug verursachte Minderung der Wunschgeschwindigkeit einen eingestellten Grenzwert, versucht das Fahrzeug zu überholen. Hinter dieser Methode steckt die Idee, durch diesen Schwellenwert die Häufigkeit der Überholvorgänge zu beeinflussen. Es wird angenommen, daß diese Schwelle die Funktion eines Schalters haben könnte, der die Leistungsfähigkeit beeinflusst. Ein Beispiel soll diese Überlegungen verdeutlichen: Ein Kapazitätsgewinn könnte bei zwei Fahrzeugen auf 1 km Untersuchungsstrecke $\Delta q = 2 * (V_{w2} - V_{w1})$ betragen. Es soll gelten: $V_{w1} = v_1$ für das Führungsfahrzeug und $V_{w2} > v_2 = v_1$. Die Wunschgeschwindigkeit des Folgefahrzeugs ist größer als seine momentane, die wiederum der Wunschgeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs entspricht. Auf der anderen Seite der Kapazitätsbilanz steht die größer werdende Wahrscheinlichkeit, daß mit zunehmender Dichte ein schneller fahrendes Fahrzeug auf dem links gelegenen Fahrstreifen behindert wird. Im obigen Beispiel unter zusätzlicher Berücksichtigung eines herannahenden Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen mit



- „Rechtsbesser“: (Annäherung von Hinten erkannt UND dv von Hinten $>$ dv nach Rechts vorne UND ΔVw von Hinten $>$ $ObVw$ Wert) ODER (Fahrstreifen $>$ Zielfahrstreifen UND dv nach Rechts vorne $<$ 0.0) ODER (dx Rechts vorne $>$ 10 s).
- „Linksbesser“: (Fahrzeug im Folgezustand) UND ($Vw - v > SdVw$) UND (ΔVw nach Vorne $>$ ΔVw nach Links hinten).

Abb. 17: Struktogramm zur Fahrstreifenentscheidung

$v_3 = V_{w3} > V_{w2}$ ergibt sich:

$$\Delta q = 3 * ((V_{w2} - V_{w1}) + (V_{w2} - V_{w3}))$$

Man sieht, daß unter bestimmten Konstellationen ein gewisser „Sortiereffekt“ mit diesem Schwellenwert erzielt werden könnte. Bei geschickter Beeinflussung des Schwellenwertes können sich die langsameren Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen und die schnelleren auf dem linken sammeln. Man kann vermuten, daß die Differenz so groß sein muß wie der Unterschied der mittleren Geschwindigkeiten auf den einzelnen Fahrstreifen.

Das Struktogramm gibt folgenden Ablauf wieder: Ist ein Wechsel nicht erlaubt oder befindet sich das Fahrzeug im Moment unter dem Einfluß der Sicherheitseinrichtung, so unterbleibt der Fahrstreifenwechsel. Befindet sich das Fahrzeug im Folgezustand, so wird der linke Fahrstreifen dahingehend

überprüft, ob der Verkehrszustand dort günstiger ist für den Geschwindigkeitswunsch. Falls nicht, überprüft das FFE den rechten Fahrstreifen. Berücksichtigt werden müssen dabei die verschiedenen parameterisierten Schwellenwerte, deren allgemeiner Einfluß auf den gesamten Verkehrsablauf untersucht werden soll. So gehen das Unterschreiten der Differenz $V_w - SdVw$ sowie das Herannahen eines schneller fahrenden Fahrzeugs in die Entscheidung für einen Überholvorgang ein. Will das FFE nicht nach links, so wird die Möglichkeit geprüft, ob die angestrebte Fahrweise auf dem rechten Fahrstreifen möglich ist. Grundlage für eine Entscheidung ist eine mehr als 10 s unbeeinflusste Fahrweise bei beibehaltener Geschwindigkeit.

Mit dem Schwellenwert $SdVw$ kann man demnach die Anzahl der Rechtsüberholungen steuern, denn bei geringen Werten von $SdVw$ wird sehr schnell der Überholwunsch gebildet und demnach der rechte Fahrstreifen nicht mehr überprüft.

4.2.3 Ablauf des Fahrstreifenwechselvorgangs

Die Modellierung des Wechselvorgangs an sich ist ein weiterer wichtiger Schritt hin zur Realisierung des Simulationsmodells. Eine bisher häufig verwendete Technik bei der mikroskopischen Simulation ist die sogenannte „Spurkettenmechanik“ (HUBSCHNEIDER, 1983), bei der die FFE auf jedem Fahrstreifen wie auf einer Kette hintereinander angeordnet sind. Die Ketten auf den einzelnen Fahrstreifen sind unabhängig voneinander. Diese Verkettungstechnik wird bei normalem Verkehrsablauf mit freiem oder teilgebundenem Verkehr zumindest makroskopisch die gleichen Resultate erzielen wie das hier entworfene. Die Überlegungen dieser Arbeit führen zu einem System, das die Vorteile der fahrstreifenbezogenen Behandlung mit denen der detaillierten Behandlung der Querbewegung verbindet. Dies verspricht besonders im dichten Verkehrsablauf und in Engpaßsituationen eine feinere Betrachtungsmöglichkeit.

Es ist aus rechentechnischen Gründen sinnvoll, dem FFE Interaktionspartner vor der Berechnung der Interaktionsgrößen zuzuordnen. Es wird also zwischen jedem Rechen- und Bewegungsschritt eine Systemordnung hergestellt. Da für einen mehrstreifigen Verkehrsablauf Interaktionspartner rechts und links vorhanden sein können und zudem eine Unterscheidung zwischen vorneliegend und hintenliegend sinnvoll scheint, werden insgesamt sechs sogenannte „Zeiger“ für jedes FFE bereitgestellt.

Aufgrund der sich für jeden Zeitschritt ergebenden neuen Positionen der Fahrzeuge werden für alle Fahrzeuge deren primäre Interaktionspartner für die sechs Richtungen Vorne, Hinten, Rechts und Links Vorne bzw. Hinten

neu ermittelt. Über sie kann die Erreichbarkeit aller gewünschten Interaktionspartner schnell realisiert werden (siehe Abbildung 18).

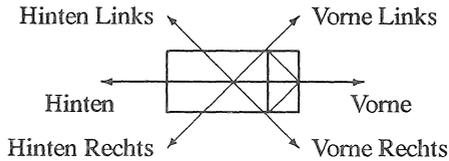


Abb. 18: Schematische Darstellung eines FFE mit den Zeigern, die die Verknüpfung zu anderen FFE ermöglichen.

Die oben angesprochene Ordnung wird von der „Systemverwaltung“ durchgeführt. Die Zeiger werden mit folgender Reihenfolge und damit auch Priorität belegt:

1. „Vorne“: Es wird der Bereich abgedeckt, der der Breite des Fahrzeugs (incl. Sicherheitsabstand) entspricht und der bis zur maximalen Entfernung reicht, die für eine Beeinflussung in Frage kommt.
2. „Rechts, Links Vorne“: Die beiden seitlichen Zeiger können den Bereich des 1. bzw. 4. Quadranten, begrenzt durch die Längs- und Querachse des Fahrzeugs, abdecken. Belegt bereits ein anderer Zeiger („Vorne“) das in Frage kommende Fahrzeug, so muß ein anderes Fahrzeug gesucht werden, ebenfalls wieder bis zur maximalen Reaktionsentfernung.
3. „Rechts, Links Hinten“: Analog zu „Rechts“, „Links Vorne“, wird der Bereich des 2. bzw. 3. Quadranten abgedeckt. Auch für sie gilt: Belegt bereits ein anderer Zeiger („Rechts“, „Links Vorne“) das in Frage kommende Fahrzeug, so muß ein anderes Fahrzeug gesucht werden.
4. „Hinten“: Zuletzt wird der Heckzeiger belegt. Für ihn gilt sinngemäß das gleiche wie für den Front-Zeiger. Auch für ihn muß ein freies Fahrzeug gefunden werden.

Somit gilt für das 7-Tupel (i, j, k, l, m, n, o) , in dem i das betrachtete Fahrzeug sein soll und die anderen dessen unmittelbare Nachbarn, auf die seine Zeiger gesetzt sind:

$$i \neq j \neq k \neq l \neq m \neq n \neq o$$

wobei $j..o = \{\}$ sein kann. Das bedeutet, daß es in maximaler Reaktionsentfernung kein Fahrzeug gibt (siehe auch „Fallunterscheidungen für den

Fahrstreifenwechsel“). Die Erreichbarkeit aller gewünschten Fahrzeuge in der Umgebung des FFE sind somit für die Bereiche

Δx : nach vorne und hinten bis zu der Grenze, bis zu der ein Fahrer reagiert,

Δy : von rechtem bis linken Fahrbahnrand,

gewährleistet. Die in die Berechnung der FFE-Situation eingehenden Fahrzeuge sind im Kapitel „Fallunterscheidungen für den Fahrstreifenwechsel“ beschrieben. Durch die hier angewandte Technik sind auch Situationen wie in Bild 19 handhabbar:

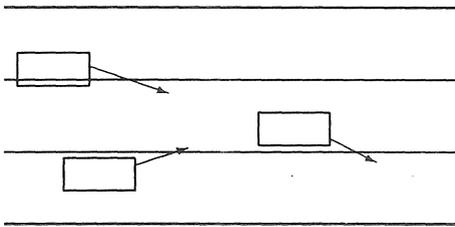


Abb. 19: Beispiel für die funktionale Handhabbarkeit flächenorientierter Betrachtungsweise.

Sowohl die Interaktion zum rechten oder linken Nachbarn als auch zu etwaigen Nachfolgern wird über die gleiche Schwellenwertberechnung und -beurteilung durchgeführt, wie sie für den Vordermann gilt. Es lassen sich gerade im Bereich des Verhaltensansatzes der Interaktion zu Nachbarn und Nachfolgern durchaus andere Ansätze vorstellen. Doch in bezug auf die Simulation dürfte dies den geringsten Einfluß haben, da die Sicherheit ja unabhängig von den Wahrnehmungsfähigkeiten des Fahrers durch Berechnung des sicheren Abstands eingehalten wird.

4.2.4 Aktionsabfolge zur Prüfung von Fahrstreifenwechseln

Das Struktogramm in Abb. 20 zeigt die Reihenfolge und Entscheidungskriterien zur Prüfung einer Wechselmöglichkeit. Die Abfolge setzt voraus, daß der Wunsch zum Wechsel, der durch die Entscheidungsabfolge des Struktogramms aus Abb. 17 erzeugt wird, besteht. Maßgeblich für die

Überprüfung sind die beiden FFE, die über die beiden Zeiger „Rechts“ bzw. „Links Vorne“ und „Hinten“ erreichbar sind.

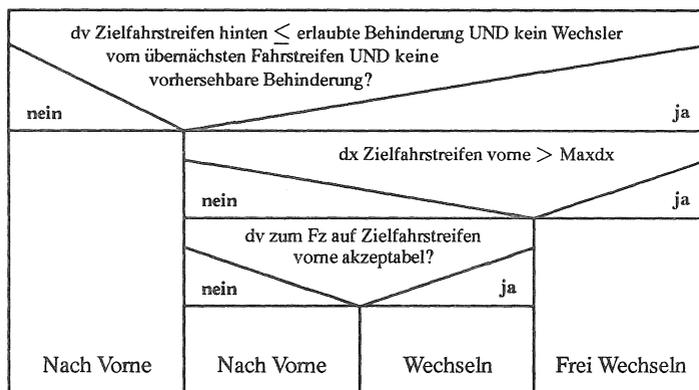


Abb. 20: Struktogramm zur Überprüfung der Wechsellmöglichkeit.

Es gibt zwei Bedingungen, die erfüllt sein müssen, bevor der rechte bzw. linke Vordermann näher betrachtet wird. Zuerst muß eine etwaig notwendige Verzögerung eines Nachfolgenden kleiner sein als die sogenannte Behinderungsgrenze. Zum zweiten darf kein Fahrzeug im Bereich zwischen den beiden FFE vorne und hinten auf dem Nachbarfahrstreifen bereits heranzwecheln.

Sind die Bedingungen erfüllt, wird die Entfernung zum neuen Vordermann auf dem Zielfahrstreifen überprüft. Ist der Vordermann außerhalb des Reaktionsbereichs, kann das FFE frei wechseln. Im Reaktionsfall wird die notwendige Reaktion betrachtet. Bei einer eventuell notwendigen Verzögerung zur Geschwindigkeitsanpassung wird zwischen rechts und links unterschieden.

Für den Linkswechsel gilt:

- | | | |
|------------------------|---|----------------------|
| $v_{Soll} - v < 0.0$ | → | Nicht |
| $d_y >$ Streifenbreite | → | Frei |
| sonst | → | Wechsel mit Reaktion |

Für den Rechtswechsel gilt:

$v_{Soll} - v < \text{Behinderungsgrenze}$	→	Nicht
$dy > \text{Streifenbreite}$	→	Frei
sonst	→	Wechsel mit Reaktion

Im Gegensatz zum Fahrstreifenwechsel nach rechts wird ein Fahrzeug nicht nach links gedrängt werden können. Es wird nur dann nach links wechseln, wenn ein Vorteil mit diesem Wechsel verbunden zu sein scheint. Der Wechsel wird unterbleiben, wenn die Situation auf dem linken Fahrstreifen ungünstiger als die auf dem eigenen ist.

4.2.5 Algorithmen zur Überprüfung der Nachbarfahrzeuge

Die mit den Entscheidungen aus dem Struktogramm aus Abb. 20 gebildeten Möglichkeiten zum Fahrstreifenwechsel führen zu Fallunterscheidungen bezüglich der jeweils in Frage kommenden Nachbarn. Es werden verschiedene Situationen unterschieden. Die maximale Konfiguration ist in Abb. 21 zu sehen. Darüber hinaus existieren diverse Abstufungen, mit denen die Behandlung vereinfacht werden soll. Tabelle 3 unterteilt die Fälle 1 bis 6 (ohne Fahrzeug auf übernächstem Fahrstreifen) und 7 bis 11 (mit Fahrzeug auf übernächstem Fahrstreifen) ⁴. Die Fallunterscheidung wird hier exemplarisch an einem Überholvorgang dargestellt.

Aus Tabelle 3 geht hervor, daß es drei Routinen gibt, die über Wechseln oder Nicht Wechseln entscheiden und eine weitere, die, falls die vorhergehenden Prüfungen positiv ausgefallen sind, etwas differenzierter entsprechend den oben angeführten drei Ergebnismöglichkeiten (Frei, Reagiert, Nicht) über die Art des Wechsels entscheidet. Die ersten drei Routinen unterscheiden nicht zwischen rechts und links, die in Tab. 3 angeführte Routine „VorneOk“ wird hingegen in „VorneLinksOk“ und „VorneRechtsOk“ differenziert.

HintenNebenOk Ermittelt wird die Geschwindigkeit, die der neue Hintermann einzunehmen hätte, wenn das prüfende Fahrzeug sein neuer Vordermann würde. Übersteigt eine hierfür notwendige Bremsaktion dieses Hintermannes eine bestimmte, vorgebbare Grenze, so ist das Ergebnis „Nicht wechseln“. Mit dieser Grenze kann ein Grad der Behinderung für den neuen Hintermann vorgegeben werden. Dies ist die bereits beschriebene **Behinderungsgrenze**.

Sie wird nach folgendem Ansatz berechnet:

$$b_{notwendig} = \frac{v_{sicher} - v_{aktuell}}{T}$$

⁴Auch beim vierstreifigen Verkehrsablauf wird nur bis zum übernächsten Fahrstreifen kontrolliert, da die Algorithmen so ausgelegt sind, daß ein Fahrzeug innerhalb eines Zeitschritts nicht über zwei Fahrstreifen wechseln kann.

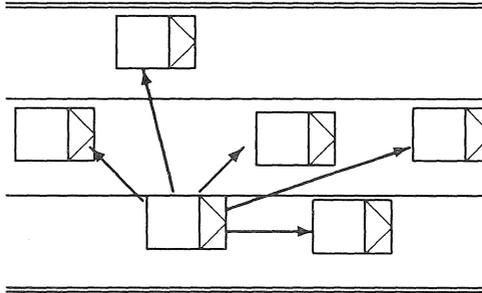


Abb. 21: Situation zur Überprüfung der Nachbarfahrzeuge. Am Beispiel des gewünschten Linkswechsels ist die Anordnung dargestellt, die maximal überprüft wird. Bis zu dieser maximalen Gruppierung gibt es 10 Abstufungen.

1. $b_{notwendig}$: notwendige Verzögerung
2. v_{sicher} : sichere Folgegeschwindigkeit nach Gleichung 11
3. T: Zeitschritt⁵

NebenspurOk : Überprüft wird hier der Vordermann des auf dem Nebestreifen vorausfahrenden Nachbarn, also der übernächste Vordermann auf dem Nachbarstreifen. Wird hier aktiv gebremst ($b < \text{Komfortgrenze}$), so ist zu erwarten, daß sich die Situation auf dem Nebestreifen für einen Fahrstreifenwechsel verschlechtern wird. Das mit dem aktiven Bremsen verbundene Aufleuchten der Bremslichter wird hier durch einen Schwellenwert für die Verzögerung ausgedrückt. Ergebnis der Überprüfung durch die Routine ist dann: „Nicht wechseln“.

KeinWechsler : Ebenfalls nicht wechseln darf ein Fahrzeug, wenn von einem übernächsten Fahrstreifen ein Fahrzeug auf den in Frage kommenden Fahrstreifen wechselt und dieses Fahrzeug vorne liegt oder den gemeinsamen Wunschfahrstreifen früher erreicht (damit ist den in Kapitel 2 angeführten rechtlichen Regelungen entsprochen worden). Überprüft wird der Bereich zwischen den beiden Interaktionspartnern auf dem Nebenfahrestreifen. Als Interaktionspartner werden

⁵Denkbar sind auch andere Modelle, so z.B. mehrere Intervalle für die Verzögerungszeit. Die dargestellte Vorgehensweise wurde jedoch gewählt, um auch den Einfluß scharfer Bremsmanöver untersuchen zu können.

Fall	Bedingungen	Algorithmenkombinationen
1	kein Fahrzeug links	Frei Überholen
2	Fahrzeug links vorne, kein Fahrzeug links hinten	VorneOk
3	kein Fahrzeug links vorne, ein Fahrzeug links hinten	HintenNebenOk
4	Fahrzeug links vorne, Fahrzeug links hinten	HintenNebenOk \rightarrow VorneOk
5	Fahrzeug links vorne, kein Fahrzeug links hinten, linkes Fahrzeug hat Vordermann	NebenspurOk \rightarrow VorneOk
6	Fahrzeug links vorne, Fahrzeug links hinten, linkes Fahrzeug hat Vordermann	NebenspurOk \cap HintenNebenOk \rightarrow VorneOk
7		KeinWechsler \rightarrow VorneOk
8	wie 2 bis 6,	KeinWechsler \cap HintenNebenOk \rightarrow VorneOk
9	jedoch mit einem Fahrzeug	KeinWechsler \cap HintenNebenOk \rightarrow Frei Überholen
10	auf dem übernächsten	KeinWechsler \cap NebenspurOk \rightarrow VorneOk
11	Fahrstreifen	KeinWechsler \cap NebenspurOk \cap HintenNebenOk \rightarrow VorneOk

Tab. 3: Fallunterscheidungen zur Streifenwechselsituation. Dargestellt ist die Tabelle für den Linkswechsel, die Tabelle für den Rechtswechsel kann analog rechts gegen links substituiert werden.

in diesem Fall das auf dem Nebestreifen in Fahrtrichtung nächste vorne und das in Fahrtrichtung nächste hinten betrachtet (siehe hierzu auch die Konstellation in Abbildung 21). Existiert ein wechselndes Fahrzeug, so führt auch dies zu: „Nicht wechseln“.

VorneLinksOk , bzw. VorneRechtsOk: Die Routine, die zwischen „Freiem Überholen“, „Überholen mit Reaktion auf den neuen Vor-

dermann“ und „Nicht Überholen“ entscheidet, arbeitet anhand des im Struktogramm in Abbildung 20 gezeigten Interaktionsablaufs. Die Unterscheidung zwischen den Richtungen erfolgt durch unterschiedliche Schwellenwerte (z. B. Akzeptanz einer Behinderung oder nicht).

Ein linker vorderer Interaktionspartner kann beispielsweise auch auf dem übernächsten Fahrstreifen sein, wenn auf dem nächsten kein Fahrzeug im maximalen Reaktionsabstand ist. Diese Situation wird ebenfalls korrekt erkannt. Das Fahrzeug wird wechseln, wenn der betreffende Interaktionspartner nicht ebenfalls heranwechselt.

In Tabelle 3 werden die Verknüpfungen der Algorithmen angegeben, wobei der Operator „ \wedge “ eine UND-Verknüpfung darstellt und „ \rightarrow “ die Durchführung der Überprüfung bedeutet, falls der durch die Verknüpfung gebildete Ausdruck zutrifft.

An der Stelle „NebenspurOk“ ist noch Raum für Erweiterungen, da vorstellbar ist, daß auch kurzfristige Behinderungen in Kauf genommen werden können. Ein „besserer Zustand“ des links gelegenen Fahrstreifens kann aufgrund des Fahrverlaufs im „Gedächtnis“ gespeichert sein und die momentane Behinderung als kurzfristig erkennen. Es fehlen jedoch die notwendigen Untersuchungen für derartige Zusammenhänge, so daß entsprechende Ansätze intensiver Untersuchung bedürfen.

4.3 Gesamtüberblick über das Simulationssystem

Dem Simulationsmodell wurde die Bezeichnung „SiFa“ (Sichere Fahrzeuge) gegeben. Es besitzt eine Gesamtstruktur, die in der Abbildung 22 vereinfacht dargestellt ist. Dem Initialisierungsteil, der die notwendigen Systeminitialisierungen durchführt, folgt eine kommandogesteuerte Schleife, in der die Eingabedaten eingelesen und die Ausführungen gestartet werden. Die möglichen Kommandos zur Eingabe von Daten sind im Anhang zusammengefaßt in BNF (Backus-Naur-Form) als Referenz aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Kommandos, ihrer Parameter und der Fehlermeldungen kann in der zugehörigen Programmdokumentation (SCHNITTGER, 1991) nachgelesen werden.

Der Benutzer kann nach einer Simulation die Eingabedaten mit der Kommandosprache ändern und erneut weitere Simulationen durchführen. Er befindet sich bis zur expliziten Angabe zur Beendigung in einer Kommando- oder Steuerschleife. Mit der Eingabe des Kommandos „START“ wird die innere Schleife für die vorgegebene Simulationsdauer durchlaufen, wobei

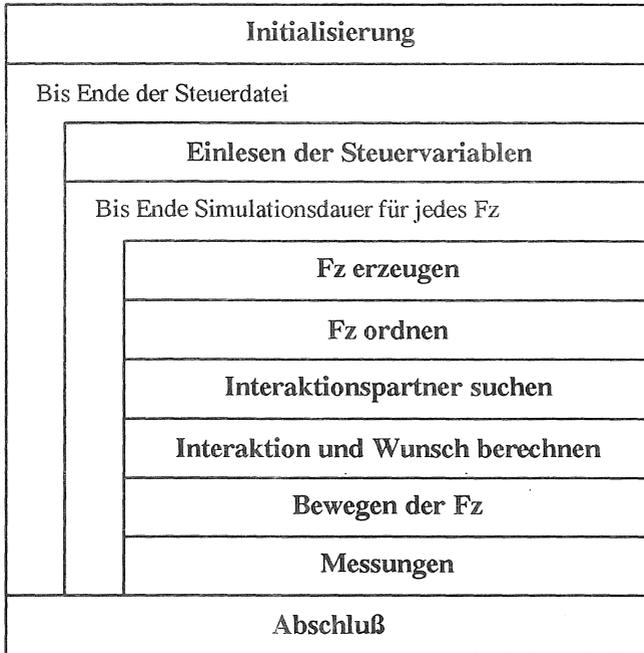


Abb. 22: Struktogramm des Gesamtsystems.

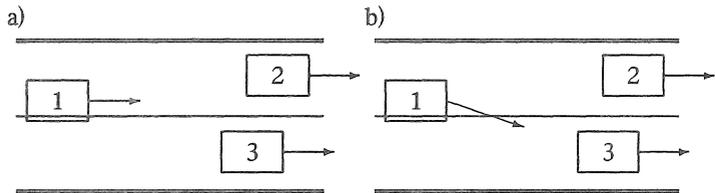
die Zeit nur zum Programmstart auf Null gesetzt und im Fortlauf der Simulationen immer weiter gezählt wird. Die Aufgabe der Systemverwaltung besteht darin, die Fahrzeuge zwischen den Zeitschritten nach aufsteigenden x-Koordinaten, unabhängig von ihrem Fahrstreifen, zu sortieren und den Fahrzeugen anschließend u.U. neue Interaktionspartner entsprechend den beschriebenen Methoden zuzuordnen. Die Systemverwaltung sucht die Interaktionspartner nach folgendem Muster (die FFE werden vor dieser Aktion sortiert):

1. Suchen des Vordermanns
2. Suchen des Hintermanns
3. Suchen des linken Vordermanns
4. Suchen des rechten Vordermanns

5. Suchen des linken Hintermanns
6. Suchen des rechten Hintermanns

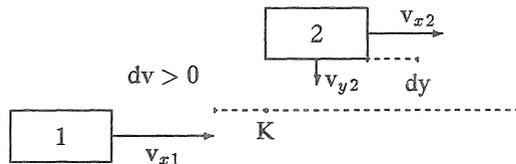
Dabei werden folgende Methoden angewandt: Maßgeblich für den Vordermann und Hintermann ist eine vorhandene Überdeckung (siehe Kapitel 3) mit einem vorliegenden bzw. hintenliegenden FFE. Unterschieden werden zwei Verhaltensmuster.

Das FFE wechselt selbst: Gesucht wird eine Überdeckung nach dem Schema aus Kapitel 3.3.2 unter Berücksichtigung der y -Koordinate nach einem Zeitschritt. Folgendes Beispiel soll dies veranschaulichen:



Im Fall a) fährt das FFE 1 geradeaus. Trotz eines leichten Versatzes zum FFE 2 und einem geringeren Δx zu FFE 3 wird FFE 2 der direkte Vordermann. Im Fall b) wechselt FFE 1 auf den rechten Fahrstreifen. Nach einem Zeitschritt würde eine Überdeckung mit FFE 3 bestehen, dann ist dieses FFE der direkte Vordermann, obwohl sich FFE 1 zum größten Teil noch auf dem linken Fahrstreifen befindet.

Vor dem FFE ist ein Wechsler: Es wird ein Kollisionspunkt ermittelt, der sich aufgrund der Bewegungsvektoren der beiden FFE ergeben würde. Ausschlaggebend für die Bestimmung des Vordermanns für das FFE ist der Zeitpunkt, zu dem jeder der beiden Beteiligten diesen Kollisionspunkt erreicht. Eine derartige Konstellation könnte so aussehen:



In diesem Beispiel ist die Geschwindigkeit von FFE 1 (v_{x1}) größer als die von FFE 2 (v_{x2}). FFE 2 wechselt mit v_{y2} nach rechts. Auch wenn das FFE 2 mehr als einen Zeitschritt benötigen würde, um mit FFE 1 eine Überdeckung

zu erzielen, wird FFE 2 Vordermann von FFE 1, wenn FFE 2 früher am Kollisionspunkt K ist als FFE 1. Würde FFE 1 den Punkt vor FFE 2 erreichen, so sucht sich FFE 1 seinen Vordermann weiter in x - Richtung. FFE 2 erkennt dann die Gefährdung und unterbricht seinen Wechselvorgang. FFE 1 kann gegebenenfalls so weit ausweichen, daß sich die beiden Sicherheitsabstände der FFE in y - Richtung nicht mehr überlappen, wenn dadurch der Fahrstreifen nicht verlassen wird.

Die Fahrzeugbewegung wird untergliedert in :

1. Berechnung der Interaktionsgrößen unter Berücksichtigung der Interaktionspartner sowie des in der näheren Umgebung des Fahrzeuges vorhandenen Verkehrszustandes und
2. der anschließenden Durchführung der Fahrzeugbewegung.

Die Wechselwünsche werden im Interaktionsteil erzeugt. Der Interaktionsberechnung überlagert ist die Berechnung der sicheren Zustandsgrößen. Die Berechnung der Interaktion dient der Feststellung der Über- oder Unterschreitung der Wahrnehmungsschwellen des einzelnen Fahrers. Entsprechend der festgestellten Wahrnehmung wird eine dem Bereich entsprechende Aktion gewählt. Der Wunsch des Fahrers liegt damit fest. Nach diesem Wunsch wird die angestrebte neue Geschwindigkeit berechnet. Zusätzlich erfolgt die Berechnung der einzuhaltenden Sollgeschwindigkeit, zugunsten des Sicherheitsabstands. Ist die gewünschte Geschwindigkeit kleiner oder gleich der Sollgeschwindigkeit, so darf das Fahrzeug seine angestrebte Geschwindigkeit einnehmen. Würde sie jedoch die Sollgeschwindigkeit überschreiten, so wird das Fahrzeug gezwungen, mit Sollgeschwindigkeit weiterzufahren. Das Setzen der Geschwindigkeit und das entsprechende Fortsetzen der Wegkoordinaten erfolgt im eigentlichen Bewegungsvorgang. Im Anhang ist eine kurze Zusammenfassung der Programmbeschreibung zu finden. Die Messungen werden in Kapitel 5 beschrieben.

4.4 Zur Problematik der Abbildung kontinuierlicher Vorgänge

Ein sehr wichtiger Schritt hin zur Realisierung ist die Festlegung einer simulationstechnisch handhabbaren, funktionellen Beschreibung des Modells. Hierzu sind zwei völlig unterschiedliche Vorgehensweisen möglich:

- die zeitschrittorientierte Simulation
- die ereignisorientierte Simulation

4.4.1 Prozeß- oder ereignisorientierte Simulation

Die ereignisorientierte Betrachtung hat den Vorteil, daß ein Ereignis genau zu dem Zeitpunkt behandelt wird, zu dem es auftaucht. Ein Ereignis ist nicht notwendigerweise etwas, das von außen einwirkt, sondern allgemein eine Veränderung des momentanen Zustands. Die Messung des sicheren Abstands und deren Kontrolle soll ein unabhängig vom FFE ablaufender Prozeß sein. Man kann sich dies vielleicht als ein im Fahrzeug integriertes, unbemerkt vom Fahrer arbeitendes Meß- und Regelaggregat vorstellen, das im Bedarfsfall die Kontrolle über das Fahrzeug an sich zieht (siehe Abbildung 13) ⁶. Man kommt unter dieser Annahme jedoch zu der Notwendigkeit, parallele Prozesse modellieren zu müssen. Petrinetze (REISIG, 1986) eignen sich gut für eine Darstellung von parallelen Abläufen.

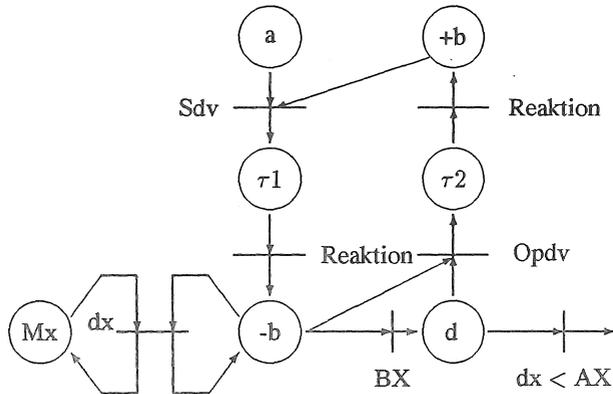


Abb. 23: Ein Interaktionsablauf nach WIEDEMANN (1974) in einer vereinfachten Form mittels Petrinetz

An einem Beispiel soll die Vorgehensweise verdeutlicht werden: In Abb. 23 ist das Interaktionsschema nach WIEDEMANN (1974) vereinfacht mittels einer Petrinetzdarstellung wiedergegeben. Die Aktionen werden nach der Terminologie für Petrinetze als Transitionen bezeichnet.

Die Schwellen zum Erkennen positiver Geschwindigkeitsdifferenzen bei

⁶Im Forschungsprojekt PROMETHEUS wird u.a. versucht, die automatische Kolonnenfahrt auf BAB zu realisieren. Die automatische Reaktion mit einem sehr hohem Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen soll zu sehr kleinen Reaktionszeiten und damit sehr geringen Abständen führen.

großen Abständen (SDV) und kleinen Abständen (CLDV) sind der Einfachheit halber zusammengefaßt. Man erkennt jedoch die prinzipielle Funktionsweise der ereignisorientierten Betrachtungsweise:

Ausgehend von einem unbeeinflussten Zustand (a) erkennt das FFE die Annäherung (Schwelle SDV). Die Auslösung der Transition führt in den Zustand der Reaktionsverzögerung (τ_1). Nach Ablauf der Zeit τ_1 wird der Bremsvorgang ausgelöst (Zustand -b). Es wird hier ein völlig gleichmäßig verlaufender Verzögerungsvorgang unterstellt, der selbstverständlich weiter verfeinert werden könnte.

Es können nun zwei Ereignisse weiter unterschieden werden: Eintritt in den Gefahrenbereich mit möglicher Kollision oder das Abfallen des Folgenden vom Vordermann. Im letzteren Fall ist das nächste Ereignis das Erkennen dieses Abfallens (Schwelle OPDV). Nach einer neuerlichen Reaktionsverzögerung (τ_2) folgt das Ereignis „Beschleunigen“. Der daran anschließende Zustand des Annäherns (+b) wird wieder durch das Ereignis „Erkennen der Annäherung“ (Schwelle CLDV, bzw. SDV) abgelöst.

Dieser Ereignisablauf wurde bereits durch die unabhängig ablaufende Abstandskontrolle durch den Zustand Mx und einer Transitionsschwelle zum Zustand Verzögern hin ergänzt. Mx soll den inaktiven Zustand des Kontrollorgans darstellen. Die Transitionsschwelle selbst beinhaltet im wesentlichen drei Vorgänge:

- die Messung des Istabstands,
- die Errechnung des Sollabstands und
- den Vergleich dieser beiden Werte.

Man könnte den Kontrollteil weiter verfeinert aufzeichnen. Die allgemeine Funktionsweise ist jedoch klar erkennbar, und der Übersichtlichkeit halber wurde auf diese Verfeinerung verzichtet. Der Fahrablauf unter realen Verhältnissen legt es nahe, auch für die weitere Modellierung Petrinetz-Darstellungen zu verwenden, da jedes FFE unabhängig und damit parallel zu anderen wahrnimmt und agiert. Die Schwierigkeit dieser Vorgehensweise liegt jedoch in der Verknüpfung der parallel ablaufenden Aktionen der einzelnen Fahrzeuge. Jede Zustandsänderung eines Fahrzeugs kann Auswirkungen auf andere Fahrzeuge haben, wobei jedes FFE unterschiedliche Totzeiten zwischen seinen einzelnen Aktionen aufweisen wird.

Eine sehr einfache Möglichkeit der Darstellung eines solchen Verknüpfungsvorgangs ist im Bild 24 gezeigt. Durch die Felder „Fz Vorne“, „Fz Hinten“, „Kein Fz Vorne“, „Kein Fz Hinten“ und „SpWechsel“ sollen Ereignisse charakterisiert werden, die einen Übergang des Zustands des FFE in einen anderen Zustand bewirken. Die Darstellung ist natürlich sehr grob und

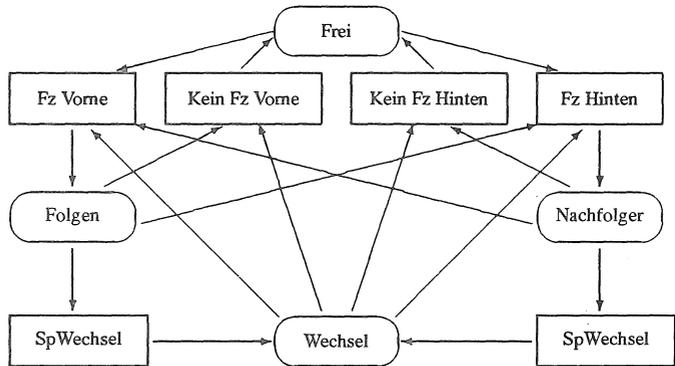


Abb. 24: Folgezustände eines FFE und Bereichsübergänge. An den Transitionsschwellen (z.B. „Fz Vorne“, „Fz Hinten“) findet die Verknüpfung der parallelen Abläufe statt.

soll nur das Prinzip einer möglichen Parallelisierung der Prozesse verdeutlichen. Das Ereignis „SpWechsel“ kann hier sowohl der Fahrstreifenwechsel des Interaktionspartners als auch der eigene sein. „Fz Vorne“, „Fz Hinten“, „Kein Fz Vorne“ und „Kein Fz Hinten“ beschreiben das „Auftauchen“ oder „Verschwinden“ eines Interaktionspartners im Reaktionsbereich.

Alle tatsächlich zu beachtenden Fälle (die sich aus der gegenseitigen Einflußnahme und den Verknüpfungen von FFE als mögliche Interaktionspartner ergeben) können so umfangreich werden, daß es zu einer Vielzahl paralleler Prozesse kommen kann. Die korrekte Abarbeitung dieser einzelnen Prozesse ist Gegenstand vieler Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Informatik (z.B. ALBRECHT et.al., 1987 oder ZILLI, 1987).

Die Erstellung eines ablauffähigen Programms aus einer vollständigen formalen Beschreibung aller Funktionen und Prozesse wird mittlerweile von diversen Hilfsmitteln unterstützt, so daß auch Verifizierungen z.T. automatisiert werden können (siehe auch ALBRECHT et.al., 1987 oder ZILLI, 1987). Damit ist die Erstellung eines teilweise oder vollständig parallelierten Programms möglich. Da jedoch auf den vorhandenen Rechnersystemen Berechnungen sequentiell erfolgen und Parallelrechner nicht zur Verfügung standen, sollte diese Thematik erst bei geeigneter verfügbarer Hardware wieder aufgegriffen werden. Eine Implementierung, die die parallelen Prozesse auf sequentiellen Rechenanlagen nachbildet, kommt nicht

in Betracht, da das Simulationssystem zur „Produktion“ verwendet werden sollte und keinen reinen theoretischen Charakter haben sollte. Die Modellierung paralleler Prozesse, die nicht von der Rechnerarchitektur unterstützt wird, ist sehr aufwendig und fehleranfällig.

4.4.2 Zeitdiskrete Betrachtung

Der Vorteil eines zeitschrittorientierten Systems liegt in einer einfacheren Aufbereitung des Systemzustandes. Bei der Zeitschrittorientierung kann der Zustand als Momentaufnahme direkt ausgewertet werden. Die einfachere Handhabung, der geringere Speicherbedarf und nicht zuletzt die geringere Fehleranfälligkeit führten zu der Wahl der zeitdiskreten Simulation.

Die zeitschrittorientierte Betrachtung ist aber mit dem Nachteil behaftet, daß die Ereignisse fast nie mit den Zeitschritten zusammenfallen werden. Dies führt zu einer unscharfen Betrachtung mit einer relativen Abweichung von

$$t_{Abw} < T$$

t_{Abw} ist die zeitliche Unsicherheit, mit der ein Ereignis simuliert wird.

T ist der Zeitschritt der Simulation.

Ereignisse können also praktisch erst nach ihrem Auftreten erkannt werden. Deshalb soll eine kurze Betrachtung der notwendigen Bedingungen erfolgen, die zu berücksichtigen sind, damit die erzielten Ergebnisse fehlerfrei sind.

Eine zeitdiskrete Abarbeitung natürlicher Ereignisse hat gewissen Anforderungen zu genügen. Lösungen zu derartigen Aufgaben bieten Methoden der Nachrichtentechnik (WOLF, 1974). Durch das Abtasttheorem lassen sich Schranken für die zeitschrittorientierte Simulation angeben.

Betrachtet man den FFE-Zyklus (Aktion - Reaktionszeit - Reaktion) als einen Regelkreis, so kann man ihn sich idealisierterweise als Totzeitglied (FÖLLINGER, 1980) mit der Totzeit T vorstellen. Ein Regler, der ein solches Totzeitglied beinhaltet, kann nur auf zeitliche Änderungen, die $\geq T$ sind, reagieren. Er besitzt eine Eigenfrequenz von $F = 1/T$. Damit muß die Zeitfunktion mindestens mit der Frequenz $f = F$ abgetastet werden, um sie korrekt wiederzugeben. Das FFE stellt den Regler dar, der die Reglerfunktion abtastende Prozeß das Simulationssystem. Abbildung 25 zeigt an einem Beispiel die Auswirkung der Diskretisierung eines Annäherungsvorgangs mit unterschiedlichen Reaktionszeiten. Im oberen Bild ist erkennbar, daß

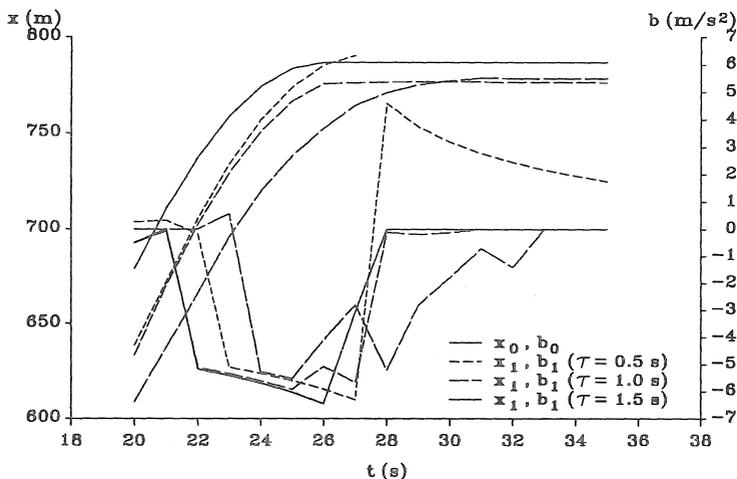


Abb. 25: Beispiel zur Auswirkung eines gewählten Zeitschritts auf die Nachbildbarkeit der Reaktion eines Fahrzeugs bei einem plötzlichen Bremsvorgang des Führungsfahrzeugs. Folgende Reaktionszeiten liegen den Beispielen zugrunde: 1.5, 1.0 und 0.5 Sekunden.

das Folgefahrgzeug nicht mehr rechtzeitig zum Halten kommt. Es würde zu einer Kollision kommen. Die Unfallbehandlung wurde hier absichtlich unterlassen, damit in der Darstellung die Auswirkung deutlich wird: Die Verwendung einer 0.5-Sekunden-Reaktionszeit führt zu einer Kollision, in der Simulation an dem „Durchfahren“ zu erkennen. Dies ist nur auf die Diskretisierung für die Simulation zurückzuführen, da man an den beiden anderen Bildern erkennen kann, daß hier eine korrekte Bewegung simuliert wird. Allen drei Diagrammen liegt der gleich Algorithmus zugrunde.

Die Konsequenz dieser Betrachtungsweise führt zu einem Zeitschritt, der mindestens gleich der kleinsten im System zu modellierenden Reaktionszeit entspricht. Erwartet man von dem System oder von Teilen des Systems z.B. Reaktionszeiten im Bereich von 1/10-Sekunden, so muß der Zeitschritt mindestens auf diesen Wert gesetzt werden können, um eine korrekte Funktionsweise zu gewährleisten. Bezogen auf diese Arbeit bedeutet das, daß die Übertragung der kontinuierlichen Betrachtung auf die zeitschrittorientierte so zu erfolgen hat, daß durch die Diskretisierung keine Gefährdungspotentiale entstehen.

Als Zeitschritt für die Simulationen wurde 1 Sekunde gewählt, da sich kleinere Zeitschritte überproportional auf die Rechenzeit ausgewirkt hätten und die Größe einen guten Kompromiß zwischen Genauigkeit und Aufwand darstellt. Zudem liegt man mit diesem Wert in der Größenordnung menschlicher Reaktionszeiten. Diese Wahl macht aber auch gleichzeitig deutlich, daß dem Regelorgan (Sicherheitseinrichtung) ebenfalls diese „Reaktionszeit“ zugebilligt wird.

5 Vorgehensweise zur Simulation des sicheren Verkehrsablaufs

Die eigentliche Simulation des sicheren Verkehrsablaufs mit dem vorhergehend beschriebenen Modell bedingt die Festlegung eines Datensatzes zur Eingabe verkehrlicher Bedingungen und ihre Variation zur Analyse der Auswirkungen dieser einzelnen Parameter. Die Vorgehensweise soll im folgenden verdeutlicht werden. Dazu werden zuerst die relevanten Eingabedaten aufgezählt, anschließend wird das Konzept näher erläutert.

5.1 Umfang und Zielsetzung der Simulationen

Der vorliegenden Untersuchung liegen zwei Fragen zugrunde:

1. Wie hoch ist die Leistungsfähigkeit unter bestimmten Umständen bei maximaler Verkehrsnachfrage, und was schränkt diese Leistungsfähigkeit ein?
2. Wie wirken sich Verhaltensunterschiede der FFE auf den Verkehrsablauf über die Spannweite der Verkehrsstärke bis hin zur Leistungsfähigkeitsgrenze aus?

Diese Fragen werden anhand

- eingehender Untersuchungen des ungestörten Verkehrsflusses auf freier Strecke bei reinem Pkw - Verkehr,
- Betrachtungen von Engpaßsituationen im Verkehrsablauf und
- des Einflusses des Lkw - Anteils auf den Verkehrsablauf

untersucht.

In einem ersten Ansatz wurde versucht, eine Lösung unter Annahme der Unabhängigkeit der zu untersuchenden Eingabegrößen zu finden. Es ist ein Grunddatensatz zu definieren, der systematischen Variationen unterworfen werden kann. Zwar gibt es spezielle Abhängigkeiten, wie z.B. zwischen Wunschgeschwindigkeit, maximaler Geschwindigkeit und Beschleunigungsverhalten, so daß eine völlige Unabhängigkeit der Eingabedaten nicht immer gilt. In erster Näherung wird hier jedoch für den Ansatz Unabhängigkeit unterstellt. Die Vorgehensweise entspricht folgender Reihenfolge:

1. Auswahl einer Bezugsmenge an Grunddaten zur Schaffung einer Ausgangsbasis. Damit soll die „Nulllösung“ oder auch Referenzsimulation definiert sein. Speziell gilt dies für die wichtige Eingangsgröße Wunschgeschwindigkeit.
2. Festlegung einer notwendigen Grundmenge an Simulationen.
3. Entwurf einer Strategie zur Simulationsabfolge.

Die Grunddaten können wiederum aufgeteilt werden in:

fahrzeugspezifische und interaktionsspezifische Grunddaten

Zu den fahrzeugspezifischen oder auch bauartbedingten Merkmalen zählen die maximale Geschwindigkeit, das Bremsvermögen und die Beschleunigung eines Fahrzeugs. Zu den interaktionsspezifischen wird neben den aktionsauslösenden Schwellenwerten auch die Wunschgeschwindigkeit gezählt.

5.1.1 Bestimmung der Einflußgrößen - Variablen

Ein FFE des Simulationssystems wird durch eine gewisse Menge an Parametern beschrieben. Dies sind:

- Alle Sensitivitätsgrößen, die für die Interaktion benötigt werden (siehe Kap. 2.2.3).
- Fahrzeugtypische Größen wie
 - Maximale Geschwindigkeit
 - Maximales Beschleunigungsvermögen
 - Maximales Bremsvermögen
 - Fahrzeuglänge
 - Fahrzeugbreite
- Die Wunschgeschwindigkeit für das FFE
- Schwellenwerte, die den Fahrstreifenwechsel beeinflussen
 - die Akzeptanz einer eigenen Behinderung im Folgevorgang (Schwelle SdVw)
 - die Behinderung eines nachfolgenden Fahrzeugs bis zu einem Maximalwert (Behinderungsgrenze)

– eine akzeptierte eigene Behinderung nach dem Fahrstreifenwechsel (Komfortgrenze)⁷

- Die in die Berechnung des sicheren Abstands eingehende Konstante τ

Die Untersuchung des Verkehrsgeschehens wurde auf Zielgrößen beschränkt, die kurzfristig beeinflussbar sind oder sich aufgrund z.B. von Witterungseinflüssen ändern können. Im einzelnen sollen dies die folgenden Größen sein:

- Bremsvermögen
- Wunschgeschwindigkeit
- die Wechselschwelle $SdVw$
- die Behinderungsgrenze und
- die Reaktionskonstante τ .

5.1.2 Durchführungskonzept

Nicht allein der Bereich höchster Verkehrsstärke kann von Interesse sein. Daher sollte eine Verkehrsflußsimulation alle Bereiche von Verkehrszuständen abdecken. In Kapitel 5.3 wird auf die Erzeugung von Verkehr am Eingangsquerschnitt eingegangen. Hier soll nur von konstanter Quellstärke gesprochen werden, gemeint ist damit eine konstante mittlere Verkehrsstärkevorgabe. Die Voraussetzung der Konstanz erlaubt eingehende Vergleiche und Analysen durch Verringerung der Freiheitsgrade. Es werden generell fünf unterschiedliche Verkehrsstärken gewählt, die über einen Zeitraum konstant vorgegeben wurden, wobei dieser Zeitraum so groß gewählt wurde, daß einerseits signifikante Datenmengen erzeugt, andererseits die gewünschte Anzahl der Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Nach gezielten Versuchen mit Fallbeispielen zeigte sich, daß eine Dauer von

$360 \times \text{Meßintervallgröße}$

für beide Anforderungen gut geeignet ist. Der Verkehrsfluß sollte mit soviel einzelnen Quellstärken wie nötig und sowenig wie möglich über seine ganze Bandbreite von $q_{min} \sim 0$ bis q_{max} abgedeckt werden. Hier ergaben Vorversuche eine gute Überdeckung des Bereiches durch die folgenden Abstufungen:

⁷Wie bereits erwähnt, wird die Behinderungs- und die Komfortgrenze als zumutbare Verzögerung angegeben, die Schwelle $SdVw$ als Geschwindigkeitsdifferenz.

Fz/h pro Fahrstreifen	250	500	750	1000	1500
-----------------------	-----	-----	-----	------	------

Weiterhin wurde eine Größe als wichtig angesehen, die bereits unter Kapitel 4.2.2 definiert wurde. Die Größe beschreibt eine zu akzeptierende Geschwindigkeitsminderung von der Wunschgeschwindigkeit (SdVw). Sie beeinflusst die Häufigkeit der Überholvorgänge und kann als ein Maß für die Freiheit des Verkehrsablaufs angesehen werden. Es wurden insgesamt neun Werte für SdVw festgelegt:

SdVw [m/s]	0	3	5	7	10	15	20	25	30
------------	---	---	---	---	----	----	----	----	----

Diese beiden Eingangsgrößen SdVw und Quellstärke wurden für alle Untersuchungen vollständig kombiniert, so daß für jede der nachfolgenden Untersuchungsgrößen insgesamt 45 Einzelsimulationen durchgeführt wurden. Es wurden sogenannte Untersuchungsvarianten in folgender Form gewählt:

A. Zwei Fahrstreifen

1. Eine erste Variante untersuchte den Einfluß der Wunschgeschwindigkeitsverteilung. Diese, pro Fahrstreifen anzugebende Verteilung, wurde allen sinnvollen Änderungen unterworfen.
2. Die zweite Variante hatte den Einfluß der Höhe der Behinderungsgrenze zum Gegenstand. Hier werden verschiedene, abgestufte Werte in ihrer Auswirkung betrachtet.
3. Die dritte Variante untersuchte den Einfluß der Reaktionskonstanten der Gleichung 11 auf den Verkehrsablauf. Hier ist nach den Ausführungen in Kapitel 4 eine untere Grenze durch den Zeitschritt gegeben.
4. Eine weitere Variante betrachtet den Einfluß des Bremsvermögens auf den Verkehrsablauf.

B. Dreistreifiger Verkehrsablauf

Diese Varianten wurden als Lauf bezeichnet und durchnummeriert (Tabelle 4). Jeden dieser Läufe lagen somit durch die Abstufungen der Quellstärkevorgaben und der zu akzeptierenden Behinderung (SdVw) 45 Einzelsimulationen zugrunde.

Jeder dieser Läufe wurde mit der vollständigen Kombination der Parameter SdVw und λ (Intensität) durchgeführt. In den aufgeführten Tabellen sind die jeweils veränderten Vorgaben in Form von Verteilungen zusammengefaßt.

Lauf-Nr.	Fahrstreifen	Wunschgeschwindigkeit				τ	Behind.-grenze
		μ	σ	Min	Max		
1	1	31.39	5.56	20.83	47.22	1.8	0.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
2	1	31.39	2.56	20.83	47.22	1.8	0.0
	2	36.94	2.56	26.39	51.39		
3	1	31.39	7.56	20.83	47.22	1.8	0.0
	2	36.94	7.56	26.39	51.39		
4	1	34.00	5.56	20.83	51.39	1.8	0.0
	2	34.00	5.56	20.83	51.39		
5	1	30.00	5.56	20.83	51.39	1.8	0.0
	2	38.00	5.56	20.83	51.39		
6	1	31.39	5.56	20.83	47.22	1.8	-2.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
7	1	31.39	5.56	20.83	47.22	1.8	-4.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
8	1	31.39	5.56	20.83	47.22	1.8	-6.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
9	1	31.39	5.56	20.83	47.22	1.5	0.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
10	1	31.39	5.56	20.83	47.22	1.0	0.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
11	1	31.39	5.56	20.83	47.22	0.6	0.0
	2	36.94	5.56	26.39	51.39		
12	1	34.00	5.56	25.83	46.39	1.8	0.0
	2	34.00	5.56	25.83	46.39		
30	1	34.00	5.56	20.83	51.39	1.8	0.0
	2	34.00	5.56	20.83	51.39		
	3	34.00	5.56	20.83	51.39		

Tab. 4: Zusammenstellung der Datensätze der untersuchten Varianten. Die Angaben zur Wunschgeschwindigkeit beziehen sich auf eine Normalverteilung mit den angegebenen Merkmalen. Mit τ wird die rechtliche Mindestfolgezeitlücke bezeichnet, und die Behinderungsgrenze drückt die Höhe einer zumutbaren Verzögerung für ein nachfolgendes Fahrzeug aus.

5.2 Eingabedaten - Datengrundmenge

Durch die vollständige Parameterisierung des Simulationsmodells ist es notwendig, einen vollständigen Datensatz vor Beginn einer Simulation ein-

Lauf-Nr.	μ	σ	Min	Max	Einheit
1	-7.0	0.5	-8.0	-6.0	[m/s ²]
1a	-4.0	0.5	-5.0	-3.0	[m/s ²]
1b	-4.0	1.0	-6.0	-2.0	[m/s ²]
1c	-5.0	1.5	-8.0	-2.0	[m/s ²]

Tab. 5: Variation der maximalen Verzögerung der Fahrzeuge.

zugeben. Diese Daten beschreiben die Eigenschaften der Verkehrsmittel, die Grenzen und Streuungen der Interaktionsbereiche, die Messungen und globale Vorgaben zur Beeinflussung des Verkehrsablaufs. Die Daten werden durch eine Kommandosprache eingegeben und sind auch so zu verändern. Die Syntax dieser Kommandosprache ist im Anhang zusammengefaßt wiedergegeben und in SCHNITTGER (1991) ausführlich beschrieben.

Die Zusammenstellung von Fahrzeug - Charakteristika für eine repräsentative Menge von Fahrzeugen ist schwierig. Es existieren zwar Zulassungsstatistiken, die auf eine Population von Fahrzeugen verweisen, jedoch können keine definitiven Aussagen über ein wie auch immer zusammengesetztes, typisches, auf Bundesautobahnen fahrendes Fahrzeugkollektiv gemacht werden. Geht man von diversen Zusammenstellungen deutscher Automagazine aus, so kann man näherungsweise einen Bereich angeben, in dem sich die gewünschten Eigenschaften bewegen. Nimmt man weiterhin an, daß die Charakteristiken in diesem Bereich normalverteilt sind, so kommt man zu dem hier verwendeten Ausgangsdatensatz.

Verteilung	μ	σ	min	max	Einheit
v_W Fahrstreifen 1	31,39	5,56	20,83	47,22	[m/s]
v_W Fahrstreifen 2	36,94	5,56	26,39	51,39	[m/s]
Maximalgeschwind.	50,0	5,0	40,0	60,0	[m/s]
Maximalbeschleun.	4,0	0,5	2,0	6,0	[m/s ²]
Maximalverzög.	8,0	0,5	7,0	9,0	[m/s ²]
Fahrzeuglängen	4,3	0,3	3,5	5,0	[m]
Fahrzeugbreiten	1,9	0,05	1,7	2,1	[m]

Tab. 6: Grunddatensatz der Simulationen: Wunschgeschwindigkeiten und Fahrzeugkenngrößen. v_W : Wunschgeschwindigkeit.

Die Bestimmung einer typischen Wunschgeschwindigkeitsverteilung für existierende Verhältnisse ist eine weitere Schwierigkeit, da die Wunschgeschwindigkeit eine erheblich schwerer zu messende Größe ist als die Fahrzeugdaten und wahrscheinlich auch Schwankungen während der Fahrdauer unterworfen ist (LEUTZBACH, 1972). Dennoch gibt es Ansätze zur Messung von Wunschgeschwindigkeiten. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung, die hier Eingang in den Grunddatensatz findet, stammt aus WIEDEMANN et.al. (1984).

Tabelle 6 enthält eine Zusammenstellung aller für den Grunddatensatz verwendeten Verteilungen. Alle Werte sind normalverteilt. Bei den Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerten ist zu berücksichtigen, daß hier die Maximalwerte für das FFE bestimmt werden. Eine Anpassung an aktuelle Verhältnisse (Fahrgeschwindigkeit, Wunschgeschwindigkeit) findet während des Programmlaufs statt.

5.3 Fahrzeugerzeugung

Betrachtet man Fahrzeugankünfte an einem Querschnitt als Poissonprozeß, so sind die Zeitlücken zwischen den Fahrzeugankünften exponentiell verteilt (LEUTZBACH, 1988). Die Verteilungsfunktion kann durch

$$P(Z \leq z) = 1 - e^{-\lambda z} \quad (z \geq 0)$$

mit λ als Intensität der Fahrzeugankünfte in der Dimension [Fz/s] beschrieben werden⁸. Da an dem Querschnitt Fahrzeuge nach dieser Gesetzmäßigkeit „auftauchen“, wird dieser Eingang auch als Quelle bezeichnet. Die resultierende mittlere Verkehrsstärke als Stundenwert in [Fz/h] wird auch als Quellstärke bezeichnet und soll dem Verkehrsablauf vorgegeben werden. Die Erzeugung eines FFE findet an jedem dieser Eingangsquerschnitte fahrstreifenweise statt. Jedes FFE verfügt über Merkmale, die sein individuelles Verhalten im Verlauf der Simulation beeinflussen. Dies ist jeweils ein Wert aus den in Tabelle 6 aufgeführten Verteilungen.

Das neu erzeugte FFE erhält neben diesen Kenngrößen auch einen Satz von Größen, die sein Interaktionsverhalten bestimmen. Dies sind die unter Kap. 2.2.3 aufgeführten Sensitivitätsgrößen für sein Wahrnehmungsvermögen und sein Kontrollvermögen. Zusätzlich werden Variablen bereitgestellt, die notwendig sind, um seine Bewegung im Verlauf der Simulation zu steuern.

⁸Dieses Modell gilt nur für ungestörten Verkehrsfluß. Bei steigender Verkehrsstärke verschiebt sich die Zeitlückenverteilung, im Extremfall - unter Annahme stationärer Verhältnisse - hin zu einer Gleichverteilung.

Die Erzeugung der FFE erfolgt zeitlückenorientiert. Die Zeitlücken werden für jeden Fahrstreifen getrennt nach dem Prinzip der Monte-Carlo-Methode generiert.

1. Berechnung einer (0,1)-gleichverteilten Zufallszahl r mittels eines Kongruenzgenerators nach KNUTH (1981).
2. Transformation dieser gleichverteilten Zufallszahl in eine negativ exponentialverteilte Zufallszahl über die Beziehung

$$z = -\frac{1}{\lambda} \ln(r) \quad (49)$$

Die Ankunft des i -ten Fahrzeugs wird demnach wie folgt berechnet:

1. Das Fahrzeug $i - 1$ sei zum Zeitpunkt t_{i-1} in das System gesetzt worden
2. Erzeugen einer Zeitlücke nach der Gleichung 49
3. Berechnen der Ankunftszeit des i -ten Fahrzeugs mit $t_i = t_{i-1} + z_i$

Die Erzeugung eines Fahrzeugs ist jedoch an die Bedingung gekoppelt, daß das Fahrzeug ebenfalls sicher in das System eingesetzt werden muß. Aus der Zeitlücke und des sich aus der momentanen Position des vorausfahrenden Fahrzeugs ergebenden Abstands resultiert eine notwendige sichere Folgegeschwindigkeit für das zu erzeugende Fahrzeug. Unterschreitet diese Folgegeschwindigkeit eine bestimmte Differenz

$$dv_{Erzeug} = v_{Wunsch} - v_{sicher}$$

zur Wunschgeschwindigkeit des neuen Fahrzeugs, so wird dieses neue Fahrzeug zurückgehalten. Erst im nächsten Zeitschritt findet eine erneute Überprüfung dieser Differenz statt. Das Fahrzeug befindet sich für diesen Zeitraum bis zu seinem Einsetzen in einer Warteschlange.

5.3.1 Einsetzen der Fahrzeuge

Das Einsetzen der Fahrzeuge auf die Strecke wird folgendermaßen durchgeführt: Die Zeitlücken werden als reelle Zahl berechnet, die Simulation selbst ist zeitdiskret auf der Basis des 1-s-Schritts. Das Fahrzeug wird aufgrund der Zeitlücke in der Regel zwischen zwei Zeitpunkten (t_k und t_l)

ankommen. Zur Erhöhung der Genauigkeit wird das Fahrzeug mit einer Anfangsposition in das System eingesetzt, die sich wie folgt berechnet:

$$\Delta x = (t_k - t_i) * v_i \quad \text{mit } t_k \leq t_i \leq t_l$$

- t_k, t_l : Zeitpunkte des diskreten Zeitschritts
- t_i : Ankunftszeitpunkt des i-ten Fahrzeugs
- v_i : Geschwindigkeit dieses Fahrzeugs

Sämtliche in das System einzuspeisenden Verteilungen können aus der nachfolgend angegebenen Menge von Verteilungen ausgewählt werden. Alle Verteilungen werden nach der oben genannten Monte-Carlo-Methode mittels des gleichverteilten Kongruenzgenerators erzeugt:

- Gleichverteilung. Die Transformation geschieht über die Beziehung

$$g = (r * (bis - von) + von)$$

- Normalverteilung (nach der Polar-Methode aus KNUTH, 1981)
- Negative Exponentialverteilung (siehe oben)
- empirische Verteilung

Das Format zur Eingabe mit der Kommandosprache für jede einzelne oben angeführte Größe ist im Anhang zu finden oder kann ebenfalls in SCHNITTGER (1991) nachgelesen werden. Eine weitere Besonderheit ist die Erzeugung begrenzter Verteilungen, speziell der Normal- und negativen Exponentialverteilung. Liegt ein erzeugter Wert außerhalb dieser oberen oder unteren Grenze, so wird der Wert verworfen und der Generator erneut aufgerufen bis der Wert innerhalb der angegebenen Grenzen liegt.

5.4 Erfassung des simulierten Verkehrsablaufs

Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs dienen mathematische Größen, die Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Fahrzeuge, ihrer Geschwindigkeit und ihrem Abstand zueinander zum Ausdruck bringen können. Die Bewegung von Fahrzeugen stellt eine Ortsveränderung über der Zeit dar. Die oben erwähnten mathematischen Größen resultieren aus Messungen des Verkehrsablaufs. Messungen können entweder

- an einem festen Querschnitt (an einem festen Ort) über einen bestimmten Zeitraum (Lokale Messungen)

- zu einem bestimmten Zeitpunkt über eine bestimmte Strecke (Momentane Messungen) oder
- über eine bestimmte Zeit über eine bestimmte Strecke gemacht werden (Räumlich - zeitliche Messungen).

Länge des Streckenabschnitts und Dauer des Meßintervalls sind über weite Bereiche variabel, so daß Unterteilungen in *quasi-momentan* und *quasi-lokal* die Bestimmung der Meßart erleichtern. Darüber hinaus existieren Meßverfahren für bewegte Beobachter (BLEHER, 1987, bzw. BECKER, 1989) die hier jedoch nicht in Betracht gezogen werden sollen.

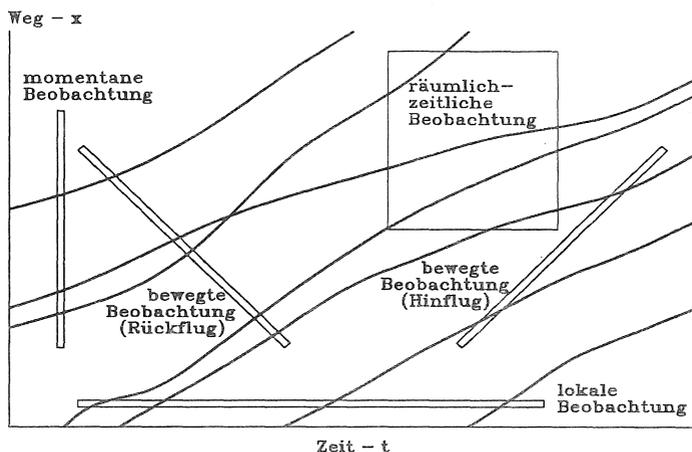


Abb. 26: Prinzipielle Vorgehensweise von Beobachtung und Beschreibung des Verkehrsablaufs.
Quelle: BECKER (1989).

Aus momentanen Messungen läßt sich die Verkehrsdichte $k = N/X$ aus der Anzahl der im Beobachtungsbereich befindlichen Fahrzeuge N und der Länge des Beobachtungsabschnitts X errechnen. Aus lokalen Messungen erhält man die Verkehrsstärke $q = M/T$ aus der Anzahl der am Querschnitt erfaßten Fahrzeuge M und der Dauer des Meßintervalls T . Nun läßt sich an der Darstellung von Weg-Zeit-Bewegungslinien von Fahrzeugen (Abb. 26) schnell erkennen, daß es einen Zusammenhang zwischen q und k im betrachteten Weg-Zeit-Fenster ($X-T$) und der mittleren Geschwindigkeit dieses Fahrzeugkollektivs gibt. Dieser Zusammenhang wird ausgedrückt durch

$$q = k * \bar{v}_m$$

COERS (1970) definierte die Verkehrsstärke, die sich aus einer räumlich-zeitlichen Betrachtungsweise ergibt, wie folgt:

$$q_{RZ} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{TX}$$

x_i ist die Länge des Weges, die das i -te Fahrzeug innerhalb der Fläche TX zurücklegt. Damit ergibt sich die Verkehrsdichte

$$k_{RZ} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{TX}$$

aus der Zeit t_i , die das i -te Fahrzeug innerhalb der Fläche TX verbringt.

Für die Simulation wurde eine der räumlich-zeitlichen entsprechende Betrachtungsweise gewählt, da sie sich besonders für die Verwendung innerhalb eines Simulationssystems eignet. Je nach Zielsetzung der jeweiligen Simulation wurden unterschiedlich lange Meßabschnitte und Intervallgrößen gewählt. Das Ausgabeformat und die Meßmethodik ist nachfolgend zusammengestellt.

1. Simulationszeit [s]
2. Mittlere Dichte im betrachteten Streckenabschnitt. Zu jedem Zeitschritt wurde die Anzahl der Fahrzeuge im Meßabschnitt danach bestimmt, ob die Fahrzeugkoordinaten (im Mittelpunkt des FFE) innerhalb des Meßabschnitts liegen. Der ausgegebene Wert für die Dichte ist auf [Fz/km] normiert und errechnet sich als

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^T n_i * dt_i}{T * l}$$

mit der Länge des Meßabschnitts l . Eventuelle Veränderungen des Beobachtungsabschnitts finden so ihre Berücksichtigung.

3. Mittlere Verkehrsstärke. Der Wert wird als Produkt $q = \bar{k} * \bar{v}_m$ zum Zeitpunkt der Datenausgabe errechnet. Ausgabeformat ist [Fz/h].

4. Mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Dieser Wert wird zusammen mit der Dichte in jedem Zeitschritt bestimmt. Errechnet wird der Wert als

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^T \left(\frac{\sum_{j=1}^{n_i} v_j}{n} \right) * dt_i}{T}$$

anschließend auf $[km/h]$ umgerechnet und ausgegeben.

5. Mittlere Anzahl der Fahrstreifenwechsel. Gezählt wird jeder Wechselbeginn im Betrachtungsintervall. Damit wird ein Wechsel nur einmal erfaßt, auch wenn er über mehrere Zeitintervalle dauert. Die Anzahl der Fahrstreifenwechsel wird mit

$$s\bar{p}w = \frac{\sum_{i=1}^T spw_i}{T * l}$$

errechnet. Die Einheit dieses Wertes ist $[1/(km * s)]$.

6. Die mittlere Wunschgeschwindigkeit der Fahrzeuge im System. Diese Ausgabe dient lediglich Kontrollzwecken und wird in der gleichen Methodik erfaßt wie die mittlere Fahrgeschwindigkeit. Einheit dieser Ausgabe ist $[km/h]$.

Es besteht die Möglichkeit, beliebig viele Meßabschnitte oder Querschnitte auf der simulierten Strecke einzurichten. Daher erfolgt die Definition eines solchen Meßabschnitts auch parameterisiert unter Angabe der Streckennummer und der Bereichsgrenzen in $[m]$ bzw. der Koordinate für Querschnitte in $[m]$ sowie des Meßintervalls in $[s]$. In den obigen Angaben ist:

T	Die Dauer des Meßintervalls (Anzahl der einzelnen Zeitschritte)
l	Die Länge des Meßabschnitts
n_i	Anzahl der Fahrzeuge im Meßabschnitt zum Zeitschritt i
v_j	Momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs j zum Zeitschritt i
spw_i	Anzahl der Wechselereignisse im Meßabschnitt zum Zeitschritt i
dt_i	Größe des Zeitschritts (hier 1 Sekunde)

6 Simulationsergebnisse

Anhand der durchgeführten Simulationen können die Ergebnisse in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- reiner Pkw-Verkehr ohne kapazitiven Engpaß
- anteiliger Lkw-Verkehr und kapazitive Engpässe: Sie können angesichts des notwendigen Umfangs einer ausführlichen Betrachtung hier nur qualitativ beurteilt werden.

Ausgewertet wurden die Simulationsläufe mit dem statistischen Programmpaket SAS (1985). Ziel der Auswertungen war es, Aussagen über den Einfluß der einzelnen Variablen formulieren zu können bzw. die qualitativen Auswirkungen zumindest graphisch zu dokumentieren. Für den reinen Pkw-Verkehr konnten die umfangreichsten Untersuchungen durchgeführt werden, so daß eingehende Analysen hinsichtlich einzelner Einflußgrößen möglich sind.

Die vorhandenen Daten für den Pkw-Verkehrsablauf stützen sich auf die in WIEDEMANN/SCHNITTGER (1990) durchgeführten, sehr umfangreichen Simulationen und auf nachträglich gezielt ausgewählte Simulationen aus der genannten Untersuchung mit dem Schwerpunkt auf längere Simulationsdauer.

6.1 Auswertung der Ergebnisse ohne kapazitiven Engpaß

6.1.1 Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit

Unter Berücksichtigung der Ausführungen von HEIDEMANN (1989) können die erreichten mittleren Meßwerte bei höchster Belastung als Indiz für die Leistungsfähigkeit gelten. Daher sollen die folgenden Definitionen gelten: Als Leistungsfähigkeit wird die mittlere und als Kapazität die höchste Verkehrsstärke bezeichnet, die sich bei höchster Nachfrage einstellt. Als höchste Nachfrage soll der Zustand definiert sein, wenn entweder zu jedem Zeitschritt ein Fahrzeug in das System eingesetzt wird oder Fahrzeuge vor dem Eingangsquerschnitt gepuffert werden müssen. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß der Puffer am Eingangsquerschnitt mindestens ein Fahrzeug enthält. Es können nicht mehr alle Fahrzeuge in das System eingesetzt werden. Dies ist wiederum abhängig von den vorgegebenen

Schranken zum Einsetzen der Fahrzeuge. Die in Tabelle 7 aufgelisteten Verkehrsstärken, die aus den Messungen bei höchster Belastung resultieren, zeigen eine Übereinstimmung der auf 1-min-Intervall-Basis vorliegenden mittleren Werte mit den entsprechenden 1-h-Intervall basierten mittleren Werten. Beide Messungen wurden mit der räumlich-zeitlichen Meßmethode über einen Streckenabschnitt von 1 km ermittelt.

Lauf-Nr.	Minutenwerte		Stundenwerte		
	Mittel	Maximum	Mittel	Maximum	
1	2872.3	3085.9	2884.5	2889.1	[Fz/h]
2	2897.3	3076.7	2909.4	2915.8	[Fz/h]
3	2829.9	3062.7	2842.2	2855.9	[Fz/h]
4	2852.6	3049.3	2863.0	2880.5	[Fz/h]
5	2818.8	3032.2	2829.9	2846.9	[Fz/h]
12	2919.5	3119.2	2928.1	2934.5	[Fz/h]
6	2852.0	3159.8	2861.3	2874.3	[Fz/h]
7	2865.4	3093.6	2879.7	2896.8	[Fz/h]
8	2828.5	3070.4	2839.9	2850.7	[Fz/h]
9	3148.8	3512.3	3167.9	3187.7	[Fz/h]
10	4029.3	4585.3	4045.6	4049.5	[Fz/h]
11	5036.0	5778.1	5062.4	5094.3	[Fz/h]

Tab. 7: Verkehrsstärkewerte für die Simulationen der Läufe 1 bis 12. Räumlich-zeitliche Messung über 1 km. Die Werte resultieren aus Simulationen mit höchster Belastung.

Unterschiede in der Leistungsfähigkeit durch verschiedene Parametereinstellungen beim Fahrverhalten bleiben unter 3%. Eine tatsächlich signifikante Erhöhung läßt sich erst durch Veränderung des zugrundegelegten zeitlichen Abstandsfaktors erreichen. Der Zugewinn beträgt rund 10% bei Reduktion auf 1.5 s, 40% bei Reduktion auf 1.0 s und rund 75% bei 0.6 s. Alle anderen Ergebnisse unterscheiden sich lediglich durch die Höhe des mittleren Geschwindigkeitsniveaus, auf dem die Verkehrsstärkewerte erreicht werden. Dies soll deswegen im nächsten Abschnitt eingehend untersucht werden.

Die geringen Unterschiede der Verkehrsstärkewerte bei höchster Belastung trotz stark unterschiedlicher Verhaltensvorgaben kann auf das Verhaltensmodell und die damit verknüpfte Sicherungseinrichtung zurückgeführt werden. Die Folgezeitlücken werden auf die Mindestfolgezeitlücke $\tau = 1.8$ s begrenzt, größere Zeitlücken können dagegen unbeeinflusst eingenommen

werden. Dieser Einfluß zeigt sich sehr deutlich bei den Simulationen mit reduzierten Mindestfolgezeitlücken. Drei der Simulationen mit unterschiedlich zugrundegelegter Reaktionskonstante wurden für eine Gegenüberstellung aufbereitet. Die aus den Minuten - Intervall - Messung resultierenden Meßpunkte wurden durch eine Hüllkurve eingefasst. Die Hüllkurve wurde durch bereichsweise Erfassung von minimalen und maximalen Verkehrsstärkewerten und anschließende Glättung mittels einer Splinefunktion erzeugt. Abb. 27 zeigt die aus der Simulation 1, 9 und 10 hervorgegangenen Hüllkurven. An den Hüllkurven ist deutlich zu erkennen, wie die Streuung mit zunehmender Verkehrsstärke abnimmt.

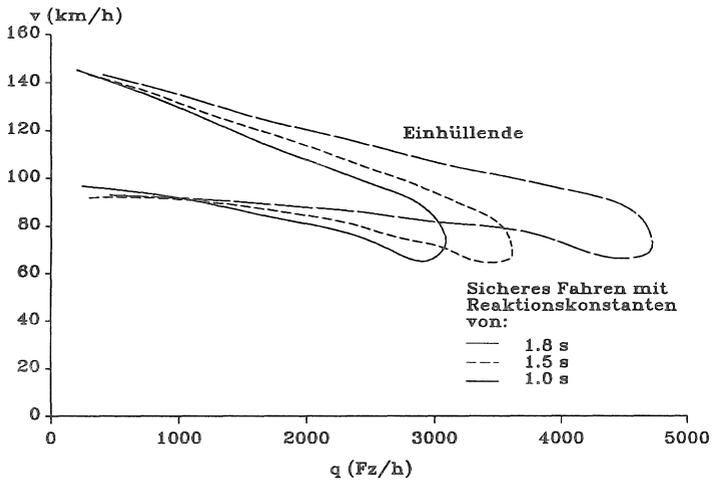


Abb. 27: Hüllkurven zur Beurteilung der Verkehrszustände. Die Linien umhüllen die mit unterschiedlichen Reaktionskonstanten simulierten Minutenwerte.

Die Leistungsfähigkeit unter Sicherheitsanforderungen wird durch die zugrundegelegte Sicherheitsanforderung eines zeitlichen Mindestabstands bestimmt. Behalten die Fahrzeugführer die Möglichkeit eines individuellen Fahrverhaltens, so wird die Leistungsfähigkeit deutlich unter der theoretisch möglichen Obergrenze bleiben.

Bei einer Reaktionskonstanten von:	1.8	1.5	1.0	0.6	s
beträgt die Differenz zur					
theoretischen Grenze:	27	33	45	58	%.

Mit geringer werdenden Reaktionskonstanten wächst der Einfluß des menschlichen Verhaltens auf das Abstandsverhalten. Menschliche Reaktionszeiten liegen im Mittel in der Größenordnung von rund 1 s. Die Simulation des τ -Werts 0.6 s ist jedoch mit den in Kap. 4.4.2 getroffenen Einschränkungen zu betrachten. In der Simulation vorkommende Gefahrensituationen können dort nicht mehr korrekt abgebildet werden. Dennoch dürfte das Resultat einen Eindruck der zu erwartenden Ergebnisse feinerer Simulationsstudien geben.

Die Behauptung, daß die mittleren Minuten- bzw. Stundenwerte bei höchster Nachfrage die Leistungsfähigkeit repräsentieren, wurde anhand einer weiteren Simulation gefestigt, deren Dauer 30 Stunden betrug. Dadurch liegen nun 33 Stundenwerte vor, die bereits einen Eindruck vom sehr gleichmäßigen Verlauf der mittleren Dauerlinie vermitteln. Die Werte besitzen die folgenden Kenngrößen:

Mittelwert	Streuung	Minimum	Maximum	
2821.7	12.2	2792.1	2889.1	[Fz/h]

Im Verlauf der Simulationen hat sich gezeigt, daß die Geschwindigkeitsminderung, mit der die FFE gerade noch eingesetzt werden (Erzeugungsschranke), einen wesentlichen Einfluß auf die zu erreichenden Verkehrsstärkewerte besitzt. Für die oben angegebenen Simulationen wurde die Schranke auf den höchstmöglichen Wert gesetzt, so daß sich bei genügend hoher Nachfrage ein Stau vor dem Eingangsquerschnitt bildete. Durch die Sicherheitsvorrichtung wird die Beschleunigung begrenzt, so daß die Fahrzeuge gleichmäßig anfahren. Dadurch stellt sich bei genügend großer Meßstrecke auch wieder ein flüssiger Verkehrsablauf ein, dessen mittlere Geschwindigkeit hauptsächlich durch die langsamsten im System befindlichen Fahrzeuge geprägt ist.

Auch hier wurde versucht, durch gezielte Simulationen den Einfluß dieses Schwellenwertes auf die Leistungsfähigkeit aufzudecken. Die Abstufungen des Schwellenwertes reichen von 10 m/s bis 50 m/s in Schritten von 10 m/s. Aus der Simulation ergaben sich die folgenden Werte für die mittleren Minutenwerte bei jeweils höchster Nachfrage:

Minderung beim Einsetzen :	10	20	30	40	50	m/s
$\tau = 1.8\text{s}$:	2354.6	2741.9	2890.7	2939.7	2955.3	Fz/h
$\tau = 1.5\text{s}$:	2422.6	2721.9	3109.2	3258.9	3306.4	Fz/h
$\tau = 1.0\text{s}$:	3589.8	3924.7	4103.0	4115.6	4124.7	Fz/h

Man erkennt, daß die Werte sich asymptotisch den Werten 3000 Fz/h ($\tau = 1.8$ s) 3350 Fz/h ($\tau = 1.5$ s) und 4200 Fz/h ($\tau = 1.0$ s) nähern. Je höher die Schwelle ist, desto mehr Fahrzeuge werden in das System, mit entsprechend verringerter Anfangsgeschwindigkeit eingesetzt. Überschreitet die Schwellenhöhe die Spannweite der vorgegebenen Wunschgeschwindigkeit, so werden alle Fahrzeuge eingesetzt was einem Stau vor dem Eingangsquerschnitt entspricht. Die Simulationen haben jedoch gezeigt, daß ein Stau ohne kapazitiven Grund nicht auftreten kann. Im fließenden Verkehr dürfte sich ein Wert einstellen, der dem Mittel zwischen Minimum und Maximum der Wunschgeschwindigkeiten entspricht.

6.1.2 Auswirkung der Variablen auf die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsablaufs

Bereits im vorangegangenen Kapitel wurde angesprochen, daß sich die unterschiedlichen Faktoren nur unwesentlich auf die Leistungsfähigkeit, aber dafür auf das mittlere Geschwindigkeitsniveau auswirken.

Der durch die Simulationen erzielte Datenumfang ist so groß, daß sich eine komprimierte Form für die Darstellung der Resultate empfiehlt. Im Anhang sind die einzelnen, auf der Basis der sehr umfangreichen 5-s-Intervall-Messungen durchgeführten Darstellungsformen erläutert. Es hat sich gezeigt, daß sich durch eine lineare Regression der Verlauf des mittleren Geschwindigkeitsniveaus am einfachsten und mit recht geringer Abweichung ausdrücken läßt. Als Schnittpunkt mit der Ordinate wurde der Regressionsrechnung der Mittelwert der Wunschgeschwindigkeitsverteilung vorgegeben. Dieser Wert ist für alle Läufe nahezu gleich.

Für eine weitere Betrachtung können nun die Faktoren der Regressionsgeraden herangezogen werden. Die Steigung der Geraden sagt demnach etwas über die Reduktion der mittleren Geschwindigkeiten als Funktion der Verkehrsstärke aus. Die untersuchten Eingabegrößen sind

- die Wunschgeschwindigkeitsverteilung,
- die zu akzeptierende Behinderung im Folgevorgang (SdVw),
- die Behinderungsschwelle und
- die Reaktionskonstante.

Abbildung 28 zeigt am Beispiel der Läufe 1, 2 und 3 den Faktor b der Geradengleichung $v_m = a + b \cdot q$, aufgetragen über dem Schwellenwert zum Überholen (SdVw). Die einzelnen Faktoren jedes Laufes sind zur Verdeutlichung durch eine Linie verbunden. Die Abbildung soll die Ähnlichkeit der

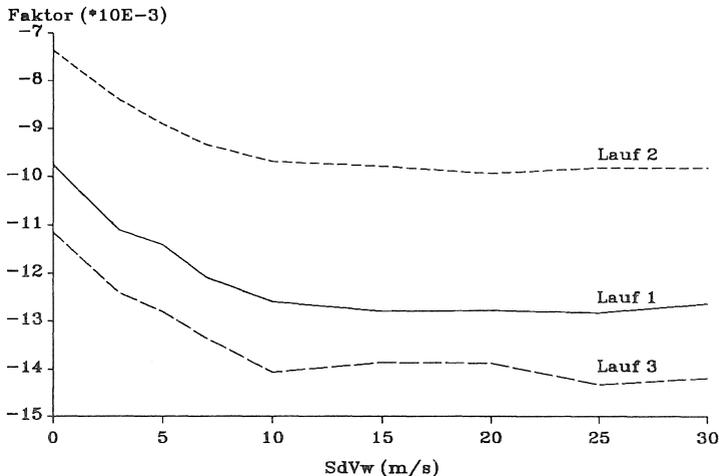


Abb. 28: Faktor b der Regressionsgleichung $v = a + b \cdot q$ der Läufe 1, 2 und 3 als Funktion Höhe der eigenen zu akzeptierenden Geschwindigkeitsminderung im Folgevorgang (SdVw = Schwellenwert für diese Höhe). Basis: 5-s-Intervalle, Erzeugungsschwelle: 10 m/s.

Kurvenverläufe für die Variable SdVw verdeutlichen. Unterschiede bestehen im wesentlichen im Ausgangspunkt (für SdVw = 0 m/s). Man erkennt an Abbildung 28, daß bereits geringe Werte für SdVw zu einem deutlichen Abfall des Kurvenverlaufs führen. Dies ist ein Merkmal für ein stärkeres Absinken der mittleren Geschwindigkeit des Verkehrsablaufs bei zunehmender Verkehrsstärke. Ab SdVw \approx 10 m/s bleiben die weiteren Veränderungen gering. Der Verkehrsablauf entspricht dann im wesentlichen dem bei Überholmöglichkeit.

6.1.3 Interpretation der Einzelergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 6.1.3 sind die Faktoren der Regressionsgeraden zusammengefaßt. Man kann deutliche Unterschiede der Startwerte (SdVw = 0 m/s) erkennen. Wie zu erwarten war, bewirkt eine größere Verteilungsweite oder Streuung der Wunschgeschwindigkeit eher eine geringere mittlere Geschwindigkeit als eine engere Verteilung. Eine Aufweitung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung wirkt sich ebenso negativ aus, wie eine

Erhöhung des erlaubten Behinderungswertes (Läufe 6 - 8). Ein günstiger Einfluß von τ scheint auch bei den Läufen 9 - 11 vorzuliegen. Man muß sich jedoch vor Augen halten, daß hier höhere Verkehrsstärken erreicht werden und die Gerade deswegen flacher verläuft. Man kann an Abb. 27 erkennen, daß die mittlere Geschwindigkeit bei jeweils erreichter Leistungsfähigkeit nahezu gleich ist.

SdVw	Lauf 1	Lauf 2	Lauf 3	Lauf 4	Lauf 5	Lauf 6
0	-0.00975	-0.00735	-0.01114	-0.01189	-0.01088	-0.01052
3	-0.01110	-0.00839	-0.01240	-0.01255	-0.01234	-0.01146
5	-0.01140	-0.00890	-0.01280	-0.01338	-0.01313	-0.01173
7	-0.01208	-0.00934	-0.01335	-0.01386	-0.01301	-0.01241
10	-0.01259	-0.00969	-0.01406	-0.01446	-0.01447	-0.01277
15	-0.01279	-0.00978	-0.01385	-0.01497	-0.01426	-0.01297
20	-0.01277	-0.00993	-0.01387	-0.01481	-0.01479	-0.01299
25	-0.01282	-0.00981	-0.01432	-0.01489	-0.01472	-0.01316
30	-0.01263	-0.00981	-0.01419	-0.01496	-0.01476	-0.01329

SdVw	Lauf 7	Lauf 8	Lauf 9	Lauf 10	Lauf 11	Lauf 12
0	-0.01136	-0.01311	-0.00910	-0.00855	-0.00746	-0.00858
3	-0.01216	-0.01412	-0.01000	-0.00922	-0.00812	-0.00946
5	-0.01276	-0.01426	-0.01038	-0.00954	-0.00867	-0.00975
7	-0.01309	-0.01467	-0.01094	-0.00979	-0.00899	-0.00988
10	-0.01374	-0.01500	-0.01150	-0.01021	-0.00944	-0.01025
15	-0.01379	-0.01511	-0.01158	-0.01056	-0.00945	-0.01007
20	-0.01372	-0.01503	-0.01165	-0.01049	-0.00973	-0.01041
25	-0.01374	-0.01500	-0.01154	-0.01032	-0.00963	-0.01029
30	-0.01418	-0.01514	-0.01160	-0.01046	-0.00962	-0.01029

Tab. 8: Zusammenstellung aller aus der Regressionsrechnung ermittelten Faktoren für die Simulationen mit reinem Pkw-Verkehr.
 Basis: 5-s-Intervalle, Erzeugungsschwelle: 10 m/s.

Im nächsten Abschnitt soll anhand der Faktoren versucht werden, einen allgemeinen Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflußvariablen und der Ausprägung des Faktors herzuleiten.

6.1.4 Herleitung eines algebraischen Zusammenhangs zwischen der mittleren Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke

Zur Herausarbeitung der Zusammenhänge wurden die Gleichungsfaktoren aus den Regressionsrechnungen in zwei unterschiedliche Gruppen geteilt:

- Der Einfluß der Größe $SdVw$ kann als unabhängig von den anderen Größen bezeichnet werden (Ähnlichkeit der Kurvenverläufe in Abb. 28).
- Der Einfluß der restlichen Eingangsgrößen wurde anhand des Faktors für $SdVw = 0$ m/s untersucht.

Läufe:	Betrachtete Variable:
1, 2, 3	Einfluß der Standardabweichung
1, 4, 5, 12	Einfluß der Fahrstreifenunterschiede und der Verteilungsweite
1, 6, 7, 8	Einfluß der Behinderungschwelle

Die allgemeine parameterisierte Geradengleichung für den $v - q$ - Zusammenhang erhält folgenden Ansatz:

1. Der Einfluß der Variablen $SdVw$ auf den Faktor kann wie folgt beschrieben werden: Es existiert ein Startwert ($SdVw = 0$) und ein unabhängig von den anderen Parametern beschreibbarer Einfluß. Der Einfluß wird in zwei Abschnitte unterteilt (siehe Abb. 29):
 1. Ein kontinuierlicher Abfall bis etwa $SdVw = 10$ (m/s)
 2. Ein nahezu unbeeinflusster horizontaler Verlauf für größere Werte
2. Die Einflüsse der Standardabweichung und der Minima / Maxima der Wunschgeschwindigkeit auf den Faktor der Regressionsgeraden sind eindeutig. Hingegen kann ein Einfluß von fahrstreifenweisen Unterschieden nicht so eindeutig festgelegt werden. Die streifenweise vorliegenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen werden deshalb zusammengefaßt und gemeinsam beschrieben.
3. Bei der Beurteilung des Einflusses der Reaktionskonstanten τ muß berücksichtigt werden, daß die Maximalwerte der Verkehrsstärke deutlich größer sind als bei den anderen Einflußgrößen und die Regressionslinie deswegen flacher verläuft.

Das Ziel ist die allgemeine Beschreibung des $v - q$ - Zusammenhangs durch:

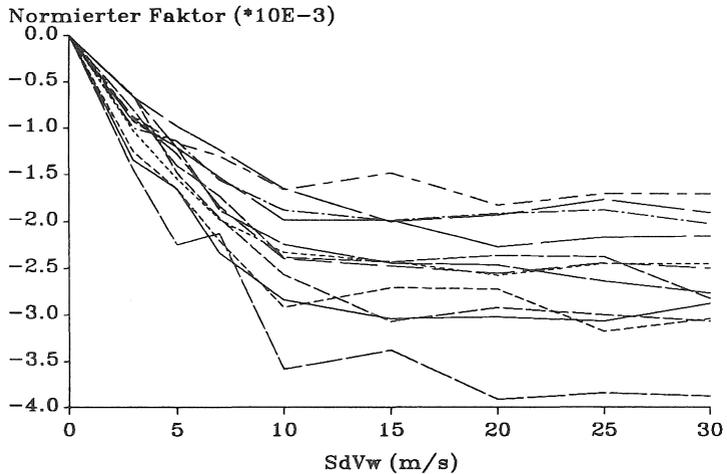


Abb. 29: Verlauf des Parameterabfalls über dem $SdVw$ - Wert für alle Simulationen, nachdem alle Läufe auf den Ursprung bezogen worden sind ($SdVw =$ Höhe der zu akzeptierenden Geschwindigkeitsminderung im Folgevorgang).

$$v = \alpha + \beta \cdot q \quad \text{mit} \quad \beta = \gamma + \eta \quad (50)$$

α wird festgelegt durch die mittlere Geschwindigkeit, die sich unter idealen Bedingungen einstellen würde, und entspricht dem Mittel der Wunschgeschwindigkeiten.

β ist der Faktor, um den die mittlere Geschwindigkeit durch die Verkehrsstärke sinkt.

γ soll der Faktor für $SdVw = 0$ m/s sein.

η ist die Erhöhung des Faktors durch Zunahme des $SdVw$ - Wertes.

In Abbildung 29 sind alle Faktoren der einzelnen Läufe relativ zum Startwert ($SdVw = 0$ m/s) dargestellt. Der Wert des Faktors für $SdVw = 0$ m/s wurde von allen anderen Faktoren des jeweiligen Laufes subtrahiert. Damit hat man eine normierte Darstellung, aus der die Ähnlichkeit aller Verläufe ersichtlich wird. η ist der Anteil am Gesamtfaktor, der sich durch Veränderung des $SdVw$ - Wertes ergibt. Betrachtet man Abb. 29, so erkennt man,

daß der lineare Abfall bis zum Wert $SdVw = 10$ m/s dann durch

$$\eta = -0.2535 \cdot 10^{-3} SdVw \quad (51)$$

angenähert werden kann. Der Faktor γ wird wiederum aus den einzelnen Einflußgrößen γ_1 und γ_2 zusammengesetzt. γ_1 beschreibt den Einfluß der Wunschgeschwindigkeitsverteilung, γ_2 den der Behinderungsschwelle. Die zugehörigen Regressionsrechnungen sind im Anhang zu finden. Es ergibt sich

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= (-1.87\sigma + 0.32\,mdiff) \cdot 10^{-3} \text{ und} \\ \gamma_2 &= (-0.503\,BehGrd) \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (52)$$

Für verschiedene τ - Werte schließlich muß γ_1 noch ergänzt werden:

$$\gamma_1 = (-1.43\sigma + 0.321\,mdiff - 1.42\tau) \cdot 10^{-3} \quad (53)$$

Damit ergibt sich der Faktor β in 50 mit (51) und (52):

$$\beta = (1.87\sigma - 0.32\,mdiff - 0.503\,BehGrd - 0.2535\,SdVw) \cdot 10^{-3}$$

bzw. unter Berücksichtigung von τ mit (53):

$$\beta = (1.43\sigma - 0.32\,mdiff + 1.42\tau - 0.503\,BehGrd - 0.2535\,SdVw) \cdot 10^{-3}$$

Die einzelnen Variablen repräsentieren die signifikant bestimmenden Einflußgrößen.

- mdiff* beschreibt die Differenz der mittleren fahrstreifenbezogenen Wunschgeschwindigkeit.
- σ ist die Standardabweichung der von allen Fahrstreifen zusammengefaßten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen.
- BehGrd* ist der Behinderungsgrad und drückt eine einem neuen Nachfolger zumutbare Verzögerung zum Einhalten des sicheren Abstands aus.
- τ die Reaktionskonstante, ist die rechtlich geforderte Mindestfolzeitlücke.
- SdVw* ist eine zu akzeptierende Geschwindigkeitsminderung im Folgevorgang. Die Wunschgeschwindigkeit muß um den Betrag von $SdVw$ unterschritten sein, daß das Fahrzeug überholen darf \Rightarrow Beeinflussung der Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel.

6.1.5 Einfluß des Bremsvermögens

Die wichtigste Größe der Fahrzeugeigenschaften ist das Bremsvermögen, das den Fahrzeugen als Parameter vorgegeben wird.

Aus Tab. 9 ist zu entnehmen, daß sich in der Simulation keine praktischen Einschränkungen der Leistungsfähigkeit durch die reduzierten Bremsvermögen der Fahrzeuge zeigen (Schwankungen um 2 - 5%). Man muß sich vor Augen führen, daß sich hier zwei Effekte bemerkbar machen. Zum einen wird sich der Abstand zweier folgender Fahrzeuge mit annähernd gleichem Bremsvermögen unabhängig vom Absolutwert auf den Reaktionsabstand beschränken. Zum anderen wird sich die Häufigkeit mit der die Kombination – Fahrzeug mit geringem folgt Fahrzeug mit hohem Bremsvermögen → größerer Abstand als Reaktionsabstand – gegenüber der Kombination – Fahrzeug mit hohem folgt Fahrzeug mit geringerem Bremsvermögen → geringerer Sollabstand als Reaktionsabstand – auftritt, die Waage halten. Damit gleichen sich die im Fahrverlauf auftretenden Unterschiede bei Intervallbetrachtungen aus. Ein weiterer Grund für den kaum bemerkbaren Einfluß sind die in der Regel von den Fahrern eingenommenen Abstände, die über den Sollabständen liegen.

Unterschiede machen sich auch hier lediglich im mittleren Geschwindigkeitsniveau, auf dem die hohen Verkehrsstärken erzielt werden, bemerkbar. Hier wirken sich die unterschiedlichen Bremsverteilungen durch ihre insgesamt geringeren Absolutwerte aus.

	Lauf 1	Lauf 1a	Lauf 1b	Lauf 1c
Faktor [$\cdot 10^3$]	-9.752	-10.722	-13.209	-13.097
q [Fz/h]	2872.3	2796.8	2700.7	2720.8

Tab. 9: Ergebnis der linearen Regression mit vorgegebenem konstanten Faktor für den Fall der Variation des maximalen Bremsvermögens (Konstante: 125.38 [km/h]) und die maximal erreichten Verkehrsstärkewerte. Zur Vergleichbarkeit basiert die Regressionsrechnung auf 5-s-Intervallen, die Verkehrsstärkemessungen hingegen auf Minuten-Intervallen.

In Tabelle 9 sind die sich aus der Regressionsrechnung und der Auswertung ergebenden Werte zusammengefaßt. Damit die Regressionswerte mit den vorne aufgeführten Daten vergleichbar sind, basieren sie ebenfalls auf 5-s-Intervallen, die Angaben zur Verkehrsstärke hingegen sind die mittleren

gemessenen Minutenwerte bei höchster Verkehrsnachfrage. Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erläutert wurde, entsprechen diese mittleren Minutenwerte sehr gut den sich einstellenden mittleren Stundenwerten was per Definition als Leistungsfähigkeit interpretiert wird.

6.2 Einfluß des Lkw - Anteils

Der Lkw-Verkehr gewinnt einen immer stärker steigenden Einfluß auf das Verkehrsgeschehen. Die Vielfalt der Einflußgrößen ist beim Lkw-Verkehr jedoch fast noch größer als beim reinen Pkw-Verkehr. Daher soll hier der Einfluß des Lkw-Anteils auf die Leistungsfähigkeit nur in einer sehr stark vereinfachten Form soweit betrachtet werden, daß ein Eindruck von den Auswirkungen entsteht. Für eine systematische und vollständige Behandlung sind weitergehende Untersuchungen notwendig. Der hier dargestellte Ansatz vereinfacht die Modellierung des Lkw-Verkehrs dahingehend, daß Einschränkungen hinsichtlich des Fahrstreifenwechselverhaltens festgelegt wurden. Die Aufteilung der Wunschgeschwindigkeiten entspricht einer willkürlichen Wahl, Anhaltspunkte dafür gibt die von HOTOP (1988) durchgeführte Untersuchung. Die gewählte Aufteilung ist in Tabelle 10 zu sehen.

Pkw - Wunschgeschwindigkeiten					
Fahrstreifen	μ	σ	Min	Max	Einheit
1	31.39	5.56	20.83	47.22	[m/s]
2	36.94	5.56	26.39	51.39	[m/s]
Lkw - Wunschgeschwindigkeiten					
Fahrstreifen	μ	σ	Min	Max	Einheit
1	27.39	5.56	20.83	30.22	[m/s]
2	28.39	5.56	25.83	33.22	[m/s]

Tab. 10: Aufteilung der Wunschgeschwindigkeiten auf Pkw und Lkw.

Für alle Lkw ist der rechte Fahrstreifen der Zielfahrstreifen. Lediglich bei einer Simulation wurde auch auf dem zweiten Fahrstreifen eine geringe Anzahl von Lkw eingespeist, so daß ein Eindruck des Verkehrsablaufs unter diesen Situationen gegeben ist. Überholen wurde den Lkw verwehrt, befanden sie sich erst einmal auf dem rechten Fahrstreifen. Hier sind vor allen Dingen umfangreiche Messungen über das Fahrstreifen-Wahlverhalten von Lkw speziell bei mehr als zwei Fahrstreifen notwendig.

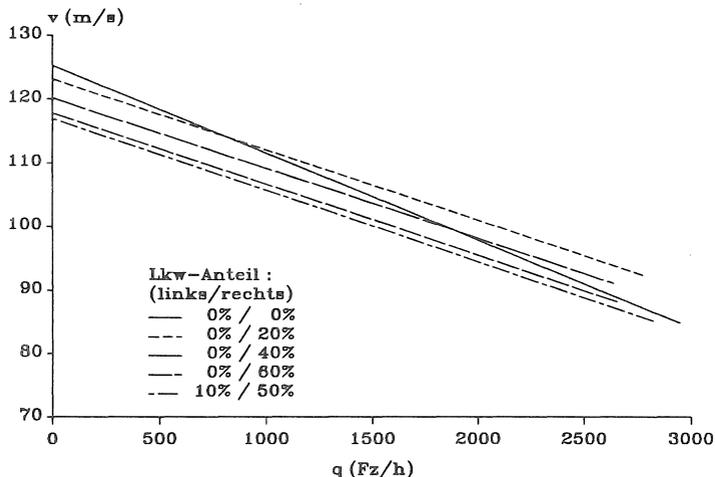


Abb. 30: Gegenüberstellung von reinem Pkw - Verkehr und dem Einfluß von Lkw - Anteilen auf den Verkehrsablauf (5 s- Intervalle auf 1 km Strecke). Die Legende gibt jeweils die Prozentsätze des Lkw- Anteils für den rechten bzw. linken Fahrstreifen an.

Abb. 30 zeigt den Einfluß auf den Verkehrsablauf von 20%, 40%, 60% Lkw- Anteil auf dem rechten Fahrstreifen und in einem Fall von 50% auf dem rechten und 10% auf dem linken Fahrstreifen. Auch hier sind wieder die sich aus der Rechnung ergebenden Regressionsgeraden zusammen mit der Referenzsimulation dargestellt.

Das Fixieren der Lkw auf den rechten Fahrstreifen verursacht, daß die Simulationen bis zu 20% - Lkw - Anteil⁹ zwar eine geringere Leistungsfähigkeit, jedoch im Verkehrsablauf höhere mittlere Geschwindigkeiten erreichen. Dies ist auf die sich unter diesen Umständen ergebende harmonische Verteilung der Einzelfahrzeuge auf die Fahrstreifen zurückzuführen. Erst bei noch höheren Lkw-Anteilen bleiben sowohl Leistungsfähigkeit als auch mittlere Geschwindigkeit unter dem Niveau des reinen Pkw-Verkehrs. Hier gewinnt der Einfluß der geringeren Wunschgeschwindigkeiten der Lkw zunehmenden Einfluß. Die Simulation mit 10% Lkw-Anteil auf dem linken Fahrstreifen zeigt eine noch deutlicher reduzierte mittlere Geschwindigkeit bei allerdings leicht erhöhter Leistungsfähigkeit. Grundsätzlich kann man

⁹ 20% Lkw-Anteil auf dem rechten Fahrstreifen entsprechen 10% Gesamt - Lkw - Anteil, resultierend durch die gleichmäßige Aufteilung der eingespeisten Verkehrsstärken auf die Fahrstreifen.

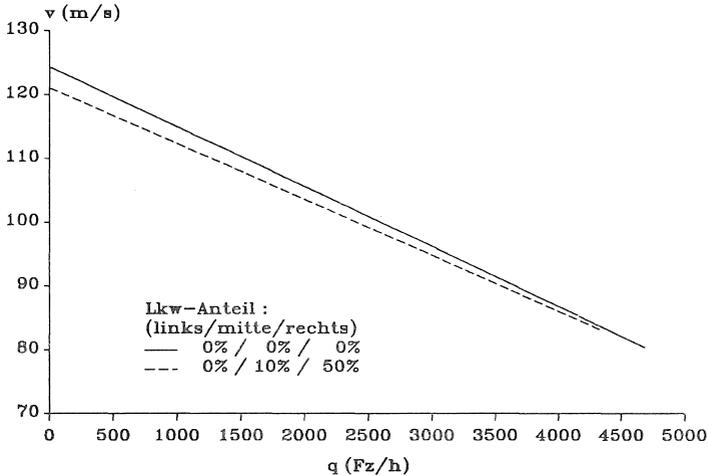


Abb. 31: Simulation eines dreistreifigen Verkehrsablaufs mit und ohne Lkw-Anteil (5 s - Intervalle auf 1 km Strecke). Legende: Lkw-Anteil auf dem linken, mittleren und rechten Fahrstreifen.

jedoch sagen, daß sich keine gravierenden Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten ausprägen. Die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit liegen im Bereich von 5%.

Abb. 31 ergänzt die zweistreifige Lkw-Simulation durch zwei Beispiele dreistreifigen Verkehrsablaufs. Während die mittleren Geschwindigkeiten annähernd gleich verlaufen, bleibt die Leistungsfähigkeit mit Lkw-Anteil um rund 10% unter der des reinen Pkw-Verkehrs. Dennoch kann man auch hier nicht von einem deutlichen Einfluß des Lkw-Verkehrs auf die Leistungsfähigkeit sprechen, insbesondere, wenn man das stark vereinfachte Verhalten bei der Fahrstreifenwahl berücksichtigt.

6.3 Engpaßsituationen

Erste Simulationen mit einem Kapazitätsengpaß (Reduktion von drei auf zwei Fahrstreifen) zeigten eine starke Abhängigkeit des Verkehrsflusses von der stromabwärts liegenden Engstelle. Deswegen wurde eine eingehende Betrachtung dieser Situation notwendig, sie sollte den Zusammenhang zwischen der Schwankung des Zuflusses und der Weite der Rückwirkung auf-

zeigen. Verkehrsabläufe mit Engpässen wurden an zwei unterschiedlichen Situationen betrachtet: Reduktion um einen Fahrstreifen bei einer zweistreifigen Strecke und desgleichen bei einer dreistreifigen Strecke.

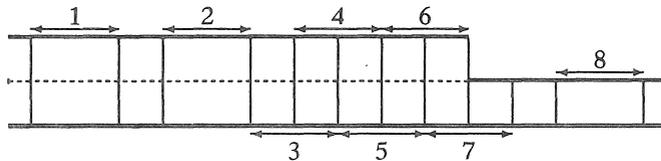
Die erste Untersuchungsstrecke setzte sich aus einer zweistreifigen, 3000 m langen Zuflußstrecke und einer 500 m langen einstreifigen Abflußstrecke zusammen. Der linke Fahrstreifen mündete bei $x = 3000$ m in den rechten. Die eingespeisten Verkehrsmengen blieben über bestimmte Zeitintervalle konstant. Sie wurden so gewählt, daß mit Rückstaus zumindest auf dem wegfallenden Fahrstreifen zu rechnen war. Die Entscheidungen der FFE und die Größen, die diese Entscheidungen beeinflussten, wurden beibehalten. Eingespeist wurden jeweils pro Fahrstreifen:

Dauer	20'	10'	10'	10'	10'	10'	10'	10'	30'	min
2 Str.	400	500	600	700	800	700	600	500	450	Fz/h
3 Str.	400	500	600	800	1000	800	600	500	450	Fz/h

Nach einem zweimaligen Durchlauf dieser Reihenfolge existieren somit Daten im Umfang von 4 h Gesamtdauer. Es wurden insgesamt acht Meßabschnitte eingerichtet. Vor der Engstelle lagen sieben dieser Meßstrecken mit einer jeweiligen Länge von 200 m, eine mit einer Länge von 200 m dahinter. Auch diese Messungen wurden mit dem räumlich - zeitlichen Meßverfahren und einer Intervallgröße von 1 min durchgeführt. Die Meßstrecken hatten folgende Lage:

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	
von	2000	2300	2500	2600	2700	2800	2900	3200	m
bis	2200	2500	2700	2800	2900	3000	3100	3400	m

Schema der Strecke mit den eingezeichneten Meßabschnitten:



Die beiden Abbildungen 32 und 33 geben unter Anwendung des weiter vorne erwähnten Hüllkurvenverfahrens den Bereich, in dem die gemessenen Werte liegen, anschaulich wieder. Die schraffierte Fläche entspricht dem Verkehrsablauf hinter dem Engpaß, nachdem sich der Verkehrsfluß wieder konsolidiert hat. Die Kapazität der einstreifigen Strecke liegt bei rund 1600 Fz/h, die der zweistreifigen Abflußstrecke bei rund 3400 Fz/h. Im

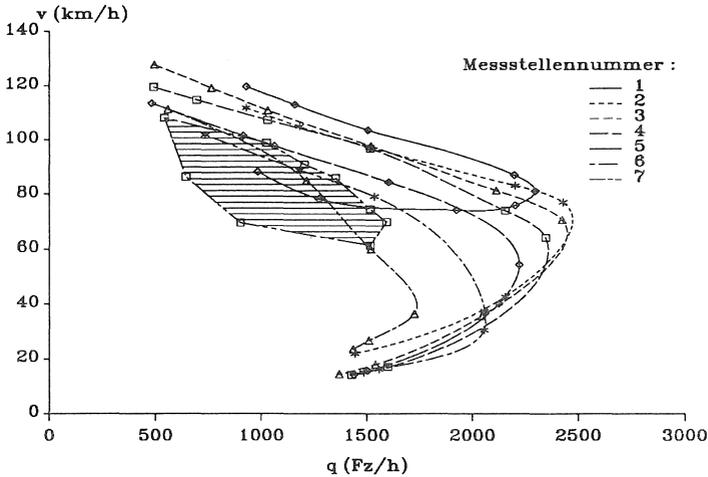


Abb. 32: Simulation eines Engpasses einer zweistreifigen Strecke ohne Lkw-Anteil. Die schraffierte Fläche gibt den Verkehrsablauf hinter dem Engpaß wieder (1-min - Intervalle). Darstellung durch Einhüllende der simulierten Werte.

zweistreifigen Abfluß herrscht mehr als die doppelte Kapazität zum einstreifigen, woraus man die gewünschte Wirkung des gezielt gewählten Wechselalgorithmus erkennen kann.

Es ist auch zu beachten, daß im Modell keine Maßnahmen getroffen wurden, um die Geschwindigkeitsanpassungen der Fahrer an die Engstelle nachzubilden. Durch eine entsprechende Modifikation dürfte eine zusätzliche erhebliche Glättung des Verkehrsablaufs zu erreichen sein. Die Entfernung zur Engstelle, bei der die FFE diese wahrnahmen und versuchten, auf den rechts gelegenen Fahrstreifen zu wechseln, betrug 300 bis 350 m.

Eine sehr detaillierte Untersuchung zur Frage des Verkehrsablaufs vor Engpässen wurde von BOLL (1979) vorgelegt. Er beschränkte seine Untersuchungen auf die Verengung von zwei auf einen Fahrstreifen. Er führte sowohl umfangreiche empirische Messungen wie auch deterministische und stochastische Modellbetrachtungen durch. Aus seiner Arbeit lassen sich die folgenden Aussagen herausnehmen:

1. Solange der Zufluß unter der Kapazität des Engpasses bleibt, tritt vor dem Engpaß eine stehende Stoßwelle auf, der Ort der Zustandsände-

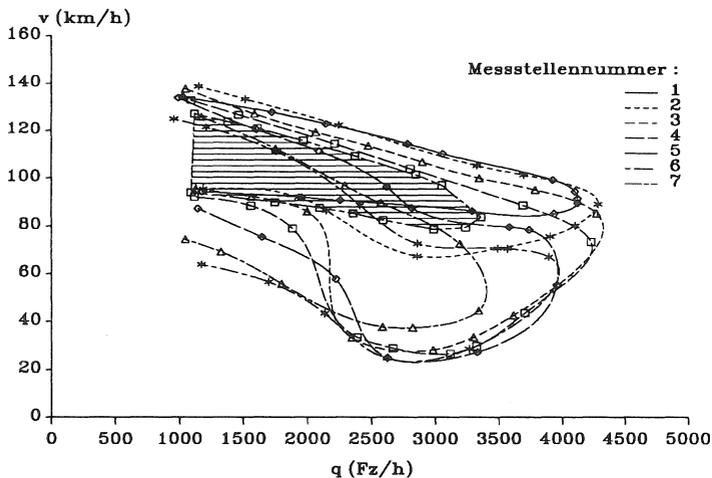


Abb. 33: Simulation eines Engpasses einer dreistreifigen Strecke ohne Lkw-Anteil. Die schraffierte Fläche gibt den Verkehrsablauf hinter dem Engpaß wieder (1-min - Intervalle). Darstellung durch Einhüllende der simulierten Werte.

zung bleibt konstant. Es verringert sich die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstromes durch eine Dichteänderung bei gleicher Verkehrsstärke.

2. Steigt der Zufluß über die Leistungsfähigkeit des Engpasses an, so bildet sich vor dem Engpaß ein Stau, der mit der Geschwindigkeit

$$u = \frac{q_Z - q_E}{k_Z - k_E}$$

entgegen der Fahrtrichtung wächst. In dieser Gleichung sind q_Z und k_Z die Verkehrsstärke und die Dichte des Zuflusses. q_E und k_E beschreiben die Leistungsfähigkeit und die zugehörige Dichte im Engpaß.

3. Löst sich der Stau auf, d.h., geht der Zufluß auf Werte zurück, die unter der Leistungsfähigkeit des Engpasses liegen, so entsteht eine Stoßwelle mit positiver Geschwindigkeit, die sich ebenfalls nach obiger Formel errechnen läßt.

Die von BOLL durchgeführten Untersuchungen besitzen auch für die in dieser Arbeit angenommene Engpaßsituation Gültigkeit. Selbst bei gerin-

gen Zuflußstärken bilden sich aufgrund der gewählten Schranken für den Fahrstreifenwechsel Instationaritäten aus.

Es lassen sich folgende Aussagen für die Beurteilung des Verkehrsablaufs unter einer Engpaßsituation zusammenfassen:

- Die Kapazität des einstreifigen Engpasses liegt bei rund 1600 Fz/h, die des zweistreifigen bei rund 3400 Fz/h.
- Zuflüsse über der Kapazitätsgrenze verursachen Stau vor der Engstelle. Dieser Stau löst sich wieder auf, solange der mittlere Zufluß unter der Kapazitätsgrenze bleibt.

Das Resümee aus diesen Untersuchungen sieht daher wie folgt aus:

- Dadurch, daß die FFE einen Sicherheitsabstand einhalten müssen, ist ein Hineindrängen nur begrenzt möglich. Die FFE werden in der Regel gezwungen, vor dem Hindernis abzubremsen und erzeugen so Störungen unmittelbar vor der Engstelle.
- Wird die erlaubte Behinderungsschwelle heraufgesetzt, so können zwar mehr FFE von dem linken auf den rechten Fahrstreifen wechseln ohne verzögern zu müssen, gleichzeitig werden jedoch die Behinderten gezwungen, abzubremsen.
- Der vorliegende Algorithmus erlaubt keine strategischen Entscheidungen in einiger Entfernung vor der Engstelle, wie es durch eine rechtzeitige Beschilderung in der Realität geschehen würde. Eine entsprechende Modellierung könnte Störungen vermeiden, solange der Zufluß unter der Kapazitätsgrenze bleibt.

Für Optimierungen des Verkehrsablaufs vor Engstellen wären weitere eingehende Untersuchungen nötig, die jedoch Modellerweiterungen und insbesondere umfangreiche empirische Messungen erfordern würden. So sind insbesondere kurzfristige Geschwindigkeitsveränderungen (z.B. Beschleunigung zum Erreichen einer Lücke) nicht im Modell enthalten.

6.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

6.4.1 Vergleich mit empirischen Daten

Für den Vergleich von Simulationsdaten und empirischen Daten standen mehrere Messungen des Instituts für Verkehrswesen zur Verfügung, aus denen zwei ausgewählt wurden, die auf der A5 zwischen Bruchsal und

Karlsruhe aus dem Jahre 1978 stammen. Die Meßwerte basieren auf Querschnittsmessungen mittels induktiver Doppelschleifen. Als Bezugsdatensatz wurde für die Gegenüberstellung der Grunddatensatz (Lauf 1) herangezogen, da die dort verwendete Wunschgeschwindigkeitsverteilung auf Messungen beruht.

Die Gegenüberstellung der gemessenen Intervalldaten birgt deswegen Schwierigkeiten, da keine Aussage über das vorhandene Reaktionspotential der Fahrzeugführer getroffen werden kann. Bereits beim Vergleich der auf der Basis einer 1 - s - Reaktionskonstanten ermittelten Werte mit empirischen Daten zeigt sich, daß die realen Verkehrsstärkewerte eher geringer ausfallen als die unter den sicheren Bedingungen. Es empfiehlt sich daher, den Vergleich auf der Basis von Zeitlücken- oder Abstandsverteilungen durchzuführen.

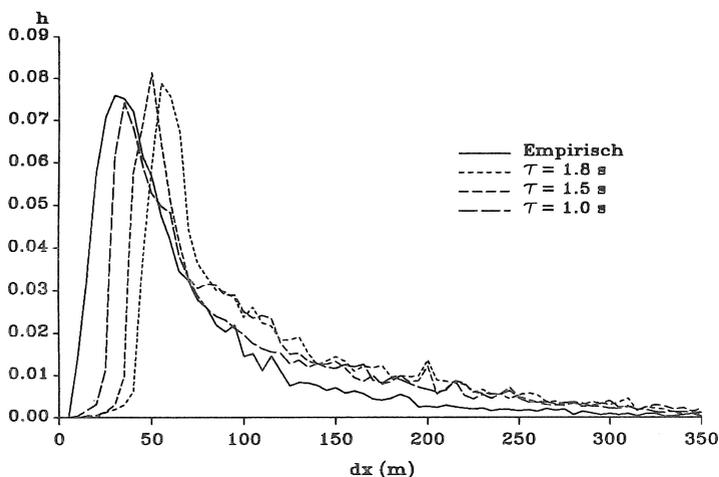


Abb. 34: Gegenüberstellung von Abstandsverteilungen des zweistreifigen Verkehrsablaufs aus empirischen und simulierten Daten mit unterschiedlicher Reaktionskonstanten τ .

Abbildung 34 zeigt eine relative Häufigkeitsverteilung des Abstandsverhaltens für empirische Daten eines zweistreifigen Verkehrsablaufs und entsprechende Simulationen mit unterschiedlichen Reaktionskonstanten τ . Abb. 35 zeigt die zugehörige Summenkurve. Der Anteil der Abstände, die geringer als die sicheren sind, liegt bei rund 15%.

Abb. 36 ergänzt die Darstellungen durch eine Abstandsverteilung aus empi-

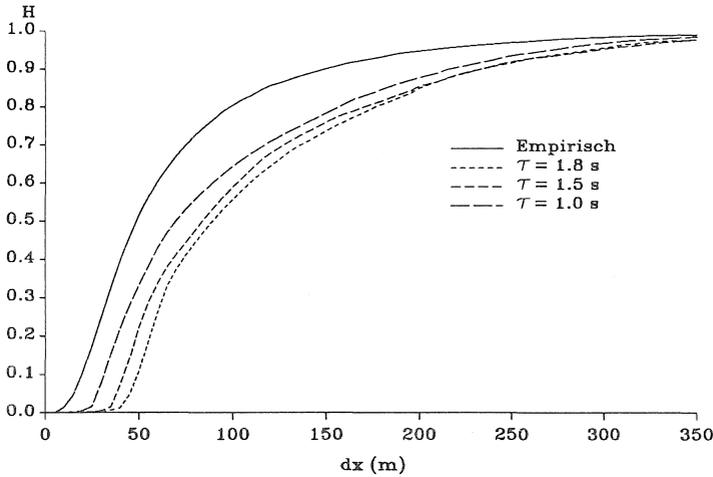


Abb. 35: Summenkurven von Abstandsverteilungen zweistreifigen Verkehrsablaufs aus empirischen und simulierten Daten mit unterschiedlicher Reaktionskonstanten τ .

rischen Daten und entsprechender Simulation bei dreistreifigem Verkehrsablauf. Reaktionskonstante der Simulation ist $\tau = 1.8$ s. Die Gegenüberstellungen zeigen die vorhandenen Anteile im Bereich kleiner Abstände. Selbst bei Berücksichtigung von Kombinationen wie - vorderes Fahrzeug ist schneller - und - Folgefahrzeug ist im Bremsvorgang -, kann nicht davon ausgegangen werden, daß alle Fahrer die geringen Zeitlücken beherrschen. Das Geschwindigkeitsniveau liegt sowohl für die Simulation als auch bei den gemessenen Werten zwischen 90 und 100 km/h.

In Abbildung 37 sind die Hüllkurve aus Abbildung 27 und empirische Daten gemeinsam dargestellt. Hier sind 1 - Minuten - Intervalle aus einer realen Messung herangezogen worden. Die Meßwerte wurden in Klassen von Häufigkeiten eingeteilt. Kriterium war die Häufigkeit des Auftretens von Zeitlücken unter 1 s pro Meßintervall. Die einzelnen Bereiche sind ebenfalls mit dem Hüllkurvenverfahren abgegrenzt worden. Betrachtet man den letzten Bereich, der die Häufigkeit größer 20 repräsentiert, so kann man die folgende Betrachtung anstellen: Greift man sich den Verkehrsstärkewert 3000 Fz/h heraus, so entspricht dies einem Erwartungswert von 1.2 s für die Zeitlücken zwischen den einzelnen Fahrzeugen. In diesem Verkehrsstärkebereich wurde jedoch eine Häufigkeit von rund 30 Zeitlücken kleiner 1 s im Betrachtungsintervall beobachtet. Der Verkehrsstärkewert im Minuteninter-

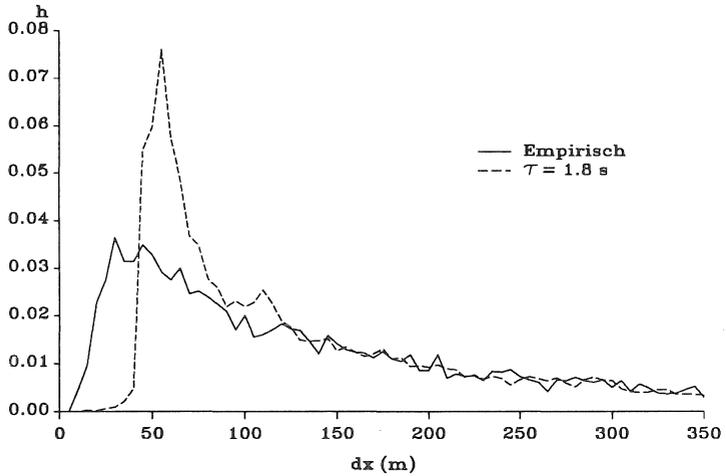


Abb. 36: Gegenüberstellung von Abstandsverteilungen aus empirischen und simulierten Daten aus dreistreifigem Verkehrsablauf.

vall beträgt 50 Fz/min, von denen demnach 30 Fahrzeuge Zeitlücken kleiner 1 s einhalten. Um dennoch auf den Erwartungswert von 1.2 s zu kommen, heißt das, daß bei den restlichen 40 % deutlich größere Zeitlücken auftreten.

Eine Messung, die diesen Sachverhalt bestätigt, findet sich in LEUTZBACH, SIEGENER, WIEDEMANN (1970), die mit Hilfe der relativ sicheren Abstandsformel die Anteile der riskant fahrenden Fahrzeuge im realen Verkehrsablauf untersucht haben. Sie unterschieden drei Fahrzeugklassen (Pkw, Lkw und Lastzug) und legten für jede dieser Klassen ein bestimmtes maximales Bremsvermögen sowie für alle Klassen eine einheitliche Reaktionszeit von 1 s fest. Sie stellten fest, daß sich die Anteile riskant fahrender Fahrzeuge mit der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke erhöhen. Sie führten auch die umgekehrte Betrachtung durch: Ausgehend von den gemessenen Bruttoabständen bestimmten sie die zur Verfügung stehende Reaktionszeit. Die Häufigkeitsverteilung und die Verteilungsfunktion ist in Abbildung 38 wiedergegeben. Selbst wenn man erst Zeitlücken kleiner als 0.8 s als gefährdend ansieht (siehe Kapitel 2.1.3), so bleibt dennoch ein beträchtlicher Anteil riskant fahrender Fahrzeuge übrig.

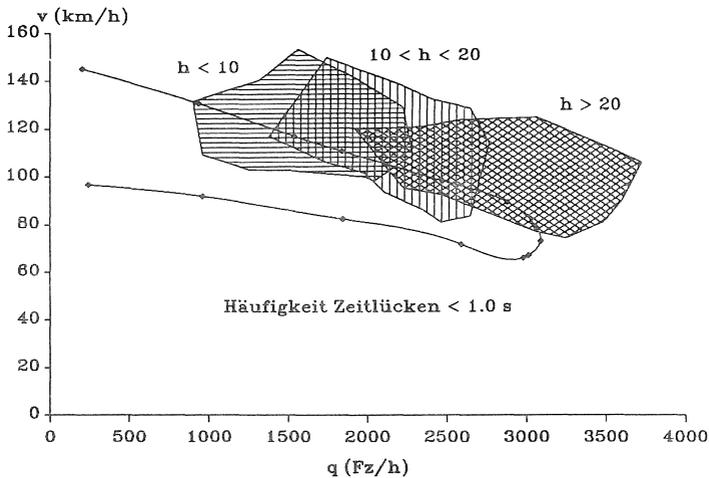


Abb. 37: Gegenüberstellung von simuliertem Verkehrsablauf und empirischen Meßintervallen zweistreifiger Verkehrsabläufe. Die empirischen Daten sind in Gruppen von Häufigkeiten kritischer Abstände zusammengefaßt (jeweils 1-min-Intervalle).

6.4.2 Berechnung der Leistungsfähigkeit unter Sicherheitsanforderungen mit einem deterministischen Folgemodell

GIPPS (1984) stellte eine Untersuchung mit der Fahrzeugfolgegleichung 2 ebenfalls unter Berücksichtigung eines relativen Sicherheitsmodells an. Er berechnete die erlaubte Folgeschwindigkeit mit

$$v_i(t + \tau) \leq b_i \tau + \sqrt{b_i^2 \tau^2 - b_i \left(2(x_{i-1}(t) - s_{i-1} - x_i(t)) - v_i(t)\tau - \frac{v_{i-1}^2}{b} \right)}$$

wobei folgende Merkmale und Werte verwendet wurden:

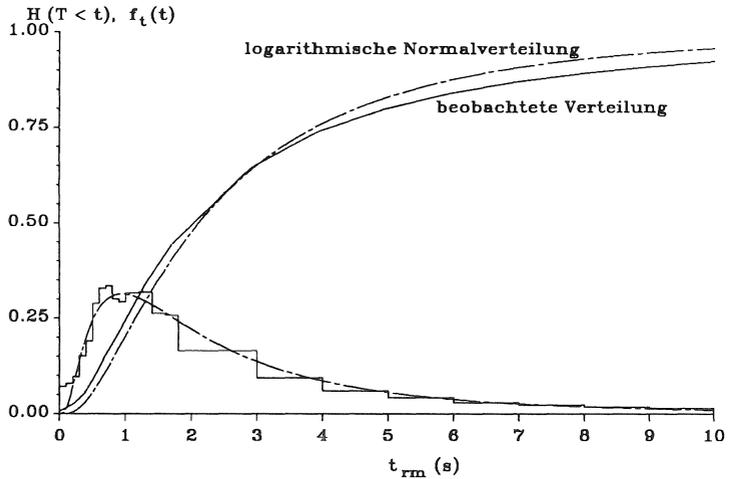


Abb. 38: Aus gemessenen Bruttoabständen ermittelte, zur Verfügung stehende Wahrnehmungs- und Reaktionsdauern; Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion für Verkehrsstärken zwischen 2100 und 2250 Fz/h. Quelle: LEUTZBACH et.al. (1970).

$V w_i$	Wunschgeschwindigkeit der Fahrzeuge (N(20.0, 3.1) [m/s])
v_i, v_{i-1}	momentane Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge
a_i	maximales Beschleunigungsvermögen: N(1.7, 0.3) [m/s ²]
b_i	Bremsvermögen des betrachteten Fahrzeugs (- 2.0 · a _i)
s_i, s_{i-1}	Länge des vorausfahrenden Fahrzeugs plus Sicherheitsabstand im Stillstand (N(6.5, 0.3) [m])
τ	Reaktionsverzögerung des betrachteten Fahrzeugs (2/3 [s])
x_i, x_{i-1}	momentane Positionen der beiden Fahrzeuge
\hat{b}	geschätztes Bremsvermögen des Vordermanns. GIPPS nahm für die Applikation einen Wert von (b _i - 3.0)/2 an.

Die Untersuchung GIPPS kommt der vorliegenden Arbeit am nächsten. Auch er simuliert Verkehrsabläufe unter sicheren Bedingungen und gibt Abschätzungen für die zu erwartende maximale Verkehrsstärke an. Bei GIPPS besitzt der Fahrer keinen so starken Einfluß auf den Verkehrsablauf wie das

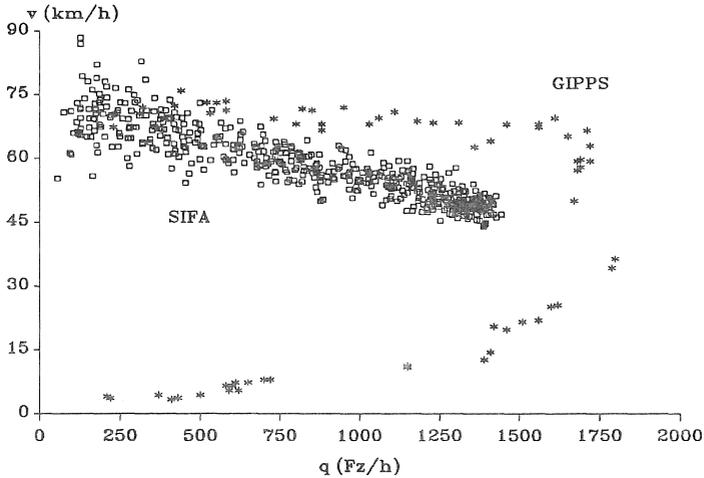


Abb. 39: v - q -Diagramm eines simulierten Verkehrsablaufs nach GIPPS (1984) auf einstreifigem Streckenabschnitt. Zum Vergleich wurde ein ebenfalls einstreifiger Verkehrsablauf mit dem Modell „Sifa“ in 1-min-Intervallen auf 1 km Streckenabschnitt simuliert.

Kontrollsystem. Dies wird durch die Steuerzeit erreicht, die mit 0.67 Sekunden unter den mittleren menschlichen Reaktionszeiten liegt. Deutlich wird dies auch an dem nahezu horizontalen Verlauf seiner Meßintervalle bis zur Kapazitätsgrenze. Im Gegensatz hierzu steht das Absinken des Geschwindigkeitsniveaus durch die menschliche Verhaltensweise bei zunehmender Verkehrsstärke. Verhaltensweise. Die Untersuchung beschränkte sich auf den einstreifigen Verkehrsablauf.

7 Zusammenfassung und Interpretation

Bei der Aufgabenstellung stand die anwendungsbezogene Untersuchung im Vordergrund. Im Verlauf der Untersuchung zeigte sich, daß die Zusammenhänge so komplex sind, daß der Schwerpunkt auf die Erarbeitung von Grundlagen für Berechnungsverfahren gelegt wurde. Mit dieser Grundlage ist es möglich, für konkrete, meist örtlich begrenzte Problemstellungen die jeweiligen Kapazitäten durch die gegebene vollständige Parameterisierung des Modells zu berechnen.

Die Flexibilität des Modells wurde durch eine Modellergänzung unter stark vereinfachenden Annahmen für Engpässe und Lkw-Anteile demonstriert. Damit konnte auch ein Eindruck von zu erwartenden Einflüssen durch Schwerverkehr und Engpässe gegeben werden.

7.1 Vorgehen

Die Verwendung eines mikroskopischen Simulationsansatzes für den Individualverkehr und eines kinematischen Sicherheitskonzeptes, das nicht nur die Bewegung der Fahrzeuge in Längsrichtung, sondern auch Querbewegungen umfaßt, hat es ermöglicht, ein Modell für den mehrstreifigen Verkehrsablauf auf Richtungsfahrbahnen unter Sicherheitsbedingungen zu erstellen.

Die Verwendung einer einzelnen Abstandsformel reicht allein nicht aus, um die Sicherheit zu jedem Zeitpunkt zu garantieren, wenn man unterschiedliche Bremsvermögen und beliebige Geschwindigkeitskombinationen zugrunde legt. Mit anderen Worten, eine breit gestreute Typenvielfalt von Fahrzeugen mit stark differierenden Fahrzeugeigenschaften erfordert eine aufwendige Überprüfung zur Wahrung des sicheren Abstands.

Die Feinheit der Nachbildung von Fahrzeugbewegungen erfährt durch die Wahl eines Zeitschritts für die diskrete Simulation Einschränkungen. An dieser Stelle konkurrieren Genauigkeit und Rechenaufwand.

Das Verhalten beim Fahrstreifenwechsel unter Einfluß von Sicherheitsanforderungen ist schwer vorhersehbar. Für die Analyse war es jedoch notwendig, ein hypothetisches Modell zu implementieren, mit dem Auswirkungen von bestehenden Fahrvorschriften und mögliche Einflüsse durch Steuerelemente untersucht werden können. Untersucht wurden die Auswirkungen der Sicherheitsanforderungen anhand sehr umfangreicher Simulationen des reinen Pkw-Verkehrs und beispielhafter Betrachtungen von Lkw-Einflüssen und von Engpässen. Am reinen Pkw-Verkehr wurden detailliert und gezielt Einflußgrößen untersucht, die sich sowohl auf

das Abstandsverhalten als auch auf das Fahrstreifenwechsel-Verhalten auswirken. Die Untersuchungen zum Lkw-Verkehr als auch von Engpaßsituationen dienen lediglich als beispielhafte Ergänzung zu der Arbeit und sind schon durch die teilweise stark vereinfachenden Annahmen hinsichtlich des Wunschgeschwindigkeits- und Fahrstreifenwahl - Verhaltens nur als grobe Abschätzung der Auswirkungen anzusehen.

7.2 Ergebnis

Die Ergebnisse können in zwei Gruppen geteilt werden:

1. Auswirkungen der Sicherheitsanforderungen auf den Verkehrsablauf sowie
2. daraus resultierende Leistungsfähigkeiten und Kapazitäten

Bedingung für die nachfolgend angeführten Merkmale ist jedoch eine Sicherheitsforderung, die zu jedem Zeitpunkt eingehalten wird.

7.2.1 Auswirkungen auf den Verkehrsablauf

Die folgende Aufzählung gibt zunächst einen Überblick über die beobachteten Merkmale:

- Die Streuung der gemessenen Geschwindigkeiten wird mit zunehmender Verkehrsstärke geringer.
- Es existieren keine Meßintervalle, bei denen die mittlere Geschwindigkeit unter den kleinsten Wunschgeschwindigkeiten liegen. Dies indiziert einen stabilen Verkehrsablauf. Es ist nicht zu erwarten, daß sich ohne Engpaß ein Stau bildet.
- Im Bereich unterhalb der maximalen Verkehrsstärken existieren diverse Möglichkeiten zur Anhebung der mittleren Geschwindigkeiten ohne Sicherheitseinbußen.
- Die Auswirkung von Schwankungen des Bremsvermögens, wie sie z.B. durch Witterungseinflüsse hervorgerufen werden können, führen zu keinen gravierenden Einbußen der Leistungsfähigkeit. Die Absenkung der mittleren Geschwindigkeit bei hohen Verkehrsstärken liegt zwischen 5 und 10 km/h.
- Die Modifikation der Wunschgeschwindigkeit und der Behinderungsgrenze zeigt, daß sich bei sonst gleicher Verkehrszusammensetzung unter Beibehaltung der mittleren Geschwindigkeit die Verkehrsstärke erhöhen läßt.

- Lkw-Anteile beeinflussen die mittlere Geschwindigkeit durch ihr geringeres Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvermögen, besonders dann, wenn lokale Gegebenheiten den Pkw-Verkehr diesbezüglich bevorzugen (z.B. an Steigungsstrecken).

7.2.2 Leistungsfähigkeit

Die nachfolgende Zusammenfassung geht von der Vorstellung aus, daß sich die Leistungsfähigkeit aus den mittleren Werten bei höchster Nachfrage und die Kapazität aus den höchsten Einzelwerten ableitet. Wie in Kap. 6.1.1 gezeigt wurde, decken sich die mittleren Minutenwerte mit den entsprechenden Stundenwerten weitgehend, so daß die entsprechenden Mittelwerte bei der Intervallgrößen als gleich gut angesehen werden können.

- Die Leistungsfähigkeit hängt praktisch kaum von Einflußgrößen wie Wunschgeschwindigkeit¹⁰ und Überholschwellenwerten ab. Unterschiede ergeben sich für diese Einflußgrößen nur durch die erzielte mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstromes.
- Die maximal erreichbare Verkehrsstärke hängt fast ausschließlich von der vorgegebenen Reaktionskonstanten zur Berechnung des sicheren Abstands ab. Geht man von den in Tab. 7 dargestellten Verkehrsstärkewerten aus, so liegen die erreichbaren Leistungsfähigkeiten zwischen 27% ($\tau=1.8$ s) und 43% ($\tau=1.0$ s) unter der theoretisch möglichen Grenze $q_{max} = 1/\tau$. Vergleicht man die Ergebnisse mit realen Meßwerten bzw. mit den Angaben aus Richtlinien, so erzielt man mit Reaktionskonstanten um 1 s Leistungsfähigkeiten, wie sie das HCM (1985) für amerikanische Verhältnisse und HEIDEMANN (1989) für deutsche Verhältnisse angeben.
- Unterschiedliche Bremsvermögen der Fahrzeuge wirken sich nicht drastisch (unter 4%) auf die Leistungsfähigkeit aus. Sie wird aber auf einem deutlich geringeren mittleren Geschwindigkeitsniveau erzielt.
- Ein realistischer Lkw-Anteil wirkt sich ebenfalls nicht signifikant auf die erzielbare Leistungsfähigkeit aus. Auch hier ist in erster Linie der Einfluß auf das mittlere Geschwindigkeitsniveau bemerkbar. Auswirkungen sind erst durch stark geschwindigkeitsbeeinflussende Gegebenheiten wie Steigungen oder Engpässe zu erwarten, da sich dann das geringere Beschleunigungsvermögen der Lkw bemerkbar machen wird.
- Die Betrachtung kapazitiver Engpässe zeigt deutlich, daß die Anpassung der Verkehrsstärken an die Kapazität der Abflußstrecke erst sehr

¹⁰ Zumindest oberhalb einer gewissen Mindestgeschwindigkeit

spät beginnt. Erst unmittelbar vor der Engstelle (< 500 m) geht die Verkehrsstärke zurück.

7.2.3 Resümee

Die hier vorgestellte Sicherheitsform kann als halbautomatisches Fahren bezeichnet werden. Der Fahrer kann Fahrstreifen und Geschwindigkeit solange frei wählen, wie er den notwendigen Sicherheitsabstand nicht unterschreitet. Bei kleiner werdenden Reaktionskonstanten wird der Faktor „Fahrer“ bestimmend, d.h., seine Wunschabstände werden dann im Mittel deutlich über den Sicherheitsabständen liegen. Dies führt zu den Hilfestellenden Systemen, die dem Fahrer dann eine weitere Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug empfehlen. Generell werden die Anteile mit geringer werdenden Reaktionskonstanten steigen, die größere Abstände einhalten wollen. Aus den Abbildungen 34 bis 36 und 38 geht hervor, daß etwa rund 45% aller Fahrer mehr als den doppelten notwendigen Abstand einhalten. Für diesen Teil sind Annäherungsempfehlungen sinnvoll.

Die Untersuchung der Einflüsse des hier gewählten Sicherheitskonzepts auf den Verkehrsablauf hat mehrere Aspekte aufzeigen können:

- Die Verkehrsstärke auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen unter Sicherheitsbedingungen wird unter den momentan zu messenden Maximalwerten liegen. Die Abschätzungen für den Verkehrsablauf im unteren Bereich des $v - q$ - Diagramms zeigen jedoch, daß hier Kapazitätsreserven vorhanden sein können.
- Es geht ein starker Einfluß auf die mittlere Geschwindigkeit von der Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten aus. Durch Reduktion der Streubreite kann u.U. der Verkehrsablaufs stärker verbessert werden als durch die Reduktion der Reaktionszeit, zumindest, wenn man die Reisezeit zu verbessern wünscht. Bei mittleren Verkehrsstärken lassen sich so auch Erhöhungen der Verkehrsstärken realisieren.
- Der Grad der Behinderung, der beim Fahrstreifenwechsel einem nachfolgenden Fahrzeug zugemutet wird, führt zu einem deutlichen Absinken der mittleren Geschwindigkeit, aber nicht zu Änderungen der Kapazität.
- Das mehr oder weniger beachtete Rechtsfahrgebot führt in Kombination mit der zumutbaren Überholschwelle zu unterschiedlichen Fahrstreifenaufteilungen. Aus einem Rechtsfahrgebot mit einem hohem Schwellenwert resultiert ein höherer Anteil auf dem rechten, aus einem weniger beachteten Rechtsfahrgebot mit geringem Schwellenwert mehr Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen.

- Die Wirksamkeit des vorgestellten hypothetischen Wechselmodells kann den Abbildungen zur Engpaßsituation und dem einstreifigen Beispiel in Abb. 39 entnommen werden. Während die Kapazität des einstreifigen Abschnitts in Abb. 39 bei rund 1500 Fz/h liegt, erreicht der einstreifige Abfluß in Abb. 32 rund 1600 Fz/h. Im Gegensatz zu diesem einstreifigen Abfluß erreicht der zweistreifige eine Kapazität von fast 3400 Fz/h. Es bildet sich tatsächlich ein gewisser Sortiereffekt, der zu höherer Kapazität führt.

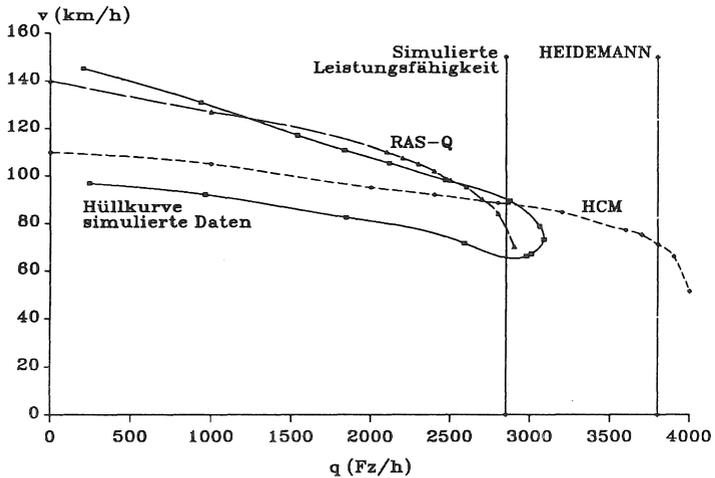


Abb. 40: Verallgemeinerte Darstellung der aus Sicherheitsanforderungen resultierenden Leistungsfähigkeit gegenüber bisher existierenden Richtlinien auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen.

In Abbildung 40, wurden simulierte Daten, gemessene Daten und Werte aus Richtlinien zusammengefaßt. Man kann feststellen, daß die Werte der RAS-Q erstaunlich gut der oberen Grenze der Hüllkurve entsprechen. Die Angaben aus dem HCM (1985) liegen deutlich darüber. Vergleicht man beide Kurven mit dem Resultat der Referenzsimulation (Lauf 1), so entsprechen die Angaben der RAS-Q einer Sicherheitsforderung von $\tau = 1.8$ s, die des HCM in etwa der von $\tau = 1.3$ s. Der flachere Verlauf der Kurve des HCM resultiert aus den amerikanischen Geschwindigkeitsvorschriften. Kennzeichen des sicheren Verkehrsablaufs ist der nahezu lineare Verlauf bis hin zu einem Maximalwert. Höhere Verkehrsstärken lassen sich nur durch Reduktion der Reaktionszeit erreichen.

Unterschiedliche Wunschgeschwindigkeitsverteilungen und Schwellenwerte zum Fahrstreifenwechsel führen zu keinen wesentlich anderen Leistungsfähigkeiten. Unterhalb der Kapazitätsgrenze läßt sich durch Beeinflussung dieser Größen allerdings sehr wohl ein Einfluß auf die Leistungsfähigkeit erzielen. Die großen Vorteile eines Sicherheitsansatzes, wie er hier verfolgt wurde, liegen in der Gleichmäßigkeit und damit auch Bestimmbarkeit des Verkehrsablaufs.

Durch gezielte Beeinflussung der Fahrerwünsche (Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer) und durch technische Restriktionen (aus der Größe der Reaktionskonstanten ergeben sich die Minimalabstände, aus der Höhe der Wechselschwellen bzw. gegenseitigen Behinderungsschwellen die notwendigen Bremsreaktionen) kann der Verkehrsfluß fast als deterministisch bezeichnet werden.

7.3 Anwendungsmöglichkeiten

7.3.1 Gegenüberstellung von Simulation und realem Verkehrsablauf

Um den vorhandenen realen Verkehrsablauf hinsichtlich Sicherheit bzw. Leistungsreserven besser beurteilen zu können, kann das hier erarbeitete Simulationsmodell seine Anwendung in Vergleichen der simulierten Daten mit empirisch gemessenen Werten finden. Hierzu kann eine Darstellung, wie sie in Abbildung 41 zu finden ist, dienen. Man hat die Möglichkeit, die Daten aus empirischen Messungen in eine solche Darstellung einzublenden.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verhaltensweisen der Fahrer ist es mit einem derartigen Sicherheitsansatz möglich, für Steuerungsmodelle Schwellenwerte für Verkehrsstärken bzw. Geschwindigkeiten zu quantifizieren.

Die für Stauzustände angegebenen Zusammenhänge beruhen auf vereinfachten Modellannahmen. Um auch für diesen Bereich genauere Angaben zur Verfügung stellen zu können, benötigt man detaillierte Vorgaben situationsbezogener Randbedingungen (bauliche Gegebenheiten, Belastungsganglinien, Verhaltensbeobachtungen).

7.3.2 Ausblick

Raum für eine Weiterentwicklung gibt es in einer Detaillierung des Lkw-Verkehrs und in der Verfeinerung des generellen Verhaltenskonzepts, wodurch genauere Untersuchungen hinsichtlich der Einsatzgrenzen des Si-

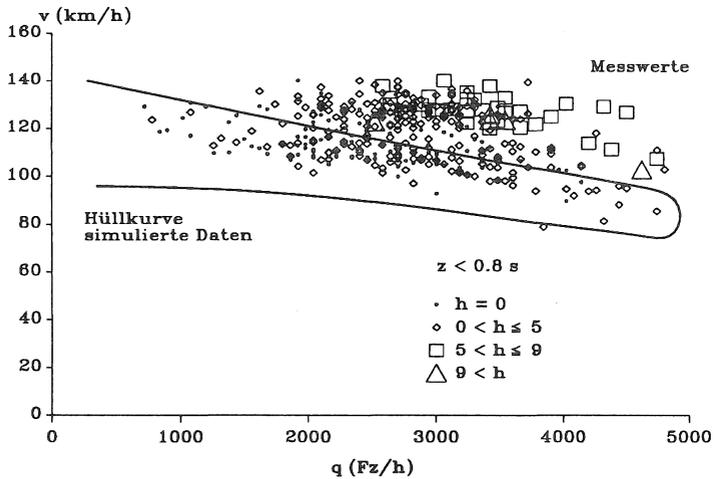


Abb. 41: Beispielhafte Anwendung der Hüllkurve: Darstellung von Zeitlücken unter 0,8 s pro Meßintervall (Minutenwerte) realen Verkehrsablaufs (dreistreifig). Je größer der eingezeichnete Punkt, umso häufiger treten gefährdende Abstände in dem Intervall auf.

cherheitssysteme möglich sind. Eine feinere Simulation durch Verwendung eines kleineren Zeitschritts könnte eine exaktere Analyse der im mikroskopischen Bereich stattfindenden Ereignisse (z.B. Bremsvorgänge) ermöglichen. Ebenfalls wäre eine feinere Modellierung von Engpaßsituationen sinnvoll, da in der Praxis mit Sicherheit durch frühzeitige Informationen Verbesserungen des Verkehrsablaufs möglich sind.

Probleme wird es mit einer möglichen Realisierung eines solchen Sicherheitskonzepts durch die Grenzen der Sensortechnik geben. Denn für die vorliegende Untersuchung wurde angenommen, daß die Informationen über Geschwindigkeit und Bremsvermögen der Fahrzeuge zu jedem Abtastintervall (Zeitschritt) vorliegen. Damit müssen die folgenden Punkte von einem Sicherheitssystem erfüllt sein:

1. Möglichst genaue Zustandserfassung des Fahrzeugs (momentane Geschwindigkeit und Bremsvermögen)
2. Ein fehlerfreier Datenaustausch zwischen Fahrzeugen, speziell auf unterschiedlichen Fahrstreifen, die möglicherweise noch durch andere

Fahrzeuge verdeckt sind

Ein Anwendungsgebiet des hier vorgestellten Modells liegt in der Untersuchung verkehrlicher Auswirkungen technologischer Sicherungsmaßnahmen wie sie in verschiedenen Forschungsprogrammen in der EG und der Bundesrepublik Deutschland untersucht werden. Es zeigt sich, daß restriktive Sicherheitsmaßnahmen durch die Aggregation nicht auf den ersten Blick zu Veränderungen im makroskopischen Verkehrsfluß führen. Vorteile ergeben sich durch quantifizierbare Verkehrsmengen. Bei gegebener Sicherheitsforderung ist leicht bestimmbar, wieviel Zufluß einzelnen Strecken noch zugemutet werden kann. So lassen sich leichter Abschätzungen zu notwendigen Verkehrsverlagerungen durchführen, ebenso wie die geringer werdende Streuung der Geschwindigkeiten eine tatsächliche Reisezeitveränderung berechnen läßt. Sicherungsverfahren wie das beschriebene erlauben eine gezielte Lenkung von Verkehrsflüssen unter dem Aspekt einer sehr hohen Sicherheit.

8 Literatur

- ALBRECHT, A.; JUNG, H.; MEHLHORN, K.: Parallel Algorithms and Architectures. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1987
- BECKER, U.: Beobachtung und Beschreibung des Verkehrsablaufs vom Flugzeug aus. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 40, Karlsruhe, 1989
- BOETTGER, R.: Die Verringerung volkswirtschaftlicher Verluste an Verengungen und Einmündungen innerhalb des Fernstraßennetzes. Straßenverkehrstechnik, Heft 1, 1978
- BOLL, C.: Verkehrsablauf vor einspurigen Engpässen. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, 1979
- BRANNOLTE, U.: Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 318, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1980
- CHIMINI, L.A.; DAWSON, R.F.: The Hyperlang Probability Distribution - A Generalized Traffic Headway Model. HRR Nr. 230, Washington, 1968
- COERS, H.G.: Die internationale Forschungsentwicklung und das räumlich - zeitliche Prinzip mikroskopischer und makroskopischer Untersuchungen des Verkehrsflusses. Die Straße 7, Berlin, 1970, 368-375
- CRAMER, BERZ, GONTARD: Straßenverkehrsentscheidungen, Loseblattsammlung. C.H.Beck, 1986
- CHANDLER, R.E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E.W.: Traffic Dynamics: Studies in Car-Following. Operations Research, Vol. 6, Nr. 2, 1958
- DREYER, W.: Längsdynamik des Systems Fahrer-Fahrzeug. Sonderforschungsbereich 97, Fahrzeuge und Antriebe, TU Braunschweig, 1976
- DUNCAN, N.C.: A note on speed/flow/concentration. Traffic Engineering & Control, January 1976
- DUNCAN, N.C.: A further look at speed/flow/concentration. Traffic Engineering & Control, October 1979

- EDIE, L.C.:** Car-Following on Steady-State-Theory for Noncongested Traffic. Operations Research, Vol. 9, Nr. 1, 1961
- FERRARI, P.:** The measure of the influence of drivers behaviour on motorway capacity. Proceedings of the 2nd PROMETHEUS Workshop, Stockholm, October 1989
- FÖLLINGER, O.:** Regelungstechnik. AEG-Telefunken AG., ISBN 3-87087-116-4, 1980
- GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; POTTS, R.B.:** Car - Following Theory of Steady-State-Traffic Flow. Operations Research, Vol. 7, Nr. 4, 1959
- GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R.W.:** Nonlinear Follow-The-Leader-Models of Traffic Flow. Operations Research, Vol. 9, No. 4, 1961
- GIBSON, D.; ROSS, P.:** Simulation of Traffic in Street Networks. Transportation Engineering, December 1977
- GIPPS, P.G.:** Computer User Manual for the Program Package "MULTSIM": Multilane Traffic Simulation. CSIRO, Division of Building Research, Melbourne, Australien, 1980
- GOOS, G.:** Programmieretechnik. Skriptum zur Vorlesung. Institut für Informatik II, Universität Karlsruhe, 1982
- GREENSHIELDS, B.D.:** A study in Highway Capacity. Highway Research Board. Proc. 14, 1935, 469-477
- HEIDEMANN, D.:** Typisierung und Analyse von Dauerlinien. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 2, 1989
- HIGHWAY CAPACITY MANUAL:** Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., 1985
- HOEFS, D.H.:** Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. Heft 140 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1972
- HOTOP, R.:** Geschwindigkeiten ausländischer Lkw im Vergleich zu deutschen Lkw auf den Bundesautobahnen. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 5, 1988

- HUBSCHNEIDER, H.: Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 26, Karlsruhe 1983
- JACOBS, F.: Untersuchungen zur stochastischen Theorie des Verkehrsablaufs auf Straßen. Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 96, Bundesminister für Verkehr, Bonn 1970
- JAGUSCH, HENTSCHEL: Straßenverkehrsrecht, 29 Aufl., 1986
- JAHNKE, C.D.: Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 23, Karlsruhe, 1982
- KNUTH, D.: The Art of Computer Programming. Vol.II, 2.ed., 1981
- KÖHLER, U.: Stabilität von Fahrzeugkolonnen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 9, Karlsruhe, 1974
- LEICHTER, K.: Simulationsmodell zur Bewertung einer integrierten Verkehrslenkung in Stadtnetzen. Dissertation TU Berlin, Fachbereich Verkehrswesen, 1981
- LEUTZBACH, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer Verlag, New York / Berlin / Heidelberg, 1972
- LEUTZBACH, W.: Introduction to the Theory of Traffic Flow. Springer Verlag, New York / Berlin / Heidelberg, 1988
- LEUTZBACH, W.; BUSCH, F.: Spurwechselforgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Forschungsauftrag 1.082 G 81 H des Bundesministers für Verkehr, Karlsruhe, 1984
- LEUTZBACH; WIEDEMANN; HUBSCHNEIDER:
Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit zweispurigen Richtungsfahrbahnen im Hinblick auf empirisch nicht ausreichend verifizierbare Situationen. Forschungsauftrag der Bundesanstalt für das Straßenwesen, Karlsruhe, 1977
- LEUTZBACH, W.; SIEGENER, W.; WIEDEMANN, R.:
Über den Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen und Verkehrsbelastung auf einem deutschen Autobahnabschnitt.
In: Accident Analysis + Prevention, Vol. 2, 1970, S.93-102
- MAY, A.D.; KELLER, H.E.M.: Non - Integer Car Following Models. In: Highway Research Record, Nr. 199, Washington, 1967, S.19-32

- MAY, A.D.; KELLER, H.E.M.: Evaluation of Single- and Multi-Regime Traffic Flow Models. In: Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 86, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969, S.37-48
- MICHAELS, R.M.: Perceptual Factors in Car Following. Proceedings of the Second International Symposium-Theory of Traffic Flow 1963, OECD, Paris, 1965
- REISIG: Petri - Netze. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1986
- REUSCHEL, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. Zeitschrift des Österr. Ing.- und Arch.-Vereins, Wien, 1950
- RAS-Q: Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil Querschnitte. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1982
- SAS Users Guide (Basics, Statistics, Graph): Version 5 Edition, SAS Institute Inc., BOX 8000, Cary, NC 27511-8000
- SCHNITTGER, S.: SIFA - Sichere Fahrzeuge; Programmdokumentation. Institut für Verkehrswesen, Karlsruhe, 1991
- SCHUHL, A.: The Probability Theory Applied to Distribution of Vehicles on Two-Lane Highways. Poisson and Traffic, ENO-Foundation, 1955
- SCHWERDTFEGER, TH.: Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO). Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 500, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1987
- SMULDERS: Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs. In: Transportation Research Board, Vol. 24B, No.2, 1990
- SNV (Studiengesellschaft Nahverkehr MBH): Vergleichende Untersuchungen über bestehende und künftige Nahverkehrstechniken. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1974
- SPARMANN, U.: Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB - Richtungsfahrbahnen. Heft 263 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1978

- STEGEMANN, H.S.:** Simulation und Bewertung von Verkehr in signalgesteuerten Stadtstraßennetzen. Dissertation RWTH Aachen, Fakultät für Elektrotechnik, 1979
- TODOSIEV, E.P.:** The Action-Point Model of the Driver-Vehicle-System. Ohio State University, Engineering Experiment Station, Report No. 202A-3, 1963
- WETTERLING, K.:** Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften. Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 292, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1980
- WIEDEMANN, R.:** Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Karlsruhe, 1974
- WIEDEMANN, R.:** Wie sicher ist ein Fundamentaldiagramm? In: 25 Jahre Institut für Verkehrswesen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 36, Karlsruhe, 1987
- WIEDEMANN, R.; BECKER, U.; BUCK, A.:** Geschwindigkeitsverhalten auf Bundesautobahnen und Landstraßen. Abschlußbericht des Instituts für Verkehrswesen, 1984
- WIEDEMANN, R.; HUBSCHNEIDER, H.:** Simulationsmodelle. In: "Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr", Band 1. Lapiere, R. / Steierwald, G.; Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1987
- WIEDEMANN, R.; SCHNITTGER, S.:** Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit im Straßenverkehr (Richtungsfahrbahnen). Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 586, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1990
- WILLMANN, G.:** Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 19, Karlsruhe, 1978
- WINZER, Th.:** Messung von Beschleunigungsverteilungen. Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 319, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1980
- WOLF, H.:** Nachrichtenübertragung. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1974, ISBN 3-540-06359-5

WORRAL, R.D.; LIEBERMANN, E.: Network Flow Simulation for Urban Traffic Control Systems. Phase II, Volumes I-V, Report FHWA-RD-73-83/87, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1974

YOUNG, W.; TAYLOR, M.; GIPPS, P.: Microcomputers in Traffic Engineering. Research Studies Press Ltd., ISBN 0 86380 084X, 1989

ZILLI, M.V.: Mathematical Models for the Semantics of Parallelism. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1987

A Anhang

A-1 Auswertung der einzelnen Simulationsergebnisse

Untersucht wurde der Einfluß der Variablen auf

- die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsablaufs bei gleichen Verkehrsstärken und
- die maximalen Verkehrsstärken des Verkehrsablaufs.

Dazu wurden die folgenden Arten der Auswertung und Darstellung für die Pkw - Daten durchgeführt:

1. Eine statistische Beschreibung der Simulationsergebnisse. Hierfür wurde jede Simulationsreihe insgesamt und jede ihrer Simulationen einzeln ausgewertet:
 - Anzahl der ausgewerteten Meßintervalle
 - Mittelwert der verkehrlichen Größen über alle diese Meßintervalle
 - zugehörige Standardabweichung
 - Minimum und
 - Maximum jeder Größe über alle diese Meßintervalle
2. Eine Darstellung der einzelnen Meßergebnisse als Punktwolke. Hier wurden die einzelnen Meßintervalle in einem v-q-Diagramm gesammelt dargestellt. Die Darstellungen umfassen jeden Lauf als Ganzes und jede seiner Simulationsreihen einzeln.
3. Eine weitere Darstellungsform der obigen Daten. Hier ist jede Simulation einzeln aufgeführt. Die Darstellung entspricht jedoch einer Projektion der Punktwolke auf die Senkrechte, die durch den Mittelwert der zugehörigen Verkehrsstärke bestimmt ist. Die einzelnen Meßpunkte sind durch einen Balken umrahmt, in dessen Zentrum das Mittel der Meßgröße v liegt und der die Ausdehnung der Standardabweichung dieser Größe besitzt.

Zur besseren Kenntlichmachung der einzelnen Mittelwerte von v sind die fünf Werte, die sich aus den fünf einzelnen Simulationen mit den unterschiedlichen Quellstärken ergeben, mit einer Linie verbunden. Für eine äquivalente Darstellung des gesamten Laufes wurden für jede der 5 Quellstärken alle SdVw - Werte zusammengefaßt: $\sum_{j=1}^9 SB[J, I]$.

4. Regressionsrechnungen auf 95%igem Sicherheitsniveau für die v- q-Daten. Die resultierende Funktion ist $v = f(q)$.

- Eine lineare Regression für jede Simulationsreihe und für jeden Lauf. Der konstante Faktor wurde der Berechnung vorgegeben. Er entspricht jeweils dem Mittelwert der vorgebenen Wunschgeschwindigkeitsverteilung (die eine Zusammenfassung aller erzeugten Werte für alle Fahrstreifen ist).
- Eine exponentielle Regression mit diesen Datensätzen.

A-1-1 Beispiele für v-q-Diagramme der Simulationen

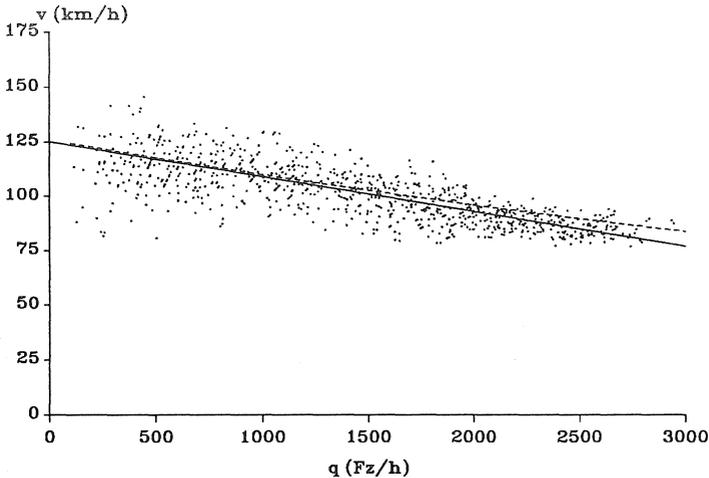


Abb. 42: v-q-Meßwerte mit linearem (durchgezogene Linie) und exponentiellem (gestrichelte Linie) Regressionsverlauf. Lauf 1: Zusammenfassung der fünf Quellstärken für $SdVw = 0$ m/s. 5-s-Intervalle über 1 km Meßstrecke, Erzeugungsgrenze: 10 m/s.

Am Beispiel des Laufes 1 soll die Art und Form der Diagramme zur Auswertung gezeigt werden. Eine Gesamtdarstellung aller Diagramme der PKW - Simulationen ohne Engpaß ist in WIEDEMANN, SCHNITTGER (1990) zu finden, ebenso wie die zugehörigen Statistiken. Die Zusammenstellung der Abbildungen besitzt folgende Unterteilung:

1. Eine Punktwolke, die den einzelnen Meßpunkten entspricht, zu denen die zugehörigen Regressionskurven mit eingezeichnet wurden (Beispiel Abbildung 42).

2. Eine Balkendarstellung, bei der jeder Balken jeweils über dem Mittelwert der gemessenen Verkehrsstärke ausgerichtet ist ¹¹. Der Datenumfang für den Balken bezieht die Meßergebnisse jeweils für eine feste Quellstärke über die neun SdVw - Werte ein. Der Mittelpunkt des Balkens ist das Mittel der gemessenen Geschwindigkeit. Seine Ausdehnung entspricht der Standardabweichung. Die jeweiligen Mittel von v_m sind zur besseren Veranschaulichung mit einer Linie verbunden (Beispiel Abb. 43).

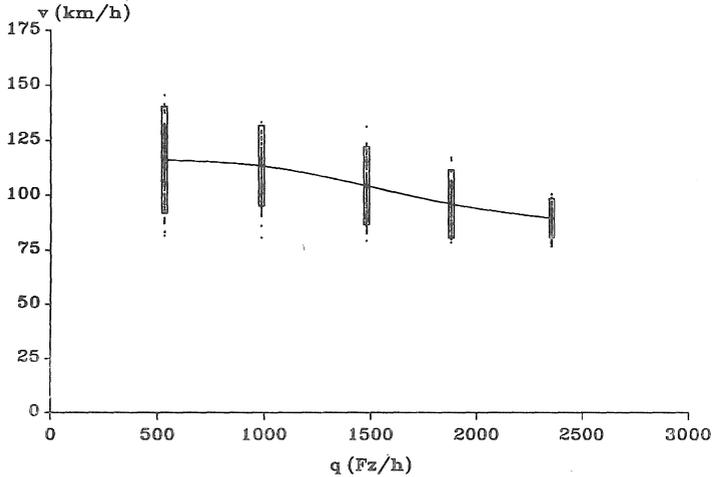


Abb. 43: \bar{v} und $\sigma(v)$ über \bar{q} für jede einzelne Simulation. Lauf 1: Zusammenfassung der fünf Quellstärken für SdVw = 0 m/s. 5-s-Intervalle über 1 km Meßstrecke, Erzeugungsgrenze: 10 m/s.

A-1-2 Statistik der eingespeisten Wunschgeschwindigkeiten

Die zusammenfassende Auswertung der Parameter der Regressionsgeradengleichung wurde mit dem Programmpaket MINITAB durchgeführt. Es handelt sich um ein Programm, mit dem statistische Berechnungen auf begrenzten Datenmengen durchführbar sind. Die einzelnen Werte werden von

¹¹Der Simulation wurde eine konstante Quellstärke über einen festen Zeitraum vorgegeben. Können die erzeugten Fahrzeuge alle in das System eingesetzt werden, entspricht der Mittelwert der Messung der vorgegebenen Quellstärke.

MINITAB in Spalten eingelesen, wobei sich Operationen auf diese Spalten (Columns), auf Matrizen oder auf Konstante beziehen. Hier werden im weiteren nur Spaltenoperationen verwendet.

Der Analyse der Parameterwerte liegt die Vorstellung von einem trennbaren Einfluß der Eingangsvariablen auf die Höhe des Parameterwerts zugrunde. Dazu ist zuerst eine statistische Beschreibung der eingespeisten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen erforderlich.

Nachfolgend sind die statistischen Kenngrößen der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ausgegeben. In den ersten beiden Zeilen sind die erzeugten Verteilungen für die Einzelfahstreifen dargestellt. Die dritte Zeile faßt beide Fahstreifen zusammen, und die vierte Zeile spiegelt die Statistik der Differenz aus Spalte 1 und Spalte 2 (Fahstreifen 1 und 2) wider.

Lauf 1						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	31.993	31.680	5.609	20.883	47.029	[m/s]
Streifen 2	37.661	37.381	5.566	26.407	51.389	[m/s]
Summe	34.827	34.394	6.265	20.883	51.389	[m/s]
Differenz	5.668	5.720	7.766	-19.141	29.274	[m/s]

Lauf 2						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	31.712	31.410	4.124	20.882	46.904	[m/s]
Streifen 2	37.251	37.046	4.161	26.428	51.214	[m/s]
Summe	34.481	34.275	4.983	20.882	51.214	[m/s]
Differenz	5.539	5.668	5.876	-18.963	29.171	[m/s]

Lauf 3						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	32.359	31.914	6.204	20.874	47.121	[m/s]
Streifen 2	37.933	37.645	5.895	26.429	51.364	[m/s]
Summe	35.146	34.803	6.662	20.874	51.364	[m/s]
Differenz	5.574	5.882	8.468	-19.664	28.445	[m/s]

Lauf 4						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	34.502	34.234	6.183	20.915	51.335	[m/s]
Streifen 2	34.680	34.347	6.486	20.883	51.351	[m/s]
Summe	34.591	34.294	6.336	20.883	51.351	[m/s]
Differenz	0.178	0.060	8.934	-28.919	28.910	[m/s]

Lauf 5						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	31.760	30.922	6.217	20.852	51.366	[m/s]
Streifen 2	37.538	37.948	6.280	20.932	51.273	[m/s]
Summe	34.649	34.476	6.884	20.852	51.366	[m/s]
Differenz	5.778	6.126	8.696	-27.754	27.819	[m/s]

Lauf 12						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	34.756	34.417	4.711	25.859	46.351	[m/s]
Streifen 2	34.843	34.393	4.745	25.831	46.381	[m/s]
Summe	34.800	34.407	4.728	25.831	46.381	[m/s]
Differenz	0.088	0.090	6.784	-20.146	19.665	[m/s]

Im Fall des dreistreifigen Verkehrsablaufs sind die Verteilungen der Wunschgeschwindigkeit auf den einzelnen Fahrstreifen nicht voneinander subtrahiert worden. Die ersten drei Zeilen repräsentieren die Verteilungen auf den einzelnen Fahrstreifen, die vierte Zeile faßt diese drei Verteilungen zusammen:

Lauf 30						
	Mittel	Median	σ	Minimum	Maximum	
Streifen 1	34.691	34.321	6.222	20.860	51.364	[m/s]
Streifen 2	34.631	34.498	6.070	20.834	51.085	[m/s]
Streifen 3	34.469	34.118	6.386	20.980	51.363	[m/s]
Summe	34.597	34.337	6.227	20.834	51.364	[m/s]

A-1-3 Analyse der Startwerte der Geradenparameter

In der nachfolgenden Tabelle sind die Verteilungswerte der zweistreifigen Simulationen weiter zusammengefaßt. Die einzelnen Spalten entsprechen den statistischen Ergebnissen der Summen- und Differenzzeilen der obigen Auswertung in folgender Weise: In der ersten Spalte ist die Standardabweichung der Summe, in der zweiten Spalte das Mittel der Differenz und in der dritten Spalte deren Standardabweichung aufgeführt. In der vierten Spalte sind die den jeweiligen Läufen eingegebenen Behinderungsgrenzen und in der fünften Spalte die vorgegebene Reaktionskonstante aufgeführt. Die sechste Spalte enthält den Betrag des aus der Regressionsrechnung ermittelten Parameters der Geradengleichung (der Betrag ist mit 10^3 multipliziert worden).

Lauf	σ_{V_w}	m_{V_wDiff}	σ_{V_wDiff}	Behind.	τ	$\beta[*10^3]$
1	6.265	5.668	7.766	0.0	1.8	9.7521000
2	4.983	5.539	5.875	0.0	1.8	7.3587100
3	6.662	5.574	8.468	0.0	1.8	11.1470000
4	6.336	0.178	8.934	0.0	1.8	11.8968000
5	6.884	5.778	8.696	0.0	1.8	10.8843000
12	4.728	0.088	6.784	0.0	1.8	8.5837000
6	6.265	5.668	7.766	-2.0	1.8	10.5279000
7	6.265	5.668	7.766	-4.0	1.8	11.3599000
8	6.265	5.688	7.766	-6.0	1.8	13.1179000
9	6.265	5.688	7.766	0.0	1.5	9.1017000
10	6.265	5.688	7.766	0.0	1.0	8.5581000
11	6.265	5.688	7.766	0.0	0.6	7.4612500

- σ_{V_w} Standardabweichung der zusammengefaßten Wunschgeschwindigkeitsverteilung
- m_{V_wDiff} Mittel der Differenz zwischen den beiden fahrstreifenbezogenen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen
- σ_{V_wDiff} Standardabweichung dieser Differenzverteilung
- Behind. ist der Grenzwert der erlaubten Behinderung in m/s^2
- τ Reaktionskonstante, die zur Berechnung des Abstands verwendet wird
- β Faktor, der aus der Regressionsrechnung resultierenden Geradengleichung

Der erste Rechenschritt analysiert den Zusammenhang zwischen den Parameterwerten, der Standardabweichung, der Wunschgeschwindigkeit und dem Mittel der Differenz. Der zweite Schritt analysiert die Zusammenhänge zwischen dem Behinderungsgrad und dem Parameter. Der dritte Schritt der Analyse untersucht die Auswirkung der Reaktionskonstanten τ auf den Parameter. Die Ausgaben dieser Rechnungen sind nachfolgend zusammengestellt.

Standardabweichungen

The regression equation is $\gamma = 1.87 \text{ std} - 0.320 \text{ mdiff}$

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Wconstant				
std	1.86943	0.03866	48.36	0.000
mdiff	-0.31983	0.05063	-6.32	0.003

$s = 0.3017$

Analysis of Variance

SOURCE	DF	SS	MS	F	p
Regression	2	606.83	303.41	3332.78	0.000
Error	4	0.36	0.09		

Total	6	607.19
SOURCE	DF	SEQ SS
std	1	603.19
mdiff	1	3.63

Behinderungsgrad

The regression equation is $\gamma = -0.503 \text{ BehGrd}$

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Woconstant				
BehGrd	-0.50317	0.04481	-11.23	0.002

$s = 0.3353$

Analysis of Variance

SOURCE	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	14.178	14.178	126.09	0.002
Error	3	0.337	0.112		
Total	4	14.515			

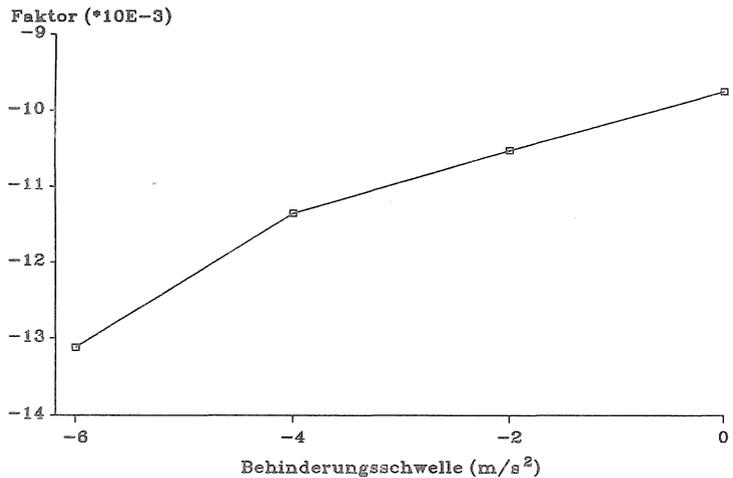


Abb. 44: Der normierte Gleichungsfaktor als Funktion des Behinderungsgrads.

Reaktionszeit

The regression equation is $\gamma = 1.43 \text{ std} - 0.321 \text{ mdiff} + 1.42 \text{ tau}$

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Noconstant				
std	1.4300	0.1550	9.22	0.000
mdiff	-0.32087	0.09858	-3.25	0.017
tau	1.4221	0.4366	3.26	0.017

s = 0.5852

Analysis of Variance

SOURCE	DF	SS	MS	F	p
Regression	3	816.89	272.30	795.00	0.000
Error	6	2.06	0.34		
Total	9	818.94			

SOURCE	DF	SEQ SS
std	1	805.45
mdiff	1	7.81
tau	1	3.63

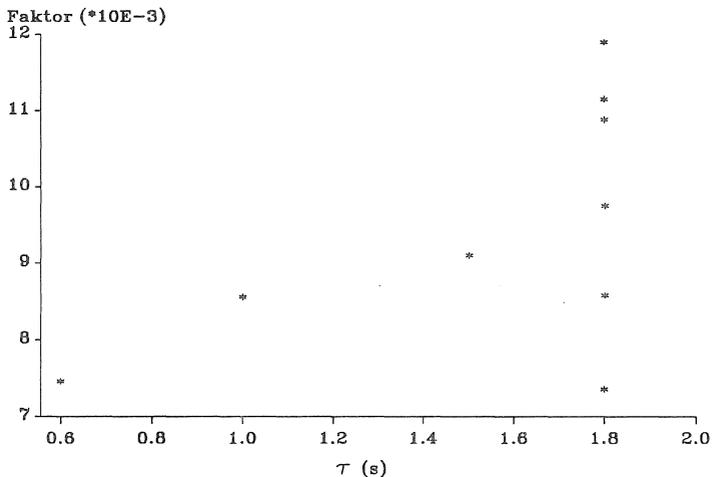


Abb. 45: Der Gleichungsfaktor als Funktion der Reaktionskonstanten.

A-1-4 Ableitung eines Zusammenhangs zwischen dem Gleichungsfaktor und dem $SdVw$ - Wert

Nachfolgend sind die Rechenschritte zur Ermittlung allein des Einflusses des $SdVw$ - Wertes auf die Parameter der linearen Regressionsgleichung wiedergegeben. Um allein den Einfluß dieses Wertes auf die Parameter zu

ermitteln, wurden die Spaltenwerte um ihre jeweiligen Anfangswerte vermindert. Zudem ist an den Darstellungen dieser Parameter als Funktion des SdVw - Wertes zu erkennen, daß sich die Betrachtung in zwei Bereiche zu zergliedern hat: Der erste Teil erstreckt sich auf die SdVw - Werte 0 bis 10 m/s, der zweite Teil umfaßt die höheren SdVw - Werte.

Oberer Bereich:

The regression equation is $\eta = -0.000253 \text{ sdvw}$

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Moconstant				
sdvw	-0.00025347	0.00000784	-32.35	0.000

s = 0.0003672

Analysis of Variance

SOURCE	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	0.00014109	0.00014109	1046.56	0.000
Error	59	0.00000795	0.00000013		
Total	60	0.00014905			

Unterer Bereich:

The regression equation is $\eta = -0.000107 \text{ sdvw}$

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Moconstant				
sdvw	-0.00010670	0.00000503	-21.21	0.000

s = 0.0008082

Analysis of Variance

SOURCE	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	0.00029372	0.00029372	449.70	0.000
Error	47	0.00003070	0.00000065		
Total	48	0.00032442			

The regression equation is $\eta = -0.00234 - 0.000009 \text{ sdvw}$

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	-0.0023378	0.0003469	-6.74	0.000
sdvw	-0.00000883	0.00001496	-0.59	0.558

s = 0.0005795 R-sq = 0.8% R-sq(adj) = 0.0%

Analysis of Variance

SOURCE	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	1.17077E-07	1.17077E-07	0.35	0.558
Error	46	1.54452E-05	3.35765E-07		
Total	47	1.55622E-05			

A-2 Anwendung eines Stabilitätsverfahrens

KÖHLER (1974) untersuchte das Stabilitätsverhalten einer Fahrzeugkolonne anhand eines regelungstechnischen Ansatzes auf der Basis einer deterministischen Fahrzeugfolgegleichung (GAZIS, HERMAN und ROTHÉRY, 1961). Er errechnete anhand des Stabilitätskriteriums $\lambda * \tau \leq 0.5$ (siehe auch Kapitel „Kolonnenverkehr und Pulkmodelle“) für unterschiedliche (l-m) - Kombinationen mit Hilfe eines Näherungsverfahrens Wertepaare für $\lambda - \tau$ einer gegebenen Fahrzeugkolonne.

Diese Kolonne hatte aus drei Fahrzeugen bestanden, die zum Beginn seiner Rechnung alle die gleiche Geschwindigkeit und einen definierten Abstand zum Vordermann besaßen. Das maximale Beschleunigungs- und Bremsvermögen der Fahrzeuge ist mit Schranken versehen. KÖHLER beaufschlagte die Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs mit einer Störung, die sinusförmigen Charakter hatte; Amplitude und Frequenz sind Eingangsgrößen. Er fand heraus, daß die Stabilitätsgrenze nicht von der Höhe der Störung und der Frequenz dieser Störung abhängig ist.

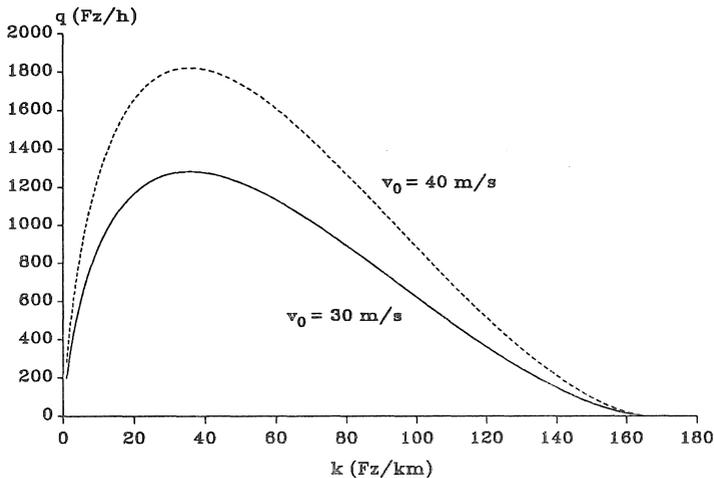


Abb. 46: v-q-Diagramme der maximalen Leistungsfähigkeit bei Erreichen der Stabilitätsgrenze nach KÖHLER (1974) mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten ($\tau = 1.8 \text{ s}$, $l = 1.1$, $m = 0.4$).

Eine Berechnung der möglichen Leistungsfähigkeit unter Anwendung dieses Stabilitätsverfahrens schien für die vorliegende Untersuchung von In-

teresse zu sein. So wurden mit Hilfe des in KÖHLER (1974) vorgestellten Näherungsprogramms Lösungen zur Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit gesucht. Das von KÖHLER verwendete Programm wurde zur Untersuchung in PASCAL nachprogrammiert, was die Genauigkeit der Betrachtung jedoch nicht beeinflußt. Das Ziel war, ein v-q-Diagramm zu berechnen, das den Ergebnissen der hier gemachten Untersuchung gegenüber gestellt werden konnte. Das Programm berechnet alle λ - τ -Kombinationen, für die das Stabilitätskriterium erfüllt ist. Aus dieser Menge Parameterkombinationen wurde diejenige ausgewählt, deren τ -Wert am nächsten bei dem Wert 1.8 s liegt.

Eingegeben werden Anfangsgeschwindigkeit und Anfangsabstand der Fahrzeugkolonne. Ebenfalls sind Amplitude und Frequenz der Störung einzugeben. Die Stabilität ist jedoch unabhängig von diesem Wert und wurde als sinusförmige Störung mit einer Amplitude von 5 m/s und einer Frequenz von 0.1 Hz fest vorgegeben. Mit dem berechneten λ -Wert wurde dann die mittlere Geschwindigkeit und die Leistungsfähigkeit nach den im oben genannten Kapitel aufgeführten Formeln berechnet. Weitere sehr wichtige Eingabeparameter für die deterministische Fahrzeugfolgegleichung sind die l-m-Exponentialfaktoren. Für die vergleichende Untersuchung wurden sie auf die von HOEFS (1972) bestimmten allgemeinen Werte $l=1.1$ und $m=0.4$ festgelegt. Es zeigte sich im Verlauf der Rechnungen, daß die Wahl des Anfangsabstands durchaus Einfluß auf die Größenordnung der resultierenden Leistungsfähigkeit besitzt. Deswegen wurden zwei Anfangsgeschwindigkeiten ausgewählt und der Anfangsabstand nach der Formel $\Delta x_0 = v_0 * \tau$ berechnet.

A-3 Simulationsumgebung

Zur Validierung der Algorithmen und zur Erzeugung von Meßdaten wurde eine komplexe Simulationsumgebung erstellt, die die Aufgabe der Fahrzeuergenerierung, der Fahrzeugbewegung und der Meßdatenerfassung bewältigt. Zur Realisierung des Systems diente die Sprache MODULA-2, die sich hervorragend zur Erstellung umfangreicher Programmsysteme eignet. Diese Sprache erleichtert außerdem mit einem hohen Grad an Standardisierung die Übertragung auf andere Rechenanlagen erheblich.

Die ausführliche Beschreibung des Programmpakets, die notwendigen Eingabedaten, der Aufbau der einzelnen Programmmodule, die Zusammenhänge und die Bedienung wird ausführlich in SCHNITTGER (1991) erläutert. Hier soll nur ein grober Abriss gegeben werden.

Das Programm ist auf MS-DOS, OS/2 und unter HP-UNIX (Vers. 6.2, Serie 300 und Vers. 7.0, Serie 800) lauffähig. Auf Personal-Computern (AT)

mit MS-DOS und Einsatz eines Coprozessors können rund 40 Fahrzeuge in Realzeit simuliert werden. Entsprechend der gewünschten Verkehrsstärke und der Streckenlänge verlängern oder verkürzen sich diese Rechenzeiten. Für eine 5 km lange BAB-Strecke mit einer mittleren Belastung von 1500 Fz/h ergibt sich eine Rechenzeit von ca. 5 h für 9000 s Simulationsdauer. Zur Messung des Verkehrsflusses sind folgende Möglichkeiten verfügbar:

1. Querschnittsmessungen
2. Streckenabschnitte
 - Intervallmessung räumlich-zeitlich
 - Ausgabe der Fahrzeugzustände nach jedem Zeitschritt
 - Messung der Spurwechselvorgänge
3. Protokollierung des Systemzustandes im gesamten Netz nach jedem Zeitschritt
4. Protokollierung der Fahrzeugerzeugung und beim Verlassen des Netzausschnitts
5. Traceprotokoll

Die Datei für die Traceprotokollierung dient u.a. der Programmflußkontrolle und wird in der Programmdokumentation (SCHNITTGER, 1991) ausführlich erläutert. Alle anderen Ausgabeformen werden im weiteren kurz beschrieben. Das Ein- und Ausschalten jeder Meßart ist zu jedem Zeitschritt möglich, so daß ein Meßbeginn während einer laufenden Simulation möglich ist.

Die Querschnittsmessung ist die wohl gebräuchlichste Form der Messungen, da ihre Realisierung am einfachsten ist, z.B. durch Induktionsschleifen. Das Meßverfahren für Querschnittsmessungen ist so ausgelegt, daß zum Zeitpunkt des Überfahrens eines gesetzten Meßquerschnitts die Momentanwerte des Fahrzeugs gespeichert werden. Das Ausgabeformat der Querschnittsdatei sieht folgendermaßen aus:

<Nr> <Zeit> <Anzahl Ereignisse> < \bar{v} > <Anz. Wechsel>

Die Weg-Zeit-Messungen (X-T-Messungen) von Fahrzeugbewegungen hingegen ist die am einfachsten zu handhabende Ausgabeform für Simulationen. Wie bereits angedeutet, stehen im wesentlichen zwei unterschiedliche Ausgabeformen für diese X-T-Messungen bereit: Eine abschnittsbezogene und die systemumfassende.

A-3-1 Programmauszug zur Bestimmung des Interaktionspartners

Nachfolgend sind wesentliche Routinen auszugsweise zusammengestellt. Die wichtigsten Algorithmen des Simulationsprogramms sind in ihnen realisiert. Z.T. wird auf nicht angegebene Routinen zugegriffen, deren Funktion sich jedoch aus dem Bezeichner ergibt.

```
PROCEDURE Ueberschneidung(fz, nfz : FzDaten) : BOOLEAN;
```

(* Haben die beiden Fz eine gemeinsam überdeckte Fläche im y-Bereich? Die Sicherheitszone wird nur für das betrachtete Fz eingerechnet. Ebenfalls wird die Quergeschwindigkeit mit in Betracht gezogen. Berechnet wird das „Vorbeipassen“ von „fz“ an „nfz“. Wenn nicht, dann sind die beiden Fz als Vorder- bzw. Hintermänner miteinander verkoppelt. *)

```
CONST mitSicher           = TRUE;
      ohneSicher          = FALSE;
VAR  dv, tq, tP, nvon, nbis, von, bis : REAL;
      ist : BOOLEAN;

BEGIN
  nvon := RechteGrenze(nfz, ohneSicher);
  nbis := LinkeGrenze(nfz, ohneSicher);
  von := RechteGrenze(fz, mitSicher);
  bis := LinkeGrenze(fz, mitSicher);
  ist := NOT ((von < nvon) AND (bis < nvon)) OR
        ((von > nbis) AND (bis > nbis));
  IF ((fz^.vy = 0.0) AND (nfz^.vy = 0.0)) THEN
    RETURN ist;
  ELSIF ist THEN
    IF (nfz^.Zielspur = fz^.Spur) THEN RETURN TRUE; END;
    IF (fz^.y >= nfz^.y) THEN
      IF (ABS(fz^.vy) >= ABS(nfz^.vy)) THEN
        IF (fz^.vy <= 0.0) THEN tq:=(bis-nvon)/(nfz^.vy-fz^.vy);
        ELSE tq:=(von-nbis)/(fz^.vy-nfz^.vy);
        END;
      ELSE
        IF (nfz^.vy <= 0.0) THEN tq:=(nbis-von)/(fz^.vy-nfz^.vy);
        ELSE tq:=(bis-nvon)/(nfz^.vy-fz^.vy);
        END;
      END;
    ELSE
      IF (ABS(fz^.vy) >= ABS(nfz^.vy)) THEN
        IF (fz^.vy <= 0.0) THEN tq:=(bis-nvon)/(nfz^.vy-fz^.vy);
        ELSE tq:=(nbis-von)/(fz^.vy-nfz^.vy);
        END;
      ELSE
        IF (nfz^.vy <= 0.0) THEN tq:=(nbis-von)/(fz^.vy-nfz^.vy);
        ELSE tq:=(bis-nvon)/(nfz^.vy-fz^.vy);
        END;
      END;
    END;
  tP := DeltaX(fz, nfz)/(DeltaV(fz, nfz) + fz^.b*dT);
  RETURN (tQ > tP);
```

```

ELSE
  IF (fz^.y >= nfz^.y) THEN
  IF (ABS(fz^.vy) >= ABS(nfz^.vy)) THEN
    IF (fz^.vy <= 0.0) THEN tq:=(von-nbis)/(nfz^.vy-fz^.vy);
      ELSE RETURN FALSE;
    END;
  ELSE
  IF (nfz^.vy <= 0.0) THEN RETURN FALSE;
    ELSE tq:=(von-nbis)/(nfz^.vy-fz^.vy);
  END;
END;
ELSE
  IF (ABS(fz^.vy) >= ABS(nfz^.vy)) THEN
  IF (fz^.vy <= 0.0) THEN RETURN FALSE;
    ELSE tq:=(nvon-bis)/(fz^.vy-nfz^.vy);
  END;
END;
ELSE
  IF (nfz^.vy <= 0.0) THEN tq:=(nvon-bis)/(fz^.vy-nfz^.vy);
    ELSE RETURN FALSE;
  END;
END;
END;
END;
dv := (DeltaV(fz, nfz) + fz^.b*dT);
tP := (DeltaX(fz, nfz)+fz^.Laenge+nfz^.Laenge)/dv;
RETURN (tQ < tP);
END;
END Ueberschneidung;

```

```

PROCEDURE NextVorne(fz : FzDaten) : FzDaten;

```

(* Sucht den passenden Vordermann für das Fz. *)

```

VAR ok          : BOOLEAN;
    nfz         : FzDaten;
BEGIN
  ok := FALSE; nfz := fz;
  WHILE NOT ok AND FzWeiter(nfz) AND
    ((nfz^.x - fz^.x) < fz^.MaxDx) DO
    ok := Ueberschneidung(fz, nfz);
  END;
  IF ok THEN RETURN nfz;
    ELSE RETURN KeinFz; END;
END NextVorne;

```

```

PROCEDURE IstIntacPart(fz, nfz : FzDaten; dx, spbreite : REAL;
  Richt : CARDINAL) : BOOLEAN;

```

(* geometrisch-kinematische Bedingung für einen Interaktionspartner, der neben-geordnet ist. *)

```

BEGIN

```

```

CASE Richt OF
  Rechts : IF (nfz^.y < fz^.y) THEN
            RETURN ((WirdY(nfz) < fz^.y - dx) AND
                    (WirdY(nfz) > fz^.y - dx - spbreite)) OR
                    (nfz^.vy > 0.0));
            ELSE RETURN FALSE;
            END;
  | Links : IF (nfz^.y > fz^.y) THEN
            RETURN ((WirdY(nfz) > fz^.y + dx) AND
                    (WirdY(nfz) < fz^.y + dx + spbreite)) OR
                    (nfz^.vy < 0.0));
            ELSE RETURN FALSE;
            END;
END;
END IstIntacPart;

```

```

PROCEDURE LinksVor(Grenze, Versatz : REAL; fz : FzDaten) : FzDaten;

```

(* Ist keiner direkt im Blickfeld, wird dennoch einer weit links vorne genommen.
Bei der Grenze „MaxDx“ des Fz ist das Ergebnis „KeinFz“ *)

```

VAR   ok       : BOOLEAN;
      LiFz     : FzDaten;
BEGIN
  (* Erzeugen des Dummies zum Suchen des linken Intacpartners *)
  LiFz := fz;
  ok := FALSE;
  WHILE NOT ok AND FzWeiter(LiFz) AND Bedingung(fz, LiFz) DO
    IF (LiFz # fz^.Vorne)
      THEN ok := IstIntacPart(fz, LiFz, Versatz,
                             StrSpurbreite(fz^.Strecke), Links);
    END;
  END;
  IF ok
    THEN RETURN LiFz;
    ELSE RETURN KeinFz;
  END;
END LinksVor;

```

```

PROCEDURE SortiereRouten(strNr : CARDINAL; VAR fz : FzDaten);

```

(* Sortiert eine Strecke. Soll heißen, daß hier die Interaktionspartner des Fz gesucht werden. Dies geschieht streckenübergreifend. Die Routine zieht nur Fz heran, die im Reaktionsbereich des zu verzeigernden Fz sind (also z.B. dx < MaxDx). *)

```

VAR
  i           : CARDINAL;
  Grenze, Versatz : REAL;
  ok         : BOOLEAN;
  partner    : FzDaten;

```

```

BEGIN
  (* fuer alle Fahrzeuge auf der Route *)
  fz := ErstesStrFz(strNr);
  IF (fz # KeinFz) THEN REPEAT
    InteraktLoeschen(fz);
    ok:=VerzeigernFz(fz, NextVorne(fz), Vorne);
    ok:=VerzeigernFz(fz, NextHinten(fz), Hinten);
    Versatz:=fz^.Breite/2.0 + Randsicherheit;
    Grenze:=LinkeStrGrenze(fz^.Strecke);
    ok:=VerzeigernFz(fz, LinksVor(Grenze, Versatz, fz), LinksVorne);
    ok:=VerzeigernFz(fz, RechtsVor(Versatz, fz), RechtsVorne);
    ok:=VerzeigernFz(fz, LinksRueck(Grenze, Versatz, fz), LinksHinten);
    ok:=VerzeigernFz(fz, RechtsRueck(Versatz, fz), RechtsHinten);
  UNTIL NOT FzWeiter(fz); END;
END SortiereRouten;

```

A-3-2 Programmauszug zur Interaktionsberechnung

```

PROCEDURE CalcB(VAR fz : FzDaten; nach : FzDaten; IV : IntacRec);

```

(* Berechnet die Beschleunigung im nächsten Zeitschritt für den Folgevorgang. Hier greift die Grenzgröße des sicheren Fahrens als Steuergröße ein. „nach“ kann das vorausfahrende Fz sein, aber auch ein gewünschtes anderes. „IV“ ist der Interaktionsteil zum Fz „nach“. Entscheidende Größen aus Interakt: ReaktZeit und Komfortgrenze. Abhängig vom Zeitschritt wird b aus dv so berechnet, daß obige Bedingungen eingehalten werden können.

bSoll ist die Differenz zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit. Es handelt sich um die Beschleunigung (Verzögerung), die momentan da sein müßte, um sicher zu fahren. Aber: das tatsächliche v wird erst nach einer Verzögerung von dt erreicht *)

```

VAR
  bSoll      : REAL; (* Differenz zw. Theorie und Ist *)
  b          : REAL; (* Beschleunigung des Fahrzeugs *)

BEGIN
  fz^.bWill := 0.0;   fz^.bMuss := 0.0;

  bSoll := ErrechneB(fz, nach);

  (* Berechnung gewuenschter Beschleunigung aus Interaktionsgroessen *)
  IF (IV.dv > IV.Sdv) THEN (* Fz hat Annaeherung erkannt *)
    b := -(IV.dv*IV.dv) / (2.0 * (IV.dx - fz^.AX));
    b := b + fz^.ZSchaetz * Erzeuge(bRausch);
  ELSIF (IV.dx <= IV.Sdx) THEN (* Fz im Folgevorgang *)

    (* Erkennt Fz die Ueberhoehung der Wunsch - Folgegeschw.? *)
    IF (fz^.b > 0.0) AND (fz^.v > fz^.vT) THEN
      b := - fz^.ZGas * ABS(Erzeuge(bRausch));
      fz^.vT := fz^.v-2.0*Abweichung(fz^.v, IV.dv, fz^.ZSchaetz);
    ELSIF (fz^.b < 0.0) AND (fz^.v < fz^.vT) THEN
      b := fz^.ZGas * ABS(Erzeuge(bRausch));
      fz^.vT := fz^.v+2.0*Abweichung(fz^.v, IV.dv, fz^.ZSchaetz);
    ELSE
      b := fz^.b;
    END;
  END;

```

```

ELSE (* b nach Wunsch *)
  IF (fz^.v < 0.8*Fz^.Vw) THEN
    IF (IV.dv < -2.0) THEN b := CalcBMax(fz);
    ELSE b := fz^.ZGas*ABS(Erzeuge(bRausch));
  END;
  ELSIF (fz^.v > 1.3*Fz^.Vw) THEN b := 0.5 * CalcBMin(fz);
  (* Erkennt fz die Ueberhoehung der Wunschgeschw.? *)
  ELSIF (fz^.b > 0.0) AND (fz^.v > ObSollwert(fz)) THEN
    b := - fz^.ZGas * ABS(Erzeuge(bRausch));
  ELSIF (fz^.b < 0.0) AND (fz^.v < UntSollwert(fz)) THEN
    b := fz^.ZGas * ABS(Erzeuge(bRausch));
  ELSIF (fz^.b = 0.0) THEN
    b := fz^.ZGas * Erzeuge(bRausch);
  ELSE
    b := fz^.b;
  END;
END;

(* Einhaltung des Abstandes *)
IF bSoll <= b THEN fz^.bMuss := bSoll;
  ELSE fz^.bWill := b;
END;

IF Anzeige.TestAus AND TraceOpt["i"] THEN
  IntacAus(fz^.Er, IV.Sdx, IV.Sdv, IV.dx, IV.dv, b, fz^.bMuss);
END;
END CalcB;

```

```

PROCEDURE LinksVorneOk() : Ueberholgrad;

```

(* Geht davon aus, daß ein Fahrer nur dann überholt, wenn das linke Fahrzeug so weit entfernt ist, daß er nicht bremsen muß beim Ausscheren. Bremsst der Linke, überholt er auch nicht. *)

```

VAR nfz      : FzDaten;
BEGIN
  IF (IntLiV.db < 0.0) OR (IntLiV.dx < IntLiV.BX)
  THEN RETURN Nicht;
  ELSE
    nfz := LiVorne(Fz);
    IF (((IntVor.dx > 10.0) AND NOT IntVor.Aend) AND
        ((IntLiV.dx > Fz^.MaxDx) OR
         ((DeltaY(Fz, nfz, Links)>StrSpurbreite(FzStrecke(Fz)))
          AND NOT nfz^.RechtsWechsel)))
    THEN RETURN FreiWechs;
    ELSE RETURN Reagieren;
  END;
END;
END LinksVorneOk;

```

```

PROCEDURE Ueberholen(VAR Fz : FzDaten);

```

(* Das Fahrzeug überholt, wenn es möglich ist. Also wenn die Spur eine Überholung zuläßt und wenn dadurch keine Beeinträchtigung der Sicherheit sowohl

zum neuen Vorausfahrenden als auch zum neuen Folgenden entstehen. Aufrufen der Routine setzt voraus, daß die Interaktionsgrößen berechnet wurden. *)

```

VAR
  VVachLinks, VVonHinten : REAL;
  KannUeberholen         : BOOLEAN;
  Stufe                   : CARDINAL;

BEGIN (* Ueberholen *)
  IF Anzeige.TestAus AND TraceOpt["p"] THEN
    EnterTrace("Ueberholen");
  END;
  KannUeberholen := FALSE;
  (* Fahrzeug faehrt bereits am linken Anschlag *)
  IF (Fz^.Spur >= StrAnzSpuren(Fz^.Strecke))
    THEN CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
  ELSIF Fz^.RechtsWechsel THEN Fz^.vy := 0.1;
                                CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
  ELSE
    Stufe := StufeErmitteln(Fz, Links);
    CASE Stufe OF
      1 : KannUeberholen := TRUE;
          FreiWechseln(Links, Fz, VorderesFz(Fz));
    | 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11 :
        CASE Stufe OF
          2 : KannUeberholen := TRUE;
            | 4 : KannUeberholen := HintenWebenOk(Fz, Links);
            | 5 : KannUeberholen := WebenSpurOk(Fz, Links);
            | 6 : KannUeberholen := WebenSpurOk(Fz, Links) AND
                    HintenWebenOk(Fz, Links);
            | 7 : KannUeberholen := KeinWechsler(Fz, Links);
            | 9 : KannUeberholen := KeinWechsler(Fz, Links) AND
                    HintenWebenOk(Fz, Links);
            | 10 : KannUeberholen := KeinWechsler(Fz, Links) AND
                    WebenSpurOk(Fz, Links);
            | 11 : KannUeberholen := KeinWechsler(Fz, Links) AND
                    WebenSpurOk(Fz, Links) AND
                    HintenWebenOk(Fz, Links);
        END; (* case *)
        IF KannUeberholen THEN
          CASE LinksVorneOk() OF
            FreiWechs : FreiWechseln(Links, Fz, VorderesFz(Fz));
                        Fz^.vTy := 0.0;
          | Reagieren : IF (IntVor.db > 0.0)
                        THEN CalcB(Fz, LiVorne(Fz), IntLiV);
                        Fz^.vTy := 0.0;
                        ELSE CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
                        Fz^.vTy := - Fz^.vy / 2.0;
          END;
          | Nicht      : CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
                        Fz^.vTy := - Fz^.vy;
                        KannUeberholen := FALSE;
          END; (* case *)
        ELSE CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
            Fz^.vTy := - Fz^.vy;
        END;
    | 3 : KannUeberholen := HintenWebenOk(Fz, Links);
          IF KannUeberholen
            THEN FreiWechseln(Links, Fz, VorderesFz(Fz));
          END;
  END;

```

```

        Fz^.vTy := 0.0;
        ELSE CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
        Fz^.vTy := - Fz^.vy;
    END;
| 8 : KannUeberholen := HintenNebenOk(Fz, Links) AND
    KeinWechsler(Fz, Links);
    IF KannUeberholen
    THEN FreiWechseln(Links, Fz, VorderesFz(Fz));
        Fz^.vTy := 0.0;
        ELSE CalcB(Fz, VorderesFz(Fz), IntVor);
        Fz^.vTy := - Fz^.vy;
    END;
END; (* case *)
END;
IF KannUeberholen THEN
    IF NOT Fz^.LinksWechsel THEN SpWMessung(Fz, "<"); END;
    Fz^.LinksWechsel := TRUE;
    IF (Fz^.Folgedruck < 0.0) THEN Fz^.Folgedruck := 0.0; END;
    IF (Fz^.vy <= 0.0) THEN
        Fz^.vy := Erzeuge(SpurWV)*(0.6 + 0.4*Fz^.v/Fz^.Vmax);
    END;
END;
IF Anzeige.TestAus AND TraceOpt["p"] THEN
    LeaveTrace("Ueberholen");
END;
END Ueberholen;

```

```

PROCEDURE Behindert(IV : IntacRec; Fz : FzDaten) : BOOLEAN;

```

(* Behindert das vorausfahrende das aktuelle Fz? „MindereFolgedruck“ berechnet und berücksichtigt die Untergrenze der noch akzeptierten Wunschgeschwindigkeit. *)

```

BEGIN
    (* Fuer zusaetzliche Untersuchungen *)
    IF (Fz^.Zustand=folgt) AND NOT IV.Aend
    THEN RETURN MindereFolgedruck(Fz);
    ELSE RETURN FALSE;
    END;
END Behindert;

```

```

PROCEDURE LinksBesser(Fz : FzDaten) : BOOLEAN;

```

(* Beurteilung anhand von Nebenspurgrößen. Überschreitet die Geschwindigkeitsminderung die eingestellte Schwelle? Wenn ja, dann soll entweder der Abstand groß oder die erzielbare Erhöhung von v_m größer sein. *)

```

BEGIN
    IF (Fz^.Spur=StranzSpuren(FzStrecke(Fz))) OR NOT Fz^.DarfNachLinks
    THEN RETURN FALSE;
    ELSIF Behindert(IntVor, Fz) THEN

```

```

RETURN ((Fz^.Vw-Fz^.v) > IntacVar.DeltaVw) AND
        ((IntVor.dVw > IntLiH.dVw) OR (IntLiH.dx > Fz^.MaxDx));
ELSE RETURN FALSE;
END;
END LinksBesser;

```

```

PROCEDURE RechtsBesser(Fz : FzDaten) : BOOLEAN;

```

(* Nach rechts, wenn entweder der Hintermann schneller ist als die noch akzeptierte Überhöhung der Wunschgeschwindigkeit oder das Fahrzeug nur überholt hat und wieder nach rechts will oder wenn die Zeitlücke größer als 10 s ist. *)

```

BEGIN
IF (Fz^.Spur = 1) OR NOT Fz^.DarfNachRechts
THEN RETURN FALSE;
ELSIF NOT Option["U"] THEN
RETURN ((IntHi.dv > IntHi.Sdv) AND (IntHi.dVw > IntReV.dVw) AND
        (Fz^.Hinten^.Vw > ObVwWert(Fz))) OR
        ((Fz^.Spur > Fz^.Zielspur) AND (IntReV.dv < 0.0)) OR
        (IntReV.dx/IntReV.dv > 10.0));
ELSE RETURN FALSE;
END;
END RechtsBesser;

```

```

PROCEDURE Entscheide(VAR Fz : FzDaten) : Entscheidung;

```

(* Hier werden alle notwendigen Interaktionsgrößen berechnet und die Fahrentscheidungen getroffen. Erzeugung des Verhaltenswunsches. *)

```

VAR
VDifferenz, vw, Vor, Links, Rechts      : INTEGER;

BEGIN
BerechneIntacGroessen(IntVor, Fz, VorderesFz(Fz));
IntacZustand(Fz);
IF (Fz^.DarfNachLinks OR Fz^.DarfNachRechts) THEN
BerechneIntacGroessen(IntLiV, Fz, LiVorne(Fz));
BerechneIntacGroessen(IntReV, Fz, ReVorne(Fz));
BerechneIntacGroessen(IntLiH, LiHinten(Fz), Fz);
BerechneIntacGroessen(IntReH, ReHinten(Fz), Fz);
BerechneIntacGroessen(IntHi, HinteresFz(Fz), Fz);

IF (QuellAbstand(Fz)<100.0)      THEN RETURN WachVorne;
ELSIF NochWechseln(Fz)         THEN RETURN WachVorne;
ELSIF (Fz^.Zustand = Gefaehrdet) THEN RETURN WachVorne;
ELSIF LinksBesser(Fz)         THEN RETURN LinksWechseln;
ELSIF RechtsBesser(Fz)        THEN RETURN RechtsWechseln;
ELSE                            RETURN WachVorne;
END;
ELSE

```

```

END;
END Entscheide;

```

```

RETURN NachVorne;

```

A-4 Die Sprachgrammatik

```

program      := statist, ENDE
statlist    := { zuweisung | aktion }
aktion      := INIT | START | includeAnw | LESEN, dateiname |
              SCHREIBEN, dateiname | kommentar
includeAnw  := INCLUDE, ( KEYBOARD | DATEI, dateiname ),
              subprogram

```

Über die INCLUDE-Anweisung kann ein Unterprogramm von einer Textdatei oder von der Tastatur gelesen werden. Das gerade laufende Programm kann sich auch selbst aufrufen, doch da keine terminierenden Bedingungen gesetzt sind oder abgefragt werden können, würde dies in einer Endlosschleife enden. Rekursives Programmieren ist damit also nicht möglich, aber auch nicht erforderlich.

```

subprogr    := statist, RETURN
kommentar   := kommBeg, text, kommEnd
zuweisung   := streckenZuw | quellenZuw | simZuw | intacZuw |
              modiZuw | qdatenZuw | kdatenZuw | spwdatZuw |
              xtDatZuw | fileZuw | vertdatZuw | anzeigenZuw |
              optionenZuw | traceoptZuw |
streckenZuw := STRECKE, cardVal, { strFeld | kommentar }
strFeld     := XANF,      realVal | YANF,      realVal |
              LAENGE,   realVal | BREITE,    realVal |
              SPURANZ,  cardVal | KURVIG,    realVal |
              STEIGUNG, realVal | SPERRVOH,  realVal |
              SPERRBIS, realVal |
              ENDPKT, { SPUR, cardVal, [ AUF ]
                       STRNR, cardVal, SPUR, cardVal } |
quellenZuw  := QUELLE, cardVal, { quellFeld | kommentar }
quellFeld   := ZLUEVERT,  verteilung | BREMS,      verteilung |
              BESCHL,    verteilung | VWUNSCHPKW, verteilung |
              VWUNSCHLKW, verteilung | PKWLAENGE,  verteilung |
              VMAX,      verteilung | LKWLAENGE,  verteilung |
              BREITE,    verteilung | BDIFF,      verteilung |
              LKWANTEIL, realVal |
              AUF, STRNR, cardVal, SPUR, cardVal
simZuw      := SIMDATEW, { DAUER, cardVal | kommentar }

```

```

intacZuw      := INTERAKTION, { intFeld | kommentar }
intFeld       := BWECHSGR,  realVal | KOMFGR,    realVal |
                REAKTDIST, realVal | REAKTZEIT, realVal |
                DELTAVW,   realVal |
modiZuw       := MODIFY, cardVal, {modiFeld | LOESCHEN | kommentar}
modiFeld      := VON,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                BIS,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                VONT,     cardVal, DELTAT,   cardVal,
                VWUNSCH,  realVal, VM,      realVal,
                WACHRECHTS, boolVal, WACHLINKS, boolVal,
qdatenZuw     := QDATEH, cardVal, {qdatFeld | LOESCHEN | kommentar}
qdatfeld      := ORT,     STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                INTERVALL, cardVal |
kdatenZuw     := KDATEH, cardVal, {kdatFeld, LOESCHEN, kommentar}
kdatFeld      := VON,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                BIS,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                INTERVALL, cardVal |
spwdatZuw     := SPWDATEN, cardVal, {spwdatFeld, LOESCHEN, kommentar}
spwdatFeld    := VON,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                BIS,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
xtdatZuw      := XTDATEH, cardVal, {xtdatFeld, LOESCHEN, kommentar}
spwDatFeld    := VON,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                BIS,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
vertdatZuw    := VERTEIL, cardVal, {vertdatFeld, LOESCHEN, kommentar}
vertdatFeld   := VON,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
                BIS,      STRNR, cardVal, XPOS,  realVal |
anzeigenZuw   := ANZEIGEN, optstring
traceoptZuw   := TRACE, optstring
optionenZuw   := OPTIONEN, optstring
fileZuw       := FILE, logFile, dateiname
logFile       := QDATEH | KDATEH | SPWDATEN | XTDATEH | VERTEIL |
                XTBINAEER | TRACE | PROTOKOLL | DATAUSG
verteilung    := GLEICH, intVal, realVal, realVal |
                NORMAL, intVal, realVal, realVal, realVal, intVal |
                NEGEXP, intVal, realVal, realVal |
                EMPIRISCH, { realVal, realVal }
kommBeg       := (*           kommEnd           := *)
cardVal       := [+], digit, { digit }
intVal        := [ + | - ], digit, { digit }

```

```

realVal      := [ + | - ], digit, {digit}, [ ., digit, {digit} ],
              [ E, [ + | - ], digit, {digit} ]

digit        := 0 | 1 | ... 9      boolVal    := j | J | n | N

text         := beliebige Zeichenfolge, jedoch nicht "(*)"
optstring    := { char }

char         := a | b | c | ... z | A | B | C | ... Z

dateiname    := char, {char}, [-, char, {char}], [., char, {char}]

```

Bemerkung :

Die Nichtterminale zuweisung, aktion, kommBeg/End, strFeld, quellFeld, intFeld, modiFeld, qdatFeld, kdatFeld, spwdatFeld, vertdatFeld, logFile werden nur zur besseren Übersichtlichkeit eingefügt und verfügen in der Syntaxanalyse über keine eigene Prozedur.

A-5 Beispiel für eine Eingabedatei

Das Programm „Job.cmd“ dient als Steuerdatei und wird mit dem Befehl

```
sifa Job.cmd
```

aufgerufen. Die jeweilige Simulationsdauer muß absolut angegeben werden.

```

(* Job.cmd ist ein Hauptprogramm *)

INCLUDE DATEI daten.dat      (* Initialdaten einlesen *)

FILE      KDATEW   Km100.aus  (* Ausgabedatei *)
INTERAKTION DELTAVW 0.0      (* DeltaVw = SdVw *)
ANZEIGEN  K        (* Einschalten der Ausgabe *)

(* erster Teil mit Q = 500, auf zwei Spuren je 250 *)
(* Startzufallszahl, Mittel und Max. der Verteilung *)
QUELLE 1  ZLUEVERT  WEGEXP 23  14.4 70.0 (* in s *)
QUELLE 2  ZLUEVERT  WEGEXP 19  14.4 70.0 (* in s *)

SIMDATEW DAUER 3600 (* in s *)
START

(* zweiter Teil mit Q = 1000, auf zwei Spuren je 500 *)
QUELLE 1  ZLUEVERT  WEGEXP 23  7.2 50.0 (* in s *)
QUELLE 2  ZLUEVERT  WEGEXP 19  7.2 50.0 (* in s *)

SIMDATEW DAUER 7200 (* in s *)
START

(* dritter Teil mit Q = 1500, auf zwei Spuren je 750 *)
QUELLE 1  ZLUEVERT  WEGEXP 23  4.8 35.0 (* in s *)

```

```

QUELLE 2  ZLUEVERT  WEGEXP  19  4.8  35.0 (* in s *)
SIMDATEN DAUER 10800 (* in s *)
START

(* vierter Teil mit Q = 2000, auf zwei Spuren je 1000 *)
QUELLE 1  ZLUEVERT  WEGEXP  23  3.6  20.0 (* in s *)
QUELLE 2  ZLUEVERT  WEGEXP  19  3.6  20.0 (* in s *)

SIMDATEN DAUER 14400 (* in s *)
START

(* fueffter Teil mit Q = 3000, auf zwei Spuren je 1500 *)
QUELLE 1  ZLUEVERT  WEGEXP  23  2.4  15.0 (* in s *)
QUELLE 2  ZLUEVERT  WEGEXP  19  2.4  15.0 (* in s *)

SIMDATEN DAUER 18000 (* in s *)
START

ENDE      (* job.cmd *)

```

Die nachfolgende Datei wird über den „INCLUDE“ - Befehl eingelesen und ist für die eigentliche Initialisierung der Simulation verantwortlich. Der Befehl „RETURN“ veranlaßt das Programm in die Steuerdatei zurückzukehren.

```

(* Initialisierungsdatei fuer eine zweistreifige Strecke *)
OPTIONEN EID      (* Error-Nachrichten und Initialdaten ausgeben *)

(* Benennung der Files *)
FILE  DATAUSG   InitDaten.aus  FILE  QDATEN  Qmess.aus
FILE  SPWDATEN  Spwechs.aus    FILE  XTDATEN Xtdat.aus
FILE  XTBINAER  Xtbin.aus      FILE  TRACE  Traceaus.aus
FILE  PROTOKOLL Protokoll.aus  FILE  VERTEIL Verteil.aus

(* Streckendaten *)
STRECKE 1
  XANF 0.0  YANF 0.0  LAENGE 2000.0  SPURANZ 2  BREITE 3.5
  KURVIG 0.0  STEIGUNG 0.0
  ENDPKT SPUR 1  AUF STRNR 0  SPUR 0
         SPUR 2  AUF STRNR 0  SPUR 0

(* Quellendaten, Einheiten sind s, m, m/s und m/s^2 *)
QUELLE 1
  ZLUEVERT  WEGEXP  4  2.0  10.0
  VWUNTSCHPKW  NORMAL  5  31.39  5.56  20.83  47.22  2
  VWUNTSCHLKW  NORMAL  5  27.39  5.56  20.83  35.22  2
  VMAX  NORMAL  3  50.0  5.0  40.00  60.0  12
  BREMS  NORMAL  89  -8.0  0.5  -9.0  -7.0  54
  BESCHL  NORMAL  2  5.0  0.5  4.0  6.0  32
  PKWLAENGE  NORMAL  31  4.3  0.3  3.5  5.0  72
  LKWLAENGE  NORMAL  31  14.3  2.3  5.5  20.0  72
  BREITE  NORMAL  3  1.9  0.05  1.7  2.1  536
  BDIFF  NORMAL  8  0.5  0.15  0.0  1.0  5

```

LKWANTEIL 0.25 (* in % *)
AUF STRNR 1 SPUR 1

QUELLE 2

ZLUEVERT	HEGEXP	19	2.0	10.0				
VWUNSCHPKW	NORMAL	5	31.39	5.56	20.83	47.22	2	
VWUNSCHLKW	NORMAL	5	27.39	5.56	20.83	35.22	2	
VMAX	NORMAL	3	50.0	5.0	40.00	60.0	12	
BREMS	NORMAL	89	-8.0	0.5	-9.0	-7.0	54	
BESCHL	NORMAL	2	5.0	0.5	4.0	6.0	32	
PKWLAENGE	NORMAL	31	4.3	0.3	3.5	5.0	72	
LKWLAENGE	NORMAL	31	14.3	2.3	5.5	20.0	72	
BREITE	NORMAL	3	1.9	0.05	1.7	2.1	536	
BDIFF	NORMAL	8	0.5	0.15	0.0	1.0	5	
LKWANTEIL	0.05	(* in % *)						
AUF STRNR	1	SPUR	2					

(* Messstellen *)

QDATEN 1 ORT STRNR 1 XPOS 1000.0 INTERVALL 60
KDATEN 1 VON STRNR 1 XPOS 500.0 BIS STRNR 1 XPOS 1500.0
INTERVALL 5
SPWDATEM 1 VON STRNR 1 XPOS 500.0 BIS STRNR 1 XPOS 1500.0

OPTIONEN osG
ANZEIGEN gqasxpbFvk
TRACE i

(* Interaktionsdaten: BWechsGrenze, Komfortgrenze, Reaktionsdistanz,
Reaktionszeit, Delta-Vw, Erzeug-Dv *)

INTERAKTION	BWECHSGR	0.0	KOMFGR	-1.5
	REAKTDIST	200.0	REACTZEIT	1.8
	DELTA VW	0.0	ERZEUGDV	30.0

RETURN (* Ende Daten.dat *)

Abriß des Lebens- und Bildungsganges

1. Geburt am 2. September 1958 in Harzgerode
2. Besuch der Thiebauth-Grundschule in Ettligen vom Frühjahr 1964 bis zum Sommer 1968
3. Vom Herbst 1968 bis Sommer 1974 Besuch der Wilhelm-Lorenz-Realschule in Ettligen. Abschluß dieser Schule mit der Mittleren Reife am 19. Juni 1974.
4. Fortführung der Ausbildung auf der Albert-Einstein-Schule in Ettligen im Technischen Gymnasium der dreijährigen Aufbauform vom Herbst 1974 bis zum Sommer 1977. Abschluß dieser Schule mit der fachgebundenen Hochschulreife am 24. Mai 1977.
5. Absolvieren des Wehrdienstes in der Panzerpionierkompanie 140 in Koblenz vom 1. Juli 1977 bis zum 30. September 1978.
6. Studium der Elektrotechnik an der Elektrotechnischen Fakultät der Universität (TH) Karlsruhe vom 1. Oktober 1978 bis zum 24. Oktober 1985.
7. Ergänzung der Ausbildung durch Arbeit als Werkstudent bei der Fa. Siemens in Karlsruhe.
8. Abschluß des Studiums der Elektrotechnik am 24. Oktober 1985.
9. Am 1. Februar 1980 Einstellung bei der Albtal - Verkehrsgesellschaft mbH mit der Ausbildung als Aushilfsfahrzeugführer und seit dieser Zeit bis Ende 1990 dort tätig.
10. Seit 1. Januar 1986 als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Verkehrswesen in Karlsruhe.
11. Am 7. Februar 1991 Doktorprüfung.

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 signalgesteuerten Straßenkreuzungen *
- Heft 5: DROSTE, M. (1971):
Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs
- Heft 6: 10 Jahre Institut für Verkehrswesen (1973) *
- 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 Verkehrsplanungs-Modells
- Heft 11: PAPE, P. (1976):
Weglängenreduzierung 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 Kleinkabinenbahn-
systemen
- Heft 16: SAHLING, B.-M. (1977): *
Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimie-
rungsverfahren
- Heft 17: ZAHN, E. M. (1978):
Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Trans-
portnetze
- Heft 18: HANDSCHMANN, W. (1978):
Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßen-
kreuzungen 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 Ver-
kehrsprognose
- 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 Abstandswarn-
systemen
- 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 Straßen-
verkehrslärms
- Heft 30: BOSSERHOFF, D. (1985):
Statische 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 Verkehrszähl-
ungen
- 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 Verkehrswesen (1987) *
-

- Heft 37: MÖLLER, K. (1986): *
Signalgruppenorientiertes Modell zur Optimierung von Festzeit-
programmen 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.J. (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, S. (1991):
Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit
von Schnellstraßen
- Heft 46: HSU, T.P. (1991):
Optimierung der Detektorlage bei verkehrsabhängiger Signal-
steuerung
-

Vorläufige Berichte	IfV	1964
Nr. 1:	LEUTZBACH, W.; KOEHLER, R. (1964): Binnenwasserstrassenverkehr als Zufallsverteilung	
Nr. 2:	EICK, P. (1964): Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALD	
Nr. 3:	BEXELIUS, S. (1965): Größe der Verkehrstheorie - ihre Definition und Anwendung	
Nr. 4:	LEUTZBACH, W.; ERNST, R. (1965): Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierung auf das Verhalten der Fahrzeuglenker	*
Nr. 5:	GULLON LÖW, M. (1965): Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes	
Nr. 6:	BEXELIUS, S. (1965): An Extended Model for Car Following	
Nr. 7:	BEXELIUS, S. (1965): Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschie- dene Arten von Engpässen	*
Nr. 8:	LEUTZBACH, W.; LENZ, K.-H. (1966): Wartezeitverluste an Schleusen	
Nr. 9:	MARTIN, W. (1967): Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stutt- gart	*
Nr. 10:	DROSTE, M. (1968): Parkraumerhebungen in Intervallen	
Nr. 11:	LEUTZBACH, W. (1968): Bewegung als Funktion von Zeit und Weg (auch in Transportation Research, Vol. 3 (1969) 421-428)	
Nr. 12:	DROSTE, M. (1969): Die Berechnung optimaler Signalzeitenpläne als Problem der ganzzahligen linearen Programmierung	*

Vorläufige Berichte	IfV	1969
Nr. 13:	LUDES, K.; SIEGENER, W. (1969): Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten	
Nr. 14:	HAIGHT, F. A. (1970): Problems in Transport Safety	
Nr. 15:	DILLING, J.: (1970) Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik	*
Nr. 16:	COBLENTZ, H. S. (1971): Transportation Planning and Social Issues: Function and Dysfunction	*
Nr. 17:	KÖHLER, U. (1971): Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsganglinie bzw. Geschwindigkeitsprofil und Häufigkeitsdichte der Geschwindigkeiten	*
Nr. 18:	BRILON, W. (1973): Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern	*
Nr. 19:	VASARHELYI, B. (1975): Stochastische Simulation an Straßenkreuzungen nach dem "rechts-vor-links-Prinzip"	
Nr. 20:	BAHM, G.; LAUBERT, W. (1977): Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personennahverkehrssystemen	
Nr. 21:	WIEDEMANN, R.; BRILON, W.; BRANNOLTE, U. (1977): Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen	
Nr. 22:	BRANNOLTE, U.; VASARHELYI, B. (1977): Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf kurvigen Landstraßen	*
Nr. 23:	SPARMANN, U. (1979): Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Vorfahrtshäufigkeit auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen	

Vorläufige Berichte	IfV	1979
Nr. 24:	STUCKE, G. (1979): Ermittlung der Teilströme aus Querschnittsmessungen	
Nr. 25:	LEUTZBACH, W. (1981): Zur Problematik der Messungen und Beobachtungen aus einem fahrenden Fahrzeug	
Nr. 26:	BRANNOLTE, U.; BOTMA, H.; SCHMIDT, M. (1989): Überholungen von langsamen Fahrzeugen auf Landstraßen	

Institutsnotizen	IfV	1967
Nr. 1:	BISBEE, E. F. (1967): Beispiele zur Transportanalyse (Übers. W. Siegenger)	*
Nr. 2:	Seminarbericht SS 1968: Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- / -verteilungsmodelle	*
Nr. 3:	Seminarbericht WS 1968/69: Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpässen	*
Nr. 4:	Seminarbericht SS 1969: Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und der Kapazität des Parkraums	*
Nr. 5:	BRILON, W. (1970): Erzeugung von Zufallszahlen	*
Nr. 6:	DILLING, J. (1970): Charakteristik des Verkehrsablaufs auf einem Autobahnabschnitt	
Nr. 7:	Seminarbericht WS 1969/70: Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Ausbauvarianten einer Straßenkreuzung	
Nr. 8:	Seminarbericht SS 1970: Untersuchung der Verkehrssicherheit einer Straßenkreuzung	
Nr. 9:	Seminarbericht SS 1971: Einsatz eines Kabinen-Taxi-Systems (CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe	

Institutsnotizen	IfV	1971
Nr. 10:	Seminarbericht WS 1971/72: Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau – ein Optimierungsbeispiel	*
Nr. 11:	Seminarberichte SS 1972: Möglichkeiten der Steuerung von Lichtsignalanlagen in städtischen Netzen	
Nr. 12:	Exkursionsbericht SS 1973:	
Nr. 13:	Seminarbericht SS 1973: Unfalluntersuchung und Stauberechnung auf einem Abschnitt der Bundesautobahn	*
Nr. 14:	Seminarbericht WS 1973/74: Wochenendverkehr im nördlichen Schwarzwald	
Nr. 15:	Seminarbericht SS 1974: Geschwindigkeitsbeschränkungen	
Nr. 16:	Seminarbericht WS 1974/75: Autohöfe - ihre Bedeutung für den Güterverkehr	
Nr. 17:	Seminarbericht SS 1975: Die Karlsruher Häfen	
Nr. 18:	Seminarbericht WS 1975/76: Lärmschutz an Straßen	*
Nr. 19:	Seminarbericht SS 1976: Der Einfluß des Fluglärms auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen	
Nr. 20:	Seminarbericht WS 1976/77: Kombinierter Verkehr	
Nr. 21:	Seminarbericht SS 1977: Koordination eines Straßenzuges mit Lichtsignalanlagen	
Nr. 22:	Seminarbericht WS 1977/78: Die Sicherheit von Verkehrssystemen	
Nr. 23:	Seminarbericht SS 1978: Verkehrsablauf als Warteschlangenproblem	

Institutsnotizen	IfV	1978
Nr. 24:	Seminarbericht WS 1978/79: Bordsteinparken	*
Nr. 25:	Seminarbericht SS 1979: Verkehrssteuerungssysteme	
Nr. 26:	Seminarbericht WS 1979/80: Das Planspielmodell PLUS	
Nr. 27:	Seminarbericht SS 1980: Stauwarnanlagen auf Bundesautobahnen	*
Nr. 28:	Seminarbericht WS 1980/81: Planungsmodelle im Verkehrswesen	
Nr. 29:	Seminarbericht SS 1981: Linienplanung im Öffentlichen Personennahverkehr	
Nr. 32:	Seminarbericht WS 1982/83: Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen im ÖPNV	*
Nr. 33:	Seminarbericht SS 1983: Geschwindigkeit im Straßenverkehr	
Nr. 34:	Fortbildungsseminare 1978-1983 (1984): Fachwörterbuch Verkehrswesen (deutsch-englisch/englisch-deutsch)	*
Nr. 35:	Seminarbericht WS 1983/84: Tempo 30 in Wohngebieten	
Nr. 36:	Seminarbericht SS 1984: Analyse des Radwegenetzes Karlsruhe	
Nr. 37:	Seminarbericht WS 1984/85: Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Autobahnen	
Nr. 38:	BAASS, K.; AXHAUSEN, K.; MÖLLER, K. (Seminarbericht SS 1985): Optimierungsmodelle in der Lichtsignalsteuerung	
Nr. 39:	YOUNG, W. (1985): Traffic Simulation Modelling in Australia	*
Nr. 40:	Seminarbericht SS 1986 Verkehrsverhalten im Bereich der Universität Karlsruhe	

- Nr. 41: Fortbildungsseminare 1978-1986 (1987):
Fachwörterbuch Verkehrswesen
(deutsch-englisch/englisch-deutsch)
- Nr. 42: SCHNITTGER, St. (1987):
Richtlinien zur Dokumentation von Programmen
AXHAUSEN, K., FELLENDORF, M. (1987):
Merkblatt zur Anfertigung von Studien- und Diplomarbeiten
- Nr. 43: Seminarbericht SS 1987
Beobachtung und Beschreibung des Fußgängerverkehrs
- Nr. 44: Seminarbericht WS 1987/88
Beschleunigungsmaßnahmen für den ÖPNV
-

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

LEUTZBACH, W.; BEXELIUS, S. (1966):
Probleme der Kolonnenfahrt; Heft 44 der Schriftenreihe „Straßenbau und
Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

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

ERNST, R. (1967):
Verkehrsablauf an Straßenknoten; Heft 60 der Schriftenreihe „Straßenbau und
Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; BARON, P. (1969):
Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses; Referate anlässlich des IV. Internationalen
Symposiums über die Theorie des Verkehrsflusses in Karlsruhe, Juni 1968;
Heft 86 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundes-
minister für Verkehr, Bonn.

WIEDEMANN, R. (1968):
Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen - Untersuchungen über die Ausbrei-
tung von Fahrzeugpuls; Heft 74 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundes-
minister für Verkehr, Bonn.

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

ZIEGLER, M. (1970):

Wegewahl als Regelkreis - Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wegewahl, Reisezeiten und Verkehrsmengen;

Heft 99 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

HOEFS, D.H. (1972):

Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen;

Heft 140 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

DILLING, J. (1973):

Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken;

Heft 151 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; WETTERLING, K. (1974):

Kurzfassungen ausgewählter Arbeiten aus der Bundesrepublik Deutschland, Techn. Untersuchungen;

Heft 3 der Schriftenreihe „Forschung Stadtverkehr - Sonderreihe“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

FINDEISEN, H.-G. (1975):

Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen;

Heft 178 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BRILON, W. (1976):

a) Unfallgeschehen und Verkehrsablauf.

b) Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen;

Heft 210 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BRILON, W.; BRANNOLTE, U. (1977):

Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Straßen mit Gegenverkehr;

Heft 239 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

HANDSCHMANN, W.; VOSS, M. (1978):

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

LEUTZBACH, W. et al. (1978):

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

SPARMANN, U. (1978):

Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen;
Heft 263 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

MARTIN, W. (1979):

Verkehrsablauf auf Stadtstraßen mit Lichtsignalanlagen;
Heft 268 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

MOHAMED IBRAHIM, M. Y. (1979):

Modell zur Anpassung eines städtischen Erschließungsnetzes an die wachsende Motorisierung in Entwicklungsländern unter besonderer Berücksichtigung des Radverkehrs; Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

KOFFLER, TH., METZGER, W. (1980):

Untersuchung über zweckmäßige Zeit- und Wegeabschnitte zur Erfassung des Verkehrsablaufs; Heft 283 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BOLL, C. (1980):

Reißverschlußverfahren zur Regelung des Verkehrs an Engstellen;
Heft 291 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

WETTERLING, K. (1980):

Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften;
Heft 292 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

LEUTZBACH, W., et al. (1980):

Güterverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell, 2. Teil;
Heft 16 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.) Schriftenreihe, Frankfurt.

BRANNOLTE, U. (1980):

Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen;
Heft 318 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

WINZER, TH. (1980):

Messung von Beschleunigungsverteilungen;
Heft 319 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; BEIL, D. (1981):

Ein Matrixmodell zur Ermittlung der Verkehrsbelastung in Netzen;
Heft 338 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; MAIER, W.; HANDSCHMANN, W.; SCHULER, M. (1982):

- a) Einfluß von Verkehrsbeschränkungen und Ausbauförmern auf die Sicherheit an plangleichen, außerörtlichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen
- b) Einfluß von Verkehrsbeschränkungen und Ausbauförmern auf die Sicherheit an plangleichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen außerhalb bebauter Gebiete; Heft 376 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BRANNOLTE, U.; HOLZ, S. (1983):

Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen - Modellerweiterung; Heft 402 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; HOLZ, S. (1984):

Unfallcharakteristik von Radfahrern auf Außerortsstraßen;
Heft 433 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

WIEDEMANN, R.; MÖLLER, K.; MOTT, P. (1986):

Berücksichtigung aller Verkehrsteilnehmer bei der Beurteilung von lichtsignal-gesteuerten Knoten;

Heft 464 Teil B der Schriftenreihe „Forschung Strassenbau und Straßenver-kehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; HAAS, M.; PAPAVALIOU, V.; SCHWERDTFEGGER, TH. (1986):

Dynamische Umlegung in Verkehrsnetzen;

Heft 469 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundes-minister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; BUCK, A.; AXHAUSEN, K. (1986):

Möglichkeiten und Grenzen der Führung des Radverkehrs auf Radverkehrs-straßen von anbaufreien Straßen;

Heft 489 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundes-minister für Verkehr, Bonn.

KIM, H.-S. (1987):

Methoden zur Beschreibung des Unfallgeschehens - Versuch eines Vergleich zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Korea;

Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

LEUTZBACH, W.; HÖFLER, F. (1987):

Untersuchung des verkehrswirtschaftlichen Nutzens einer Baustelle mit Rich-tungswechselbetrieb;

Heft 495 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundes-minister für Verkehr, Bonn.

WIEDEMANN, R.; SCHWERDTFEGGER, TH.; ECKERT, B. (1987):

Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichti-gung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO);

Heft 500 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundes-minister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; PAPAVALIOU, V. (1988):

Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahr-nehmung in konkreten Verkehrssituationen;

Bericht zum Forschungsprojekt 8306 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach.

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

LEUTZBACH, W.; ZOELLMER, J. (1989):

Zusammenhang zwischen der Verkehrssicherheit und den Elementen des Straßentwurfs;

Heft 545 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; BRANNOLTE, U.; SCHMIDT, M.; BAUMANN, N. (1989):

Untersuchung des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Straßen unter besonderer Berücksichtigung langsamer Fahrzeuge;

Heft 551 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; SCHNITTGER, S. (1989):

Erweiterung eines Modells zur Simulation des Verkehrsflusses in Fernstraßennetzen um einen Modul zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs, der Abgaswerte und der Reisezeit sowie die Erprobung des Modells auf einem realen Netz; Heft 559 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; HÖFLER, F. (1989):

Messungen zur Ermittlung von Geschwindigkeitsprofilen auf Landstraßen;

Heft 564 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Bundesminister für Verkehr, Bonn.

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, 1973, ISBN 3-7812-0846X.

HERZ, R.; SCHLICHTER, H. G.; SIEGENER, W. (1976):
Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner;
Werner-Ingenieur-Text 42, Werner-Verlag Düsseldorf, ISBN 3-8041-1934-4

RUPPERT, W.-R.; LEUTZBACH, W.; ADOLPH, U.-M. et al. (1981):
Achslasten und Gesamtgewichte schwerer Lkw. Nutzen- Kosten-Untersuchung
einer Anhebung der zulässigen Höchstwerte;
Hrsg. BMV, Verlag TÜV Rheinland, 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, 1987,
ISBN 3-540-16850-8.

LEUTZBACH, W. (1988):
Introduction to the Theory of Traffic Flow;
Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, ISBN 3-540-17113-4.
Sonderheft zum 20jährigen Jubiläum: Ein Institut stellt sich vor.
Institut f. Verkehrswesen (Hrsg.), Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1982.
