

ISSN 0341-5503

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

Dr.-Ing. Claus-D. Jahnke

**Kolonnenverhalten
von Fahrzeugen
mit autarken
Abstandswarnsystemen**

Heft 23

1982

V o r w o r t

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe. Sie wurde durch die Bereitstellung von Forschungsmitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie ermöglicht.

Den Herren Professoren Dr.-Ing. W. Leutzbach und Dr.-Ing. G. Steierwald danke ich für die wertvolle Unterstützung und anregende Förderung der Arbeit sowie für die Übernahme der Referate.

Herrn Dipl.-Ing. B. Schaub danke ich für die umfangreichen Programmier- und Auswertearbeiten.

In meinen Dank schließe ich die Institutsangehörigen ein, die mir durch Diskussionen und Anregungen sowie durch Schreib- und Zeichenarbeiten behilflich waren.

Claus-D. J a h n k e

K U R Z F A S S U N G

JAHNKE, C.-D.:

Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken
Abstandswarnsystemen

99 Seiten, 116 Abbildungen, 6 Anhänge

Die Arbeit befaßt sich mit der Erfassung, Auswertung und Analyse von Kolonnenfahrten mit Personenkraftfahrzeugen, in denen autarke Abstandswarnsysteme eingebaut waren. Die Untersuchungsgrundlage bilden Fahrversuche von sieben mit diesen Systemen ausgerüsteten Fahrzeugen, die alle mit vorgegebenen, fest installierten Abstandstrategien fahren.

Zur Beurteilung der Qualität der Fahrtverläufe werden die Kenngrößen Variationskoeffizient der Geschwindigkeit, Beschleunigungsrauschen und Geschwindigkeitsgradient herangezogen. Mit Hilfe einer deterministischen Fahrzeugfolgegleichung wird dann die modellhafte Beschreibung des Folgeverhaltens untersucht. Darauf aufbauend werden Stabilitäts- und Sicherheitsanalysen durchgeführt. Aspekte zur Leistungsfähigkeit beschließen die behandelte Thematik.

Es wird nachgewiesen, daß bei Kolonnenfahrten mit autarken Abstandswarnsystemen eine höhere Sicherheit sowie ein größerer Anteil an Gleichförmigkeit des Verkehrsablaufs erreichbar ist.

S U M M A R Y

JAHNKE, C.-D.:

Platoon-Behaviour of Vehicles with Collision-Avoidance-Warning-Systems

99 pages, 116 figures, 6 appendices

The research deals with the analysis and evaluation of test-trips made by a platoon of seven vehicles, equipped with collision-avoidance-warning-systems that operate according to a predefined safe-headway strategy.

The parameters used to measure the quality of the traffic-flow were the coefficient of variation of the speed, the acceleration noise and the velocity-gradient. The observed following-behaviour of the vehicles was modelled by a deterministic car-following equation. Based on this equation stability and safety analyses were made. Finally, some attention was given to the effects of such devices on highway capacity.

It was concluded that the vehicles in the platoon behaved in a safer and more stable manner when the collision-avoidance-warning-system was used.

R E S U M E

JAHNKE, C.-D.:

La conduite des véhicules équipés avec des systèmes autarciques d'avertissement de collision en convoi

99 pages, 116 illustrations, 6 annexes

L'étude s'occupe avec l'exploration et l'analyse de conduites en convoi avec sept véhicules. Les véhicules furent équipés avec des systèmes autarciques d'avertissement de collision étant programmés par certaines stratégies de distance prétextées.

La qualité des parcours fut évaluée à l'aide des mesures suivantes: le coefficient de la variation de la vitesse, "l'accélération noise" et le gradient de la vitesse.

A l'aide d'une équation déterministique de la suite des véhicules la description de la suite des véhicules en modèle fut recherchée. Basé sur ces résultats, des analyses de la stabilité, de la sécurité et de la capacité furent exécutées.

On a démontré que, en cas de convoi de véhicules, l'on obtient une augmentation de sécurité et de stabilité.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Theorie des Kolonnenverkehrs	4
2.1 Zeitliche Entwicklung deterministischer Fahrzeugfolgemodelle	6
2.2 Stabilitätsbetrachtungen	11
3. Ausgangssituation	
3.1 Geräte- und Meßtechnik	16
3.1.1 Funktionsweise autarker Abstandswarnsysteme	16
3.1.2 Datenaufzeichnung bei den Versuchsfahrten	18
3.2 Abstandsstrategien	19
3.3 Fahrprofile	21
3.4 Versuchsstrecke und Versuchsablauf	23
3.5 Ausgangsdaten und deren Fehler	25
4. Auswertungen und Ergebnisse	28
4.1 Allgemeine Auswertungen	29
4.1.1 Ganglinien von Geschwindigkeiten und Abständen	29
4.1.2 Abstandsverhalten	31
4.1.3 Variationskoeffizient der Geschwindigkeit und Beschleunigungsrauschen	34
4.2 Optimierung der Fahrzeugfolgegleichung	40

	Seite	
4.2.1	Parameterschranken und zeitliche Fahrtabgrenzung	41
4.2.2	Gütekriterium Restabweichung	43
4.2.3	Abhängigkeiten der Parameter der Fahrzeugfolgegleichung	47
4.2.3.1	Parameter in Abhängigkeit von der Strategieeinstellung	48
4.2.3.2	Parameter in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition in der Kolonne	49
4.2.3.3	Fahrerabhängige τ -Werte	50
4.2.3.4	Systemabhängige τ -Werte	51
4.2.4	Festlegung der Parameter bei Kolonnenfahrten mit Abstandswarnsystemen	52
4.2.4.1	Programmbeschreibung	53
4.2.4.2	Ergebnisse der Programmläufe	57
4.3	Stabilitätsuntersuchungen	59
4.3.1	Grenzkurven der Stabilität	59
4.3.2	Ganglinien der Stabilität	61
4.3.3	Stabilität in Abhängigkeit von den Strategieeinstellungen und der Fahrzeugposition	64
4.3.4	Stabilitätsfaktoren	66
4.3.4.1	Stabilitätsfaktoren einzelner Folgefahrzeuge	66
4.3.4.2	Stabilitätsfaktoren der Kolonne	69
4.3.4.3	Ergebnisse	70

	Seite
4.4 Simulation strategieabhängiger Folgevorgänge	72
4.4.1 Generelle Auswirkungen der Parametergrößen	72
4.4.1.1 Auswirkungen der Parameter l und m	73
4.4.1.2 Auswirkungen von Anfangsabstand Δx_a und Reaktionszeit τ	74
4.4.2 Auswirkungen der strategieabhängigen Parameterkombinationen	75
4.4.2.1 Anfangsabstand gleich strategiegeforderter Sollabstand	76
4.4.2.2 Anfangsabstand gleich mittlerer strategieabhängiger Istabstand	77
5. Diskussion von Sicherheitsaspekten	79
5.1 Problematik von Warnstrategien	79
5.2 Sicherheitskriterien	81
5.2.1 Kriterium der absoluten Sicherheit	81
5.2.2 Kriterium der relativen Sicherheit	82
5.2.3 Kriterium der minimalen Sicherheit	82
5.2.4 Faktoren der Sicherheitskriterien	83
5.3 Sicherheitsfaktor	84
5.4 Ergebnisse	88

	Seite
6. Aspekte zur Leistungsfähigkeit	91
6.1 Leistungsfähigkeit der Strategie- einstellung	92
6.2 Überlegungen zu makroskopischen Auswirkungen	95
7. Schlußbemerkungen	98

Literatur

Abbildungen

Anhänge

1. Einleitung

Mit dem noch immer steigenden Individualverkehrsaufkommen wachsen auch die Probleme der Verkehrssicherheit. Ein Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Unfallhäufigkeit wird in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen /1/, /2/. Diese Abhängigkeit wird insbesondere bei Auffahrunfällen deutlich.

Nach dem heutigen Stand der Verkehrswissenschaft kann man davon ausgehen, daß verkehrsbeeinflussende Maßnahmen neben der Qualität vor allem die Sicherheit des Verkehrsablaufs entscheidend verbessern können. Die Information für die Beeinflussung kann zum einen aus dem Umfeld des Fahrer-Fahrzeug-Systems kommen (Geschwindigkeitsbegrenzung, Wechselwegweisung), sie kann aber auch im Fahrzeug selbst installiert sein (Tachometer, Zielführungssysteme) und damit dem Fahrer permanent zur Verfügung stehen.

Die in den letzten Jahren entwickelten autarken Abstandswarnsysteme (AWS) zählen zu der zweiten Gruppe. Sie informieren den Fahrer im Fahrzeug darüber, ob er mit seinem Fahrzeug einen definierten Sicherheitsabstand zum Vorfahrenden einhält oder nicht. Beim Unterschreiten des Sicherheitsabstandes wird der Fahrer optisch und akustisch gewarnt. Durch Geschwindigkeitsänderungen kann der Fahrer dann seinen Abstand vergrößern, bis er sich wieder in einem definiert sicheren Bereich befindet.

Im Rahmen der Felderprobung autarker Abstandswarnsysteme wurden zahlreiche Versuchsfahrten mit AWS durchgeführt. Die Auswertungen bezogen sich in er-

ster Linie auf die Untersuchung sinnvoll erscheinender Abstandswarnstrategien sowie auf die Akzeptanz bei den Fahrern /3/.

In dieser Arbeit soll nun das gemessene Datenmaterial von Kolonnenfahrversuchen mit AWS unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten ausgewertet und analysiert werden. Die Aufgabe umfaßt im wesentlichen den Vergleich der eingesetzten Abstandsstrategien und Untersuchungen des Folgeverhaltens von in Kolonne fahrenden Fahrzeugen, die alle mit Abstandswarnsystemen ausgestattet waren. Ein vorrangiges Untersuchungsziel ist zudem die Optimierung der allgemeinen Fahrzeugfolgegleichung von GAZIS, HERMANN, ROTHERY /10/, insbesondere unter dem Gesichtspunkt, die Verwendbarkeit dieses deterministischen Modellansatzes auch für Fahrten von mit AWS ausgerüsteten Fahrzeugen zu überprüfen.

Kapitel 2 geht auf die theoretischen Grundlagen des Kolonnenverkehrs ein. Beschrieben wird die zeitliche Entwicklung und die damit verbundene ständige Verfeinerung deterministischer Fahrzeugfolgemodelle.

In Kapitel 3 wird die dieser Arbeit zugrundeliegende (und als vorgegeben zu betrachtende) Ausgangssituation beschrieben. Erläutert werden die Geräte- und Meßtechnik, die Warnstrategie, die Fahrprofile des Führungsfahrzeugs sowie der Versuchsablauf. Abschließend wird das dieser Arbeit zugrundeliegende Datenmaterial beschrieben.

Die Auswertungen der Versuchsfahrten enthält schließlich Kapitel 4. Nach den allgemeinen Ergebnissen des Abstands-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhaltens folgt die Beschreibung des Fahrverhaltens mit Hilfe eines deterministischen Ansatzes. Aufbauend darauf werden dynamische Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt. Sie ermöglichen eine quantifizierbare kontinuierliche Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Folgefahrzeugen mit und ohne Systeminformation. Schließlich folgen einige Simulationsbeispiele, in denen die Auswirkungen von Fahrten mit und ohne Systeminformation unter ceteris-paribus-Bedingungen beschrieben werden.

In Kapitel 5 werden Sicherheitsaspekte behandelt. Dies geschieht im wesentlichen um die Problematik, mit der die Vorgabe einer Abstandsstrategie behaftet ist, zu verdeutlichen.

Den Abschluß bilden in Kapitel 6 Überlegungen zu möglichen Auswirkungen von Fahrten mit Abstandswarnsystemen auf die Leistungsfähigkeit einer Strecke.

2. Grundlagen und Theorie des Kolonnenverkehrs

Die Fahrzeugfolgetheorie befaßt sich mit der theoretischen Beschreibung des Systems Fahrer-Fahrzeug in einer Kolonne. Dabei wird davon ausgegangen, daß dieses System auf das Verkehrsgeschehen vor ihm (Reizimpulse) mit einer individuellen Empfindlichkeit reagiert. Die generelle Grundgleichung der Fahrzeugfolgetheorie lautet damit:

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

Die mathematischen Modelle dieser Grundgleichung lassen sich in zwei Gruppen wie folgt einteilen:

- deterministische Fahrzeugfolgemodelle
- stochastische Fahrzeugfolgemodelle.

Während die zweite Gruppe mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen arbeitet /11/, /12/, /13/, werden bei den deterministischen Ansätzen ausschließlich Mittelwerte zur Beobachtung der Grundgleichung verwendet /10/, /14/, /15/, /16/, /17/, /18/, /19/.

Grundsätzlich gemeinsam ist beiden Ansätzen der in Abbildung 2.1 abstrahierte Zeit-Weg-Verlauf bei der Entstehung und Auflösung einer Kolonne. Nach einer Annäherungsphase an ein (mit konstanter Geschwindigkeit) vorausfahrendes Fahrzeug n reagiert der Fahrer des Folgefahrzeuges $n+1$ und setzt diese Reaktion in eine Geschwindigkeitsreduzierung um. Im Folgebereich fährt das Fahrzeug $n+1$ mit dem Fahrzeug n in Kolonne. Es ist in seinem Geschwindigkeitsverhalten durch (mindestens) ein voraus-

fahrendes Fahrzeug beeinflusst. Mit dem Beginn der Phase des Überholens löst sich schließlich diese Zweierkolonne auf. Die Schnittstellen der einzelnen Phasen lassen sich durch die Aktionspunkte 1-3 trennen.

Ein Unterschied der genannten Modelle besteht noch in der räumlich-zeitlichen Zuordnung der Untersuchung. Die stochastischen Ansätze betrachten in der Regel den gesamten Annäherungs- und Folgevorgang, also von Aktionspunkt 1 bis 3. Die deterministischen Modelle dagegen versuchen, die Wechselwirkungen der Fahrzeuge innerhalb der Punkte 2 und 3 zu untersuchen, also lediglich während der Folgezeit beziehungsweise des Folgeweges.

2.1 Zeitliche Entwicklung deterministischer Fahrzeugfolgemodelle

Erste Entwicklungen auf dem Gebiet der deterministischen Fahrzeugfolgetheorie stellte REUSCHEL bereits 1950 vor /14/. Sein Modell ging davon aus, daß ein Fahrer im Folgebereich versucht, in jedem Augenblick einen Nettoabstand proportional der eigenen Geschwindigkeit zu halten:

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

mit k = Konstante
und L = Fahrzeuglänge.

Es zeigte sich, daß dieser Ansatz die tatsächlichen Fahrvorgänge nicht beschreiben kann, sondern bestenfalls den Idealfall, nämlich wie gefahren werden sollte, darstellt. Menschen sind weder imstande Geschwindigkeiten oder Abstände genau zu schätzen, noch sind sie in der Lage, ohne Zeitverzug zu reagieren.

WHITE ging 1957 davon aus /15/, daß ein Fahrer auf Abstandsänderungen zu seinem Vordermann mit einer Beschleunigung oder Verzögerung reagiert. Wie bei REUSCHEL versuchen die Fahrer einen Abstand proportional der eigenen Geschwindigkeit zu halten. Die Abweichungen von dem angestrebten Abstand werden durch Beschleunigungsänderungen korrigiert:

$$b_{n+1}(t) = \lambda(x_n(t) - x_{n+1}(t) - kv_{n+1}(t))$$

mit k = Konstante
und λ = Sensitivitätskonstante.

Erstmals wurde hier eine Sensitivitätskonstante λ eingeführt, die die unterschiedliche Intensität der Fahrerreaktion berücksichtigen konnte. Obwohl mit diesem Modell auch Stabilitätsuntersuchungen gemacht wurden (siehe Kapitel 2.2), gelten die gleichen Kritikpunkte wie bei REUSCHEL.

CHANDLER, HERMAN, MONTROLL untersuchten daraufhin ein Modell, in dem der Fahrer versucht, einen individuellen Bruttoabstand A einzuhalten und auf Abweichungen davon mit entsprechender Beschleunigung oder Verzögerung reagiert /16/:

$$b_{n+1}(t) = \lambda(v_n(t) - v_{n+1}(t)).$$

Beide Modelle zeigten keine ausreichend guten Ergebnisse beim Vergleich mit Messungen. Zum einen ist einsichtig, daß die gewünschten Abstände wohl nicht nur geschwindigkeitsabhängig sind; zweitens ergibt die Gleichung integriert den REUSCHEL-Ansatz und damit die gleichen Unzulänglichkeiten. Dieselben Autoren erweiterten nun ihren Ansatz dahingehend, daß sie noch zusätzlich die Fahrerreaktionszeit τ berücksichtigten:

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

Auf eine Geschwindigkeitsdifferenz zum Zeitpunkt t wird die Fahrerreaktion durch Beschleunigung und Verzögerung erst nach einer Reaktions- und Umsetzzeit τ wirksam. Ein Vergleich mit gemessenen Werten ergab mit dieser Gleichung die bis dato besten Übereinstimmungen.

Durch die Einführung nichtlinearer Modelle konnten Folgevorgänge noch realistischer beschrieben werden. GAZIS, HERMAN, POTTS /18/ waren sogar der Meinung, daß nur mit nichtlinearen Ansätzen der (stationäre) Verkehrsfluß ausreichend genau beschrieben wird. Sie entwickelten daraufhin das folgende nichtlineare Modell:

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

Darauf aufbauend formulierte EDIE /19/ ein modifiziertes Modell, in dem noch die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs mit einging und der Abstand quadriert wurde:

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

Das bis heute allgemein anerkannte deterministische Fahrzeugfolgemodell wurde schließlich von GAZIS, HERMAN, ROTHERY vorgestellt /10/. Danach ist die Beschleunigung des Folgefahrzeugs $n+1$ zum Zeitpunkt $t+\tau$ abhängig von der Eigengeschwindigkeit zur selben Zeit, der Relativgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen n und $n+1$ zum Zeitpunkt t und dem Abstand beider Fahrzeuge zum Zeitpunkt t .

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

Die Einflüsse der Eigengeschwindigkeit und des Abstandes werden dabei durch die Exponentialparameter m und l bestimmt; $\lambda_{1,m}$ ist ein Proportionalitäts-

faktor. Der Quotient

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

wurde von den Autoren mit Sensitivität bezeichnet. Aus diesem Ansatz konnten letztlich auch die meisten deterministischen Modelle für verschiedene l-m-Kombinationen wiedergewonnen werden und die Güte der Modelle überprüft werden.

Eine ausführliche Experimentserie wurde von ROTHERY, SILVER, HERMAN mit Bussen durchgeführt /20/, und es wurden die l-m-Kombinationen 0-0, 1-0 und 2-1 der Fahrzeugfolgegleichung getestet. Die Kolonne bildeten hier maximal 10 Fahrzeuge, wobei jedes Fahrzeug mit dem vorausfahrenden über einen Draht verbunden war. Mit einer Rutschkupplung wurde der Draht immer gespannt gehalten. Die Länge des abgewickelten Drahtes, also der Nettoabstand zum Vorausfahrenden, wurde gemessen. Mit der Registrierung der eigenen Geschwindigkeit und der Beschleunigung waren damit alle benötigten Größen gegeben.

Ein Vergleich der drei Ansätze ergab, daß das "Reziproker-Abstand-Modell" (l-m-Kombination 1-0) das Folgeverhalten am besten beschreiben konnte.

Mehrere andere Forschungsgruppen /21/, /22/, /23/, /24/ konnten mit empirischen Untersuchungen ebenfalls die Zulässigkeit der Anwendung der allgemeinen Fahrzeugfolgegleichung bestätigen. Abschließend sei in diesem Zusammenhang die Arbeit von HOEFS er-

wähnt /25/, die wohl eine der meßtechnisch umfangreichsten und genauesten Überprüfungen der Fahrzeugfolgegleichung darstellt.

HOEFS entwickelte eine Meßeinrichtung, die es ihm erlaubte, nachfolgende Fahrzeuge unbemerkt zu beobachten. Aus einem Kombi-Fahrzeug heraus wurden die Fahrzeuge photographisch erfaßt. Die Eigengeschwindigkeit wurde über ein Schlepprad registriert. Die Synchronisation beider Messungen (Abstandsphoto des Folgefahrzeugs und Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs) wurde über ein Steuergerät im Meßwagen erreicht.

Bei der Untersuchung der Fahrzeugfolgegleichung unterschied er vier Fälle und bestimmte danach die optimalen l-m-Kombinationen:

Fall	\bar{l}	\bar{m}
I alle Fahrvorgänge	1,1	0,4
II "Öffnungsvorgänge"	0,5	0,2
III "Schließvorgänge"	1,5	0,4
IV Bremsvorgänge des Führungsfahrzeugs	2,5	0,4

Die Reaktionszeiten lagen zwischen 0,5 und 2,0 s. Eine Abhängigkeit der $\lambda_{1,m}$ -Werte von τ wurde nicht festgestellt.

Nach HOEFS hängen die Parameter l und m von der Art des Folgevorgangs ab. Besonders deutlich ist dieser Sachverhalt beim Exponenten l zu erkennen. Dies bedeutet, daß der Abstand die wesentliche Einflußgröße bei der Beschreibung des Fahrtverlaufs durch die Fahrzeugfolgegleichung darstellt.

2.2 Stabilitätsbetrachtungen

Mit der Entwicklung der Fahrzeugfolgemodelle gewannen zunehmend auch Stabilitätsuntersuchungen an Bedeutung. Es interessierte nicht nur die Beschreibung des Folgeverlaufes eines Fahrzeugs, sondern zusätzlich die Frage: Wie reagiert das System Fahrer-Fahrzeug im Folgefall auf (extreme) Störungen, die durch den Vorausfahrenden ausgelöst werden, und wie verbreiten sich diese Störungen innerhalb einer Kolonne?

Für Stabilitätsbetrachtungen lassen sich zwei Fälle definieren: Einzel- und Kolonnenstabilität.

Einzelstabilität liegt dann vor, wenn die Störungen des Führungsfahrzeugs (z.B. periodische Bewegungsänderungen) den Fahrtverlauf des Folgefahrzeugs derart beeinflussen, daß die übertragene Störung zwar größer sein kann, aber mit zunehmender Zeit nicht anwächst (Abb. 2.2-b).

Kolonnenstabil verhält sich das System dann, wenn die übertragenen Störungen nicht größer sind, als die auslösenden, und die Störungen mit zunehmender Zeit ebenfalls nicht anwachsen (Abb. 2.2-c-e).

Die Forderung nach Kolonnenstabilität ist also nur bezüglich der Störungsamplitude restriktiver. Dieser Sachverhalt wird sofort plausibel, wenn man sich vorstellt, daß durch das Anwachsen der Störung von Fahrzeug zu Fahrzeug es nur eine Frage der Zeit ist, wann das System durch Stillstand oder durch Auffahrunfälle zusammenbricht.

Umfangreiche Stabilitätsuntersuchungen wurden von HERMAN, MONTROLL, POTTS, ROTHERY in /17/ veröffentlicht. Sie entwickelten Stabilitätskriterien für die Parameterkombination $m = 0$ und $l = 0$, für die sich die Fahrzeugfolgegleichung reduziert zu

$$b_{n+1}(t+\tau) = \lambda_{0,0}(v_n(t) - v_{n+1}(t))$$

und für die der Quotient

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

mit dem Proportionalitätsfaktor $\lambda_{1,m}$ identisch ist. Für diesen Fall können die folgenden Stabilitätskriterien angegeben werden (Anhang 1):

$\alpha \cdot \tau > \pi/2$: Instabiler Folgevorgang; oszillatorisch und die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs wachsen unbegrenzt an;

$\alpha \cdot \tau = \pi/2$: Grenzfall zwischen Instabilität und Einzelstabilität; oszillatorisch und nicht wachsende Amplituden;

$\frac{1}{e} < \alpha \cdot \tau < \pi/2$: Einzelstabiler Folgevorgang; oszillatorisch und mit gedämpften Amplituden der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs;

$\alpha \cdot \tau \leq \frac{1}{e}$: Einzelstabiler Folgevorgang; nicht oszillatorisch und mit gedämpften Amplituden der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs;

$\frac{1}{e} < \alpha \cdot \tau < \frac{1}{2}$: Kolonnenstabiler Folgevorgang; oszillatorisch mit kleineren, nicht anwachsenden Amplituden der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs.

KÖHLER überprüfte in seiner Arbeit u.a. die Gültigkeit dieser Stabilitätskriterien für beliebige l-m-Kombinationen in der Fahrzeugfolgegleichung /26/, speziell im Hinblick auf Kolonnenstabilität. Er konnte nachweisen, daß für kolonnenstabiles Folgeverhalten immer gelten muß:

$$c = \alpha \cdot \tau < 0,5.$$

Das heißt, die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien von Fahrzeugen in einer Kolonne müssen von Fahrzeug zu Fahrzeug abnehmen.

Die Gleichung

$$c = \alpha \cdot \tau = 0,5$$

stellt den Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und Kolonneninstabilität dar.

Ausgehend von dem obengenannten Stabilitätskriterium können nun mit den Parametern l, m, τ , $\lambda_{1,m}$

der Fahrzeugfolgegleichung Grenzkurven des minimalen Abstandes errechnet werden, die den stabilen vom instabilen Abstandsbereich trennen:

Aus

$$\alpha \cdot \tau = \frac{\lambda_{1,m}(v_{n+1}(t+\tau))^m}{(x_n(t) - x_{n+1}(t))^1} \cdot \tau < 0,5$$

folgt durch Umstellung und mit $\Delta x(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t)$

$$\Delta x(t) = (2\lambda_{1,m}(v_{n+1}(t+\tau))^m \tau)^{\frac{1}{1}}$$

Abbildung 2.3 verdeutlicht diese Bereichstrennung. In derselben Abbildung sind noch zusätzlich Grenzkurven für absolut und relativ sichere Abstände*) eingetragen. Deutlich ist erkennbar, daß die Stabilitätsforderung bei hohen Geschwindigkeiten weit weniger große Abstände verlangt, als die Forderung nach relativ oder gar absolut sicheren Abständen.

Bis etwa 15 m/s (= 54 km/h) enthalten die Abstände nach dem Stabilitätskriterium auch die Abstände im absolut sicheren Bereich. Führt man Geschwindigkeiten zwischen 15 und ca. 26 m/s (= 94 km/h) mit Abständen dieses Stabilitätskriteriums, so gewährleisten diese Abstände noch relativ sicheres Folgeverhalten.

*) Ein absolut sicherer Abstand ist dann gegeben, wenn der Vorausfahrende, aus welchen Gründen auch immer, plötzlich und ohne eigenen Bremsweg zum Stillstand kommt, und der Reaktions- und Bremsweg für den Hintermann noch ausreichend groß ist.

Relativ sicher ist der Abstand dann, wenn angenommen wird, daß der Vorausfahrende ebenfalls einen bestimmten Bremsweg benötigt, und der Hintermann nach seinem Reaktions- und Bremsweg noch rechtzeitig anhalten kann.

Nach der Fahrzeugfolgegleichung ist kolonnenstabiles Folgeverhalten auch noch über größere Geschwindigkeiten (modellmäßig) möglich. Die dabei auftretenden Verzögerungswerte wären jedoch fahrdynamisch nicht mehr erreichbar.

3. Ausgangssituation

Die Meßdaten von Kolonnenfahrversuchen mit Abstandswarnsystemen bilden die Grundlage dieser Arbeit. Die Daten wurden während der Felderprobung autarker Abstandswarnsysteme /3/ erhoben; im Rahmen dieser Arbeit wurden keine zusätzlichen Versuche durchgeführt.

3.1 Geräte- und Meßtechnik

3.1.1 Funktionsweise autarker Abstandswarnsysteme

Die bisher entwickelten Systeme lassen sich jeweils in drei Komponenten zerlegen: den Antennen- und HF-Teil, die Signalverarbeitung und die Informationseinheit (Abb. 3.1 und 3.2). Alle Geräte arbeiten auf Radarbasis im 35-GHz-Bereich; sie unterscheiden sich jedoch in den verwendeten Verfahren; dem sogenannten Pulsradar und dem FM/CW-Radar.

Der Radarsender eines AWS sendet Mikrowellenimpulse aus. Von einem reflektierenden Ziel gelangen die Impulse wieder in den Empfänger zurück. Beim Pulsradar kann nun aus der Laufzeit über ein festes Zeitintervall die Geschwindigkeitsdifferenz zu einem vorausfahrenden Fahrzeug errechnet werden. Beim FM/CW-Radar dagegen wird die gesendete mit der empfangenen Frequenz verglichen und aus der Frequenzverschiebung die momentane Geschwindigkeitsdifferenz ermittelt (Dopplereffekt). Auch hier bestimmt die Impulslaufzeit den Abstand zum Vorausfahrenden.

Im Auswerteteil wird nun aus diesen Größen sowie aus fest vorgegebenen Parametern ein Sollabstand errechnet (siehe Kapitel 3.2) und mit dem aktuell gemessenen Istabstand verglichen. Ist der gemessene Istabstand kleiner als der Sollabstand, erfolgt eine Warnung (Abb. 3.3).

Die optische Darbietung der jeweiligen Fahrsituation erfolgt in der Anzeigeneinheit im Fahrzeug durch Leuchtdioden. Je nach aktuellem Abstand leuchten unterschiedlich lange Farbbänder auf: rot für "Sicherheitsabstand ist unterschritten", gelb für "Fahren im Sicherheitsabstand" und grün für "Sicherheitsabstand ist überschritten". Bei zu geringem Abstand wird der Fahrer noch zusätzlich über ein akustisches Signal informiert. Abbildung 3.5 und 3.6 zeigen die in den Versuchsfahrten realisierten Anzeigen.

3.1.2 Datenaufzeichnung bei den Versuchsfahrten

Die während der Versuchsfahrten aufgezeichneten Meßwerte und Zustandsgrößen (Abb. 3.7) wurden in jedem Fahrzeug auf einer Magnetbandkassette registriert (Abb. 3.8 und 3.9). Dabei wurde mit einem Aufzeichnungstakt von 100 ms gearbeitet. Die Daten wurden so in der Regel über die gesamte Versuchsfahrt zeitlich kontinuierlich erhoben. Die Zeitsynchronisation wurde über ein gemeinsames elektrisches Signal erreicht, das unmittelbar vor jeder Versuchsfahrt die Datenaufzeichnung in den einzelnen Fahrzeugen zur selben Zeit startete. Alle Größen wurden in digitaler Form aufgezeichnet beziehungsweise mit einer einheitlichen Systematik in eine für das Aufzeichnungsgerät lesbare Form überführt.

Die innerhalb dieser Arbeit ausgewerteten Meß- und Zustandsgrößen sind die Eigengeschwindigkeit, die Geschwindigkeitsdifferenz, der Ist- und der Sollabstand, die Zeit und gegebenenfalls die Brems- und die Alarmzeit. Dabei wurde die Eigengeschwindigkeit über einen externen Impulsgeber gemessen. Dieser Meßwert wurde dann an den Gefahrenrechner zur Ermittlung der Geschwindigkeitsdifferenz und der Abstände weitergegeben. Die Zeiterfassung erfolgte durch eine Uhr, die als Steckkarte in das Aufzeichnungsgerät integriert war. Die Bremsbetätigung schließlich wurde an den aufleuchtenden Bremslichtern der jeweiligen Fahrzeuge abgegriffen und zeitlich zugeordnet.

3.2 Abstandsstrategien

Die Versuchsfahrten wurden mit drei unterschiedlichen Warnstrategien A, B und C sowie einer "ohne-Fahrerinformation-Strategie" D durchgeführt. Bei den Warnstrategien lag der Berechnung des Sicherheitsabstandes ein gemeinsamer Ansatz zugrunde. Dieser Ansatz besagt, daß sich der Sicherheitsabstand Δx aus dem eigenen Bremsweg abzüglich dem Bremsweg des Vorausfahrenden und zuzüglich dem eigenen Reaktionsweg ergibt:

$$\Delta x(t) = \frac{v_n^2(t)}{2b_n(t)} - \frac{v_{n-1}^2(t)}{2b_{n-1}(t)} + v_n(t)t_R$$

Die Einstellungen A, B und C unterschieden sich in der Festlegung der Parameter b_n , b_{n-1} und t_R wie folgt:

Einstellung	b_{n-1} (m/s ²)	b_n (m/s ²)	t_R (s)
A	7	7	0,8
B	7	6	1,0
C	7	5	1,2

Da dieser Ansatz die Verzögerungswerte nicht geschwindigkeitsabhängig berücksichtigt, wurden dafür Mittelwerte gewählt (5 - 7 m/s²), die aufgrund von Messungen auf trockener Fahrbahn /7/ als durchaus realistisch

einzustufen sind. Auch die angesetzten Reaktionszeiten decken im wesentlichen den Bereich ab, der in mehreren Untersuchungen /8/, /9/ im Mittel festgestellt wurde.

Mit der Einstellung A wird davon ausgegangen, daß im Gefahrenfall beide Fahrzeuge mit der gleichen Verzögerung abbremsen ($b_n = b_{n-1} = 7 \text{ m/s}^2$) und dem Folgefahrer 0,8 s Reaktions- und Umsetzzeit verbleiben. Beide Fahrzeuge benötigen somit bei gleicher Geschwindigkeit einen gleichlangen Bremsweg.

Der Sicherheitsabstand ist dann bei der Einstellung A allein von der dem Fahrer unterstellten Reaktions- und Umsetzzeit t_R und der Eigengeschwindigkeit v_n abhängig.

Die Strategie B unterstellt dem Folgefahrzeug eine geringere Verzögerung als dem Vorfahrer ($b_n = 6 \text{ m/s}^2$; $b_{n-1} = 7 \text{ m/s}^2$) sowie eine längere Reaktions- und Umsetzzeit ($t_R = 1,0 \text{ s}$) beim Fahrer. Im Gegensatz zur Einstellung A kommt hier, selbst für den exakten Folgefall ($\Delta v = 0$), der gesamte Ansatz zur Wirkung. Mit zunehmender Eigengeschwindigkeit steigt der geforderte Abstand quadratisch an.

Die Einstellung C basiert auf der gleichen Überlegung wie B, nur werden hier Parameter gewählt, die noch schlechtere Verzögerungswerte und Reaktionszeiten für das Folgefahrzeug unterstellen ($b_n = 5 \text{ m/s}^2$, $t_R = 1,2 \text{ s}$), so daß sich entsprechend größere Sollabstände ergeben /3/.

In den Abbildungen 3.10 und 3.11 sind die sich ergebenden Sicherheitsabstände geschwindigkeitsabhängig dargestellt.

3.3 Fahrprofile

Neben den Strategien der Folgefahrzeuge waren auch die Fahrtverläufe des Führungsfahrzeuges determiniert. Da davon ausgegangen werden mußte, daß das Verhalten der Kolonne wesentlich durch den Fahrtverlauf des ersten Fahrzeugs bestimmt wird, wurden an dessen Fahrprofile unterschiedliche Forderungen gestellt. Zum einen sollten konstante Geschwindigkeiten vorgefahren werden, wie sie auf Autobahnen, Land- und Stadtstraßen vorkommen können. Des weiteren sollten die Fahrprofile aber auch Beschleunigungs- und Verzögerungsabschnitte enthalten, um die Auswirkungen dieser Störungen innerhalb der Kolonne aufzuzeigen.

Aus den genannten Forderungen resultierten die folgenden Fahrprofile (Abb. 3.12), die die Fahrer des Führungsfahrzeuges anzustreben hatten:

- Profil 1: konstante Geschwindigkeit von 50 km/h;
- Profil 2: konstante Geschwindigkeit von 80 km/h;
- Profil 3: konstante Geschwindigkeit von 100 km/h;
- Profil 4: Beschleunigung von 0 auf 80 km/h -
konstante Geschwindigkeit von 80 km/h
(ca. 800 m) -
Beschleunigung von 80 auf 120 km/h -
konstante Geschwindigkeit von 120 km/h
(ca. 800 m) -
Auslauf- bzw. Bremsverzögerung von
120 km/h bis 40 km/h -
konstante Geschwindigkeit von 40 km/h
(ca. 300 m) -

Profil 5: Beschleunigung von 0 auf 80 km/h -
ca. 200 m konstante Geschwindigkeit
von 80 km/h -
Auslauf- bzw. Bremsverzögerung bis
60 km/h
ca. 200 m konstante Geschwindigkeit
von 60 km/h -
Beschleunigung von 60 km/h auf 80 km/h
ca. 200 m konstante Geschwindigkeit
von 80 km/h
usw.

Das Führungsfahrzeug war mit einem Tempomat ausgerüstet, der bei wiederholtem Abfahren der gleichen Profile annähernd gleiche Wegabschnitte für die Beschleunigungen und Auslaufverzögerungen ermöglichte. Die Bremsverzögerungen sollten von den Fahrern des Führungsfahrzeuges über einen fest definierten Wegabschnitt, möglichst konstant und wiederholbar, selbst vollzogen werden.

3.4 Versuchsstrecke und Versuchsablauf

Um die Versuche unbeeinflusst von anderen Verkehrsteilnehmern durchführen zu können, wurde der Hockenheim-Ring als nicht-öffentliche Straße ausgewählt (Abb. 3.13). Auch sprachen Sicherheits- und Trassierungsgründe für diese Strecke.

Sieben Fahrzeuge, alle ausgerüstet mit Abstandswarnsystemen und Datenaufzeichnungsgeräten, nahmen an den Versuchen teil. Begrenzt durch die maximale Laufzeit der Kassetten (ca. 10 min bei einem Aufzeichnungstakt von 100 ms) wurden mit einer Strategieeinstellung je zwei Runden gefahren. Pro Runde wurde jeweils auf den geraden Streckenabschnitten A und B das gleiche Profil gefahren. Die Profile 4 und 5 enthielten auf dem Streckenabschnitt A die Auslaufverzögerungen und auf dem Streckenabschnitt B die Bremsverzögerungen. Die Profile 1, 2 und 3 wurden zusätzlich auch durch die Ostkurve gefahren. Die beiden Bremskurven in der Strecke wurden während der Versuche nicht befahren. Start und Ziel aller Fahrten war vor den Boxen.

Alle zwei Runden hielten die Fahrzeuge an. Dann wurden die Kassetten für die Datenaufzeichnung gewechselt und gegebenenfalls eine andere Strategie eingestellt. Danach wurde in neuer Fahrzeugreihenfolge wieder gestartet.

Vor den Versuchsfahrten haben die Fahrer der Folgefahrzeuge die folgenden Anweisungen erhalten:

1. Jeder Fahrer fährt in eigener Verantwortung.
2. Die pro Fahrt neu vorgegebene Fahrzeugreihenfolge muß eingehalten werden; das heißt, hintereinander fahren, ohne zu überholen.
3. Das Fahrverhalten ist möglichst an der Abstandsanzeige zu orientieren; das heißt, jeder Fahrer soll versuchen , immer möglichst genau im Sicherheitsabstand (gelber Bereich) dem Vorausfahrenden zu folgen.

Die Versuche wurden am 15. September 1979 unter trockenen und warmen Witterungsverhältnissen im Rahmen der Felderprobung durchgeführt. Es wurden insgesamt 18 Fahrten à 2 Runden gefahren. Der gesamte Versuchsumfang (Strategien, Profile, Fahrzeugreihenfolge) ist Abbildung 3.14 zu entnehmen.

3.5 Ausgangsdaten und deren Fehler

Aufgrund der Datenaufbereitung für die Felderprobung /3/ lagen dieser Arbeit die Meßergebnisse entsprechend Abbildung 3.15 vor. Diese Werte sind zu 1-s-Intervallen aggregiert und auf Plausibilität geprüft; fehlende kurze Aufzeichnungen (maximal 5 s) sind durch Interpolation ergänzt; die aufgezeichneten Geschwindigkeiten der Folgefahrzeuge sind an der Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs geeicht (Abb. 3.16).

Die vorliegenden Daten sind mit Meßfehlern behaftet. Von den AWS-Herstellern wurden die folgenden absoluten Genauigkeitsangaben gemacht:

Meßwert x	gemessen in	Genauigkeit
Geschwindigkeit v	(km/h)	±1 km/h (=0,278 m/s)
Geschwindigkeitsdifferenz Δv	(km/h)	±2 km/h (=0,556 m/s)
Istabstand Δx	(m)	±2,5 m

Aufgrund dieser absoluten Angaben lassen sich die relativen Fehlerschranken angeben. *)

*) In der Fehler- und Ausgleichsrechnung /32/ entspricht der Meßwert x, dessen wahre Größe unbekannt ist, dem Näherungswert α_x , und $\Delta\alpha_x$ entspricht der Schranke δ für den absoluten Fehler von α_x . Damit errechnen sich die relativen Fehlerschranken wie folgt:

$$x = \alpha_x \pm (\delta \cdot 100\%) = \alpha_x + \left(\left| \frac{\Delta\alpha_x}{\alpha_x} \right| \cdot 100\% \right)$$

$$v = \alpha_v \pm \left(\left| \frac{\Delta \alpha_v}{\alpha_v} \right| \cdot 100\% \right)$$

$$\Delta v = \alpha_{\Delta v} \pm \left(\left| \frac{\Delta \alpha_{\Delta v}}{\alpha_{\Delta v}} \right| \cdot 100\% \right)$$

$$\Delta x = \alpha_{\Delta x} \pm \left(\left| \frac{\Delta \alpha_{\Delta x}}{\alpha_{\Delta x}} \right| \cdot 100\% \right) .$$

In der Abbildung 3.17 sind die relativen Fehler-schranken in Abhängigkeit von den drei Meßgrößen dargestellt. Mit wachsendem Wert der jeweiligen Meßgröße fallen die relativen Fehlerschranken, d.h. die Meßgrößen sind umso genauer, je größer sie vom Betrag her werden. Die Genauigkeiten der einzelnen Größen sind jedoch stark unterschiedlich; besonders wenn man die "relevanten" Bereiche bei Kolonnenfahrten betrachtet (die "relevanten" Bereiche beinhalten die Meßwertgrößen, die vornehmlich bei Kolonnenverkehr zu erwarten sind). Bei den Eigengeschwindigkeiten liegen die Fehlerschranken am niedrigsten; ab 40 km/h sind nur noch relative Fehler kleiner 2,25% möglich. Bei den Abständen wird diese Grenze erst ab 100 m erreicht. Der "relevante" Abstandsbereich enthält jedoch auch weit kleinere Abstände, so daß die Fehler dort entsprechend größer werden können; zum Beispiel ist bei 20 m die Fehlerschranke mit 12,5% angegeben.

Die größten Ungenauigkeiten sind bei den Geschwindigkeitsdifferenzen zu verzeichnen. Hier liegen die Fehlerschranken im relevanten Bereich zwischen 33% und 100%.

Die Fehlerschranken allein reichen jedoch nicht aus, um über die Güte der Messungen zu befinden. Hierzu müßten zusätzlich die Fehlerverteilungen bekannt sein. Da hierüber keine Angaben gemacht wurden, wird eine Gaußverteilung unterstellt.

Mit Hilfe der Ausgleichsrechnung für direkte Messungen gleicher Präzision (siehe Anhang 2) ergeben sich aus dem Schätzwert

$$\hat{y} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \bar{a}$$

die mittleren Fehler m (beziehungsweise m_{rel}) der Einzelmessungen zu

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1} \quad \text{beziehungsweise}$$

$$m_{\text{rel}} = \frac{m}{\bar{a}}$$

Abbildung 3.18 zeigt die mittleren relativen Fehler m_{rel} in Abhängigkeit ihrer Meßgrößen. Die Genauigkeitsgüte ist immer noch sehr unterschiedlich, und sie genügt den hier gestellten Anforderungen nur teilweise. Bei einem mittleren Fehler von 5 % als Maximalwert ergibt sich, daß die Abstände unter 10 m nicht berücksichtigt werden können. Die Meßwerte der Differenzgeschwindigkeit sind praktisch für Auswertungszwecke nicht oder bestenfalls zur qualitativen Veranschaulichung gewisser Verhaltensweisen geeignet.

4. Auswertungen und Ergebnisse

Das vorrangige Ziel der Auswertungen ist es, das Folgeverhalten und deren Auswirkungen zu beschreiben. Dies geschieht auf zwei Ebenen.

In Kapitel 4.1 'Allgemeine Auswertungen' werden Beurteilungskriterien für das Folge- und Stabilitätsverhalten direkt über die vorhandenen Meßwerte ermittelt, dargestellt und interpretiert.

In den nachfolgenden Kapiteln (4.2 und 4.3) wird versucht, ein deterministisches Modell - die allgemeine Fahrzeugfolgegleichung - zu eichen, um dann, mit den Ergebnissen und den Meßdaten, Folgevorgänge zu beschreiben und Verhaltensweisen darzustellen, zu vergleichen und zu analysieren.

4.1 Allgemeine Auswertungen

4.1.1 Ganglinien von Geschwindigkeiten und Abständen

Die Ganglinien der Geschwindigkeiten ergeben sich aus den am Führungsfahrzeug normierten Meßwerten der Geschwindigkeit eines jeden Fahrzeugs (siehe auch Abb. 3.16) zusammen mit den Zeitwerten. In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind beispielhaft für jedes Fahrprofil die sich überlagernden Geschwindigkeitganglinien der Kolonnenfahrzeuge dargestellt. Es ist erkennbar, daß die Folgefahrzeuge dem Führungsfahrzeug zeitversetzt nachfahren und die Geschwindigkeiten dabei mehr oder weniger stark um die Geschwindigkeit des ersten Fahrzeugs schwanken. Bei allen markanten Punkten (Profil 4 und 5) der Geschwindigkeitsänderung des Führungsfahrzeugs wird ein Überschwingen der Geschwindigkeiten der Folgefahrzeuge registriert; d.h., die Folgefahrzeuge einer (aus mindestens sieben Fahrzeugen bestehenden) Kolonne reagieren in ihrem Geschwindigkeitsverhalten - in bezug auf den Kolonnenführer - in diesen Fällen offensichtlich ungedämpft.

Aus den Ganglinien der Nettoabstände zum jeweils Vorausfahrenden (Abb. 4.3 und 4.4) ist erkennbar, wie sich die Abstände ebenfalls zeitversetzt ändern. Die Abstandsvergrößerungen infolge ansteigender Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs wachsen dabei langsamer durch die Kolonne als die Abstandsreduzierungen, die durch eine geringer werdende Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs notwendig werden (zum Beispiel in Abb. 4.3 bei Strategie B - Profil 4A - Fahrt 17).

Die kumulierten Abstände (Abb. 4.5 und 4.6) spiegeln die geschwindigkeitsabhängigen Kolonnenlängen wieder. Auch sind Strategieeinflüsse erkennbar; deutlich sind die größeren Kolonnenlängen bei den Fahrten mit der Forderung nach größeren Sollabständen (Strategie C) zu sehen. Dieser Sachverhalt läßt auch den möglichen Einfluß der Strategie auf die Leistungsfähigkeit einer Strecke erkennen.

4.1.2 Abstandsverhalten

Die Einhaltung der Abstände durch die Fahrer ist beispielhaft in Abbildung 4.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Fahrzeugführer offensichtlich in der Lage sind, ihr Abstandsverhalten weitgehend an den vorgegebenen Strategien A, B und C zu orientieren; die eingezeichneten Abstandsgrenzkurven für $\Delta v=0$ verdeutlichen dies.

Gleichzeitig kann man sehen, daß mit zunehmendem strategieabhängigem Abstand die Grenzabstände häufiger unterschritten werden. Während bei der Einstellung A noch verhältnismäßig wenige Abstände unter der Grenzkurve liegen, sind es bei B schon einige Meßpunkte mehr und bei C schließlich deutlich mehr. Die Bereitschaft und/oder das Können der Fahrer, strategieabhängige Sollabstände nicht zu unterschreiten, sinkt also, je größer die geforderten Abstände werden. Dieses Verhalten geben die Grafiken von Abbildung 4.8 noch klarer wieder, in denen die Differenz zwischen Ist- und Sollabstand über der Eigengeschwindigkeit aufgetragen ist. Während die mittleren Geschwindigkeiten der drei Beispiele durchaus auf gleichem Niveau liegen ($\bar{v}_A=18,1$ m/s; $\bar{v}_B=17,4$ m/s; $\bar{v}_C=17,9$ m/s), zeigen die mittleren Abstandsdifferenzen - Istabstand minus Sollabstand - doch eine klare Strategieabhängigkeit (A: 16,3 m; B: 12,2 m; C: 7,0 m).

Das dynamische Abstandsverhalten ist in den Abbildungen 4.9 bis 4.11 beispielhaft zu erkennen. Die $\Delta x-\Delta v$ -Diagramme (Abb. 4.9) zeigen, wie sich die Ab-

stände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz zum jeweils Vorausfahrenden ändern.*)

Die negativen Geschwindigkeitsdifferenzen entsprechen Schließvorgängen ($\Delta v = v_n - v_{n+1} < 0$), denen in der Kolonne ab bestimmten Aktionspunkten (Fahrerreaktion) Öffnungsvorgänge ($\Delta v = v_n - v_{n+1} > 0$), folgen. Das Abwechseln zwischen Öffnen und Schließen vollzieht sich bei Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen ca. +3 und -3 m/s. Bei geringeren Abständen werden die Geschwindigkeitsdifferenzen absolut auch geringer.

Des weiteren lassen sich mit einer zeitabhängigen Darstellung der Abstände über die Geschwindigkeit Hystereseeffekte im Fahrverhalten zeigen (Abb. 4.10 und 4.11). Bedingt durch die Reaktionszeit des Fahrers und die physikalische Umsetzung im Fahrzeug ist das dynamische Abstandsverhalten abhängig von der Art des Folgevorganges. Da die Fahrer-Fahrzeug-Reaktion zeitversetzt erfolgt, wird bei Verzögerungen des Vorausfahrenden mit geringeren geschwindigkeitsabhängigen Abständen gefahren als während der Beschleunigungsvorgänge. Damit ist unter anderem erklärbar, daß in der Arbeit von HOEFS /25/ für Öffnungs- und Schließvorgänge unterschiedliche Parameter m und l in der Fahrzeugfolgegleichung ermittelt wurden.

Unterschreitungen des Sollabstandes finden (bei einer Betrachtungsweise über konstante Zeitschritte) hauptsächlich bei Schließvorgängen statt; in Zeiten des

*) Von diesen Δx - Δv -Beziehungen gehen die Modellannahmen von TODOSTEV /12/ und WIEDEMANN /13/ aus; dabei stellen die Wendepunkte der Geschwindigkeitsdifferenzänderungen die Wahrnehmungsschwellen des Fahrzeugführers dar.

Öffnens wird der kritische Abstand selten unterschritten (Abb. 4.12). Auch hier zeigt sich wieder eine klare Strategieabhängigkeit. Während der Anteil der Schließvorgänge, bei denen der Sollabstand unterschritten wird, noch bei der Einstellung A sehr gering ist (13%), nimmt er bei Strategie B zu (26%) und ist bei Strategie C nahezu gleichgewichtig (49%) mit Schließvorgängen ohne Überschreitung des Sicherheitsabstandes.

4.1.3 Variationskoeffizient der Geschwindigkeit und Beschleunigungsrauschen

Erste Beurteilungshinweise für Störungsauswirkungen innerhalb einer Kolonne können die Streuungsparameter der Geschwindigkeiten beziehungsweise der Beschleunigungen der einzelnen Fahrzeuge während einer Fahrt geben. Ein durch die Kolonne (von Fahrzeug 1 zu Fahrzeug n) anwachsender Streuungsparameter bedeutet eine von Fahrzeug zu Fahrzeug zunehmende Amplitude dieses Parameters und damit die Zunahme von Störungen. Als Maßzahlen wurden hier der Variationskoeffizient der Geschwindigkeit V sowie das Beschleunigungsrauschen ACN (engl.: 'Acceleration Noise') der Fahrzeuge gewählt.

Der Variationskoeffizient V ist die auf den Mittelwert relativierte Standardabweichung der Geschwindigkeit eines Einzelfahrzeugs:

$$V = \frac{s}{\bar{v}} \cdot 100 (\%)$$

$$\text{mit } s^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n v_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n v_i \right)^2 \right)$$

$$\text{und } \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i,$$

wobei v_i = i'ter Meßwert der Eigengeschwindigkeit

und n = Anzahl der Meßwerte.

Mit einem von Fahrzeug zu Fahrzeug wachsenden Variationskoeffizienten streuen die Eigengeschwindigkeiten stärker. Die Kolonne ist dann instabil, da die Zunahme dieses Parameters - bei genügend langer Kolonne - unvermeidlich zu einem Stillstand oder Auffahrunfall führt.

Der Wert des Beschleunigungsrauschens ist definiert als die Standardabweichung der Längsbeschleunigungen eines Fahrzeugs während der Fahrt /28/:

$$ACN = \left(\frac{1}{T} \int_0^T (b(t) - \bar{b}(t))^2 dt \right)^{1/2}$$

Bei einer zeitbezogenen Betrachtung und unter Berücksichtigung diskreter Meßwerte ergibt sich das Beschleunigungsrauschen zu (siehe auch Anhang 3):

$$ACN = \left(\frac{\Delta t}{T} \sum_{i=0}^m \left(\frac{\Delta v_i}{\Delta t} \right)^2 - \left(\frac{v_E - v_A}{T} \right)^2 \right)^{1/2}$$

mit T = gesamte Fahrzeit

Δt = Dauer eines Zeitintervalls

m = Anzahl der Zeitintervalle

Δv_i = Geschwindigkeitsänderung im Intervall i

v_A = Geschwindigkeit bei Fahrtanfang

v_E = Geschwindigkeit bei Fahrtende.

Der Verwendung des Beschleunigungsrauschens als Stabilitätskenngröße liegt folgende Überlegung zugrunde: *) Jedes Fahrzeug unterliegt einem ständigen Wechsel zwischen positiven und negativen Beschleunigungen, das man als "Rauschen" bezeichnen kann. Jedes Einzelfahrzeug kann nun als Rauschquelle betrachtet werden. In einer Kolonne pflanzt sich dieses Rauschen fort. Jedes Folgefahrzeug hat demnach Eigenrauschen und übertragenes Rauschen. Nimmt nun das Gesamtrauschen (= eigenes + übertragenes Rauschen) von Fahrzeug zu Fahrzeug nicht zu, dann verhält sich die Kolonne stabil /29/.

Für jedes Kolonnenfahrzeug und jedes Teilprofil wurden die Kenngrößen V und ACN ermittelt und Diagramme entsprechend Abbildung 4.13 ausgegeben. Die Ergebnisse aller Fahrten sind in einer Tabelle (Abb. 4.14) dargestellt.

Eine strategieunterscheidende Darstellung der Maßzahlen V und ACN geben die Abbildung 4.15 und 4.16 wieder. Man erkennt bei jedem Kolonnenfahrzeug lediglich einen großen Streubereich dieser Stabilitätsindikatoren. Die Streuung rührt jedoch wesentlich von den verschiedenen Fahrprofilen, die sich ja durch unterschiedliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auszeichnen.

Zusätzlich wurden deshalb die Ergebnisse nun noch den jeweiligen Profilen zugeordnet und für jedes Fahrzeug die Mittelwerte der Maßzahlen aller profilgleicher Fahrten gebildet. Die Mittelwertbildung scheint aus

*) Beschleunigungsrauschen kann auch als qualitätsbeschreibende Größe verwendet werden. Hohes Rauschen bedeutet eine schlechtere Fahrtqualität für den Fahrer als niedriges, da der Fahrtverlauf durch häufiger wechselnde bzw. stärkere positive und negative Beschleunigungen geprägt ist.

zwei Gründen angebracht und zulässig:

- Unter der Annahme, daß das Folgeverhalten wesentlich vom Führungsfahrzeug bestimmt wird, dürfen sich die mehrfach gefahrenen Profile dieses Fahrzeugs nicht wesentlich unterscheiden. Ein quantitativer Vergleich der Führungsprofile ist im Anhang 4 erläutert. Da diese Abweichungen relativ gering sind (zwischen 1,8 und 6,9%) können die Führungsprofile als praktisch identisch betrachtet werden (Abb. 4.17 und 4.18).

- Durch die Mittelwertbildung können Meßwertausreißer, die von einzelnen Fahrern mit extremem Fahrverhalten herrühren, ausgeglichen werden.

Die mittleren Abweichungen der Variationskoeffizienten der Folgefahrzeuge bezogen auf das Führungsfahrzeug sind in Abbildung 4.19 strategie- und profilunterscheidend dargestellt.

Bei den konstanten Profilen 1, 2 und 3 nimmt der Variationskoeffizient von Fahrzeug zu Fahrzeug zu; der Zusammenhang mit der jeweiligen Fahrzeugposition ist weitgehend linear und ohne einen ausgeprägten Einfluß auf die Strategieeinstellung. Bei konstanten Geschwindigkeiten des Führungsfahrzeugs ist also - bei einer Kolonne dieser Größe - ein Anwachsen der Geschwindigkeitsamplituden zu verzeichnen, und damit ist die Wahrscheinlichkeit für instabiles Verhalten von Fahrzeug zu Fahrzeug größer.

Bei den nicht konstanten Fahrprofilen 4 und 5 ergibt sich ein grundsätzlich anderes Bild. Mit Ausnahme von Profil 4B^{*)} stabilisiert sich hier die Zunahme von Variationskoeffizienten in der Regel ab dem dritten beziehungsweise dem vierten Kolonnenfahrzeug; zum Teil nehmen die Koeffizienten mit den weiteren Fahrzeugpositionen auch wieder ab. Des Weiteren zeigen die unterschiedlichen Strategieeinstellungen durchaus einsichtige Ergebnisse. Offensichtlich werden (insbesondere bei den Profilen 4A und 5A) mit der Einstellung C die Störungen des Führungsfahrzeugs am stärksten gedämpft und mit der Strategie A am schwächsten. Ein strategieabhängiger Stabilitätseinfluß scheint gegeben. Bei größeren Sicherheitsabständen (Einstellung C) werden die Störungen des Führungsfahrzeugs von den Folgefahrzeugen eher gedämpft als bei geforderten kleinen Abständen (Einstellung A).

Grundsätzlich ähnliche Interpretationen sind aus dem mittleren Beschleunigungsrauschen der Kolonnenfahrzeuge abzuleiten (Abb. 4.20). Mit steigender Kolonnenposition nimmt das Beschleunigungsrauschen zu, was von Fahrzeug zu Fahrzeug anwachsenden Beschleunigungsamplituden entspricht. Ein (statistisch nicht abzu-

*) Die ab dem 1. Folgefahrzeug sinkenden Variationskoeffizienten sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die folgende Systematik im Versuchsprogramm zurückzuführen: das Profil 4B wurde immer auf der zweiten Streckenhälfte, also von der Ostkurve bis zur Einfahrt ins Motodrom, gefahren. Es wurde kurz vor dem Motodrom mit einer Bremsverzögerung aus ca. 100 km/h von dem Führungsfahrzeug beendet. Im Gegensatz zu allen anderen Profilen konnten die Fahrer der Folgefahrzeuge mit einer starken Verzögerung des Führungsfahrzeugs rechnen, da der Streckenverlauf unbedingt eine Geschwindigkeitsreduzierung verlangt. Dieses kalkulierbare Verhalten des ersten Fahrzeugs hat die Folgefahrer offenbar so beeinflusst, daß sie - zumindest im letzten Profilabschnitt - ihr eigenes Fahren und Sicherheitsbedürfnis höher einschätzen als die Strategievorschrift. Mit den überwiegend kürzeren Alamdauern bei Profil 4B gegenüber 4A kann diese Interpretation untermauert werden.

sichernder) Strategieeinfluß scheint auch hier sichtbar: mit größer werdenden Sollabständen wird das Beschleunigungsrauschen mit wachsender Fahrzeugposition stärker gedämpft.

Bezüglich der vorausgegangenen Abschnitte (4.1.1 - 4.1.3) sind die folgenden Punkte festzuhalten:

- Die Fahrer der Folgefahrzeuge sind grundsätzlich in der Lage, ihr Fahrverhalten an der vorgeschriebenen Strategie dahingehend zu orientieren, daß die Sollabstände zum überwiegenden Teil nicht unterschritten werden.
- Das Können und/oder die Bereitschaft der Fahrer, die Sollabstände einzuhalten ist umso geringer, je größer der geforderte Abstand (der drei getesteten Einstellungen) ist.
- Der überwiegende zeitliche Anteil, währenddessen die Sollabstände unterschritten werden, entspricht dem Folgevorgang "schließen".
- Das Geschwindigkeitsverhalten der Folgefahrzeuge ist bei deutlichen Geschwindigkeitsänderungen des Führungsfahrzeugs im allgemeinen ungedämpft (bezogen auf das Führungsfahrzeug).

4.2 Optimierung der Fahrzeugfolgegleichung

Im Gegensatz zu Fahrten ohne Abstandswarnsysteme steht den Fahrern mit dieser Einrichtung nun zusätzlich die kontinuierliche Information über ihren genauen Abstand sowie dessen Zu- und Abnahme zur Verfügung. Grundsätzlich hat sich an den Größen, die in die Fahrzeugfolgegleichung eingehen (Abstand, Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsdifferenz), dadurch nichts geändert. Die Annahme, auch Folgevorgänge von Fahrzeugen mit AWS lassen sich mit Hilfe der allgemeinen Fahrzeugfolgegleichung ausreichend genau beschreiben, scheint deshalb zulässig. Sämtliche Fahrten wurden daraufhin untersucht.

Für jede Teilfahrt und für jedes Folgefahrzeug wurden die Parameter l , m , τ und λ so lange variiert, bis die errechneten Beschleunigungswerte von den tatsächlich aufgetretenen Werten die geringste Abweichung auswiesen.

Zur Bewältigung dieser umfangreichen Optimierungsrechnung wurde das Benutzerprogramm MINUIT^{*)} des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe gewählt. Die vorliegende Version gestattet die Eingabe von maximal 15 variablen Parametern der zu minimalisierenden Funktion. Für jeden Parameter muß ein Anfangswert und eine Schrittweite angegeben werden. Daneben können noch Grenzen für die Parameter festgelegt werden. Diese Grenzen sind nicht zwingend notwendig, sie haben jedoch den Vorteil einer deutlichen Rechenzeitreduzierung.

*) MINUIT ist ein Programmsystem von mehreren Fortran-Routinen zur Minimalisierung einer Funktion mit mehreren Parametern. Es eignet sich besonders zum Anpassen von Kurven an gegebene Meßwerte. Hierbei ist die zu minimalisierende Funktion eine Chi-Quadrat-Funktion oder der negative Logarithmus einer Likelihoodfunktion. Das verwendete Verfahren beruht auf einem Simplexalgorithmus, dessen Vorteil es ist, selbst dann ein Minimum zu finden, wenn man noch weit davon entfernt ist (nähere Angaben siehe 'Computer Journal' Nr.7, 1964/65).

4.2.1 Parameterschranken und zeitliche Fahrt- abgrenzung

Unter Berücksichtigung der gefundenen Parameterwerte früherer Untersuchungen /30/, /18/, /19/, /25/ sowie aus wirtschaftlichen Überlegungen bezüglich der benötigten Rechenzeiten und Datenspeicher wurden die Parameter der Fahrzeugfolgegleichung innerhalb folgender Schranken und mit nebenstehenden Schrittweiten variiert:

Parameter	untere Schranke	obere Schranke	Anfangsschrittweite
l	0	3,0	0,1
m	0	3,0	0,1
τ	0	3,0	0,1
$\lambda_{1,m}$	0	2,0	0,1

Um die Vergleichbarkeit einzelner Teilfahrten (Profile) mit unterschiedlichen Strategien zu gewährleisten, wurden die Zeiten für die Optimierung profilbezogen abgegrenzt (Abb. 4.21):

Profile 1, 2, 3:

Erst nachdem auch das Folgefahrzeug $n+1$ die Ausgangsgeschwindigkeit v_a des konstanten Geschwindigkeitsprofils des Vorausfahrenden erreicht hat, beginnt die Optimierung zum Zeitpunkt t_a . Sie endet dann, wenn Fahrzeug n seine Geschwindigkeit wieder zu reduzieren beginnt (Zeitpunkt t_e).

Profil 4:

Der Zeitraum der Optimierung beginnt wieder, nachdem auch das Folgefahrzeug $n+1$ die Ausgangsgeschwindigkeit v_a erreicht hat zum Zeitpunkt t_a ; er endet, wenn das vorausfahrende Fahrzeug n seine Verzögerung am Profilende abgeschlossen hat zum Zeitpunkt t_e .

Profil 5:

Die Festsetzung der Anfangszeit t_a erfolgt analog den Profilen 1-4. Das Ende der Optimierungszeit ist dann gegeben, wenn das vorausfahrende Fahrzeug die Verzögerungsphasen innerhalb des Sägezahnprofils dreimal durchfahren hat.

4.2.2 Gütekriterium Restabweichung

Man muß davon ausgehen, daß das Folgeverhalten einzelner Fahrer-Fahrzeug-Systeme durch eine Gleichung prinzipiell nur angenähert werden kann; das heißt, kein noch so komplexer deterministischer Modellansatz ist in der Lage, das Folgeverhalten exakt zu beschreiben. Es lassen sich jedoch Aussagen über die Qualität des Modells dahingehend machen, indem man den stochastischen Einfluß quantifiziert.

Zur Beurteilung der Güte der angenäherten Funktion an die tatsächliche Meßreihe wird die Restabweichung R gewählt. Letztlich erlaubt sie eine Angabe darüber, wie gut die gefundenen Parameter der Fahrzeugfolgegleichung den tatsächlichen Folgeverlauf beschreiben können:

Optimum = minimale Restabweichung

$$= \text{Min} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=0}^T (b_{n+1, \text{ber}}(t) - b_{n+1, \text{real}}(t))^2}$$

mit: n = Anzahl der Zeitintervalle innerhalb der Optimierungszeit T ($n=T/\Delta t$)

und

$$b_{n+1, \text{ber}}(t) = \frac{\lambda_{1,m} (v_{n+1}(t))^m}{(\Delta x_{\text{ist}}(t-\tau))^l} \cdot (v_n(t-\tau) - v_{n+1}(t-\tau))$$

sowie

$$b_{n+1_real}(t) = \frac{v_{n+1}(t-1/2\Delta t) + v_{n+1}(t+1/2\Delta t)}{2\Delta t}$$

Die Abbildungen 4.22 und 4.23 zeigen strategieunterteilt die absoluten und relativen Häufigkeitsverteilungen der Restabweichungen aller Optimierungsläufe. Es ergeben sich Häufungen bei ca. 0,3 m/s².

Theoretisch kann die Restabweichung als der Fahrtanteil erklärt werden, der vom Eigenrauschen bestimmt wird; wobei mit Eigenrauschen die Bewegungsänderungen (über der Zeit) des Fahrer-Fahrzeug-Systems gemeint sind, die von ihm, unbeeinflusst vom Vorausfahrenden und unwillkürlich, vollzogen werden. Nach HOEFS und MONTROLL liegt der Wert des Eigenrauschens zwischen 0,05 und 0,4 m/s². Definiert man den Wert 0,4 m/s² als maximale Grenze, so zeigen die Häufigkeitsverteilungen, daß nicht alle Folgefahrten ausreichend genau durch die Fahrzeugfolgegleichung beschreibbar sind.

Eine strategieunterteilte Aufstellung ergibt folgendes Bild:

Anteil der Versuchsfahrten (%)				mit
Strat. A	Strat. B	Strat. C	Strat. D	
67	59	51	77	R ≤ 0,4 m/s ²
33	41	49	23	R > 0,4 m/s ²

Nach diesem Kriterium lassen sich die Fahrten ohne Warninformation (Strategie D) am häufigsten durch die Fahrzeugfolgegleichung beschreiben (77%). Bei den Fahrten mit Warninformation ist eine Strategieabhängigkeit ersichtlich. In der Reihenfolge A, B, C eignet sich danach der Modellansatz weniger gut zur Folgevorgangsbeschreibung. Dies würde bedeuten, je kürzer die dem Fahrer abverlangten Sollabstände sind, desto besser ist sein Fahrverhalten durch die Fahrzeugfolgegleichung beschreibbar.

Diese Strategievergleiche sind jedoch nur sehr bedingt zulässig, da die Grundgesamtheiten (die Anzahl der Führungsprofile bei den jeweiligen Strategieeinstellungen) nicht identisch sind (z.B. Profil 5 bei Strategie C 8 mal und bei Strategie A 17 mal).

Die unterschiedlichen Profile lassen sich durch das Beschleunigungsrauschen ACN klassifizieren. Trägt man nun die Restabweichungen je Fahrt über das Beschleunigungsrauschen auf (Abb. 4.24), so kann man erkennen, daß die Güte bei der Beschreibung von Folgevorgängen durch die Fahrzeugfolgegleichung von den Strategieeinstellungen weitgehend unabhängig ist. Vielmehr spielt bei der Qualitätsbeurteilung des Modellansatzes das eigene (bedingt durch den Vordermann) Beschleunigungsrauschen eine Rolle. Je geringer das Beschleunigungsrauschen ist, desto genauer ist der Folgevorgang durch den Modellansatz beschreibbar.

Bei allen weiteren Untersuchungen werden aufgrund der obengenannten Ausführungen nur noch die Folgevorgänge betrachtet, die das Gütekriterium $R \leq 0,4$ m/s² erfüllen. Diese Grenze ist willkürlich; sie

stellt jedoch einen sinnvollen Kompromiß zwischen der vorhandenen Datenmenge und den von HOEFS und MONTROLL gefundenen Werten für das Eigenrauschen dar.

4.2.3 Abhängigkeiten der Parameter der Fahrzeug- folgegleichung

Es wurde vermutet, daß sich bei den Parametern Abhängigkeiten bezüglich der unterschiedlichen Versuchsmerkmale zeigen würden. Demzufolge wurden die ermittelten Werte der Parameter l , m , τ und λ den folgenden Versuchsmerkmalen gegenübergestellt:

- Strategieeinstellung
- Fahrzeugposition in der Kolonne
- Fahrer
- Fahrzeug
- Anzeigenverwirklichung/Informationstransfer
- Profil des Führungsfahrzeuges/ACN.

Die obengenannte Vermutung konnte bei keinem der untersuchten Merkmale signifikant bestätigt werden. Im einzelnen ergaben sich die nachstehenden Ergebnisse.

4.2.3.1 Parameter in Abhängigkeit von der Strategie- einstellung

Die Häufigkeitsverteilungen der Parameter lassen auf keine Abhängigkeiten bezüglich der getesteten Strategieeinstellungen schließen (Abb. 4.25 bis 4.29). Die Werte von l und m häufen sich generell zwischen 1,0 und 1,5 für l (64%) und 1,0 und 1,2 für m (66%).

Trägt man die Parameter entsprechend Abbildung 4.27 auf, erkennt man, daß ca. 85% der ermittelten l - m -Kombinationen rechts der Winkelhalbierenden im sogenannten realistischen Bereich (siehe /26/, Seite 59) liegen. Dies bedeutet, daß die Form des aus diesen Parameterkombinationen ableitbaren Fundamentaldiagramms mindestens folgende Eigenschaften aufweist: der Kurvenverlauf beginnt im Punkt $q=0/k=0$, erreicht mit wachsendem k ein Maximum bei q_{\max} , um danach mit weiter steigendem k wieder gegen $q=0$ zu streben. Aus den wenigen Wertepaaren links der Winkelhalbierenden ließen sich nur sehr unrealistische Fundamentaldiagramme oder nur Teilbereiche derselben konstruieren.

Auch die Parameter τ und λ lassen keine Strategieabhängigkeiten erkennen. Während sich der Reaktionszeitparameter τ durch einen relativ großen Streubereich auszeichnet (zwischen 1 und 2,8 s), weisen die Werte des Proportionalitätsfaktors bei allen Strategien eine Häufung bei ca. $\lambda_{1,m} = 1$ auf (52% zwischen 0,8 und 1,2).

4.2.3.2 Parameter in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition in der Kolonne

Nimmt man an, daß die Fahrzeugführer ihr Abstandsverhalten nicht allein durch die Warninformation regeln, sondern auch zusätzlich durch die Position, die sie innerhalb einer Kolonne einnehmen, in ihrer Distanzwahl beeinflußt werden, so müßten die Größen der Parameter der Fahrzeugfolgegleichung von der jeweiligen Fahrzeugposition abhängen. Eine solche Verhaltensweise konnte jedoch nicht nachgewiesen werden (Abb. 4.30 bis 4.34). Weder eine strategieunterteilte, noch eine Gesamtbetrachtung läßt Abhängigkeiten in dieser Richtung erkennen.

Über das angewandte Fahrzeugfolgemodell kann die Vermutung, daß das Fahrverhalten mit Abstandswarnsystemen auch von der Anzahl vorausfahrender Fahrzeuge beeinflußt wird, somit nicht bestätigt werden.

4.2.3.3 Fahrerabhängige τ -Werte

Die unterschiedlichen Reaktions- und Umsetzzeiten der Fahrer werden in der Fahrzeugfolgegleichung durch den Parameter τ beschrieben. Von jedem Fahrzeug sind die Häufigkeitsverteilungen dieses Parameters in Abbildung 4.35 strategieunterscheidend dargestellt.

Erwartungsgemäß streuen die τ -Werte stark, da naturgemäß unterschiedliche Fahrer auch unterschiedliche Reaktions- und Umsetzzeiten haben und auch ein und derselbe Fahrer in seinen Reaktionen keine Konstanz aufweisen kann. Strategieabhängigkeiten des Parameters τ konnten nicht festgestellt werden. Bei allen Einstellungen liegen die mittleren Reaktions- und Umsetzzeiten der Fahrer zwischen 1,7 und 2,2 Sekunden.

4.2.3.4 Systemabhängige τ -Werte

Da sich die optischen Anzeigen und deren Anordnung in den Versuchsfahrzeugen unterschieden /27/ (siehe auch Kap. 3.1.1), konnte vermutet werden, daß sich dies auch auf die Fahrerreaktionszeiten auswirkte.

Um diese Annahme zu überprüfen, wurden die drei Systeme hinsichtlich ihrer

- Anzeigenintensität und
- Nähe zum Blickfeld

qualitativ beurteilt.*)

System Nr.	Intensität der Anzeige	Blickfeld-nähe	ordinales Gesamturteil
1	gut	sehr gut	gut - sehr gut
2	gut - befr.	gut	gut
3	gut	befr.	befr.

Die Erreichbarkeit der Abstandsinformation war demnach für den Fahrer bei System 1 am besten, gefolgt von System 2 und dann 3.

Die Verteilung der τ -Werte (Abb. 4.36) spiegeln das obige qualitative Ergebnis wieder. Es zeigt sich, daß mit System 1 die niedrigsten und mit System 3 die höchsten τ -Werte erreicht werden. Die Unterschiede sind jedoch nicht sehr groß.

*) Die Beurteilung bezieht sich lediglich auf die Anzeigenverwirklichung während der Versuche. Die Herstellerfirmen haben mittlerweile z.T. ihre Anzeigen und auch deren Anordnung geändert.

4.2.4 Festlegung der Parameter bei Kolonnenfahrten mit Abstandswarnsystemen

Aus der zugrundeliegenden Vielzahl von Optimierungsläufen erscheint es nun notwendig, allgemeingültige Parameterwerte zu benennen, die das Folgeverhalten für Fahrten mit Abstandswarnsystemen ausreichend genau beschreiben. Die Vorgabe dieser Parameter kann jedoch nur an der jeweils eingestellten Strategie orientiert sein, da alle anderen Einflußgrößen vorerst als unbekannt vorausgesetzt werden müssen (z.B. Profil bzw. Ganglinie des Vorausfahrenden) oder, wegen des fehlenden Nachweises von Abhängigkeiten, als nicht vorhanden betrachtet werden (z.B. Fahrzeugposition in der Kolonne). Von den gemittelten Parameterwerten (Abb. 4.37) jeder Strategieeinstellung sämtlicher Folgefahrten ist daher am ehesten zu erwarten, daß sie das Folgeverhalten am besten beschreiben werden. *) In den nachfolgenden Simulationsbeispielen werden diese Mittelwerte verwandt.

*) Die Auswirkungen der unterschiedlichen Parameterwerte werden in Kapitel 4.4 behandelt.

4.2.4.1 Programmbeschreibung

Zur Berechnung von Folgevorgängen wurde das Hauptprogramm FOLGE (Abb. 4.38) entwickelt. Neben mehreren Lese- und Zeichenunterprogrammen bildet das Unterprogramm FOBE (Abb. 4.39 und Anhang 5) das eigentliche Kernstück. Die Aufgaben von FOLGE beinhalten drei Schwerpunkte:

- Berechnung von Abständen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Folgefahrzeugen nach der Fahrzeugfolgegleichung;
- Vergleich der berechneten mit den tatsächlichen Werten;
- Zeichnen von Diagrammen.

Programmerläuterungen zu FOLGE

- I: - Eingabe der Anfangs- (TAS) und Endzeit (TES), der Fahrdauer des Führungsfahrzeugs sowie der Anzahl der zu berechnenden Folgefahrzeuge (AFF);

- II: - Eingabe nachstehender Größen für jedes Folgefahrzeug: Anfangsabstand $DX\emptyset$, Anfangsgeschwindigkeit $V\emptyset$, Parameter L, M, TAU und LAMDA;

- III: - Einlesen des Geschwindigkeitsverlaufs des Führungsfahrzeugs für die Fahrdauer $LFUE = TES - TAS + 1$;

- IV: - Unterprogramm FOBE:
- a: Programmvereinbarungen:
- Anzahl der Kolonnenfahrzeuge AF = AFF+1
 - Minimale Geschwindigkeit VMIN = $\emptyset,2$
 - Wegposition des letzten Kolonnenfahrzeugs
 $X\emptyset(AF) = \emptyset$
 - Zeitintervall ZI = $\emptyset,1$ Sekunden
 - Abstandssumme ASUM = \emptyset
- b: Berechnung der Startposition aller Fahrzeuge aus den Anfangsabständen;
- c: Unfall- (UF(I)) und Stillstandereignis (SST(I)) werden auf FALSE gesetzt;
- d: Berechnung von Beschleunigung und Weg des Führungsfahrzeugs für die gesamte Fahrt-dauer LFUE:
- $$B(I,1) = (V(I,1) - V(I-1,1))/ZI$$
- $$X(I,1) = X(I-1,1) + V(I-1,1)*ZI + B(I-1,1)*ZI*ZI*\emptyset.5$$
- e: Übernahme der Startgrößen τ , x und v des zu berechnenden Fahrzeugs FZ;
- f: Unfallereignis (UF(FZ)) oder Stillstandereignis (SST(FZ)) erfüllt (TRUE)?
Falls die Ereignisse erfüllt sind, wird die Geschwindigkeit (V(T,FZ)) des betreffenden Fahrzeugs FZ zum Zeitpunkt T sowie seine Beschleunigung B(T,FZ) zu Null gesetzt und die erreichte Wegposition X(T,FZ) beibehalten;

- g: Solange die aktuelle Zeit T des zu berechnenden Fahrzeugs noch kleiner/gleich der Summe der τ -Werte der vor ihm liegenden Fahrzeuge (AZEIT) ist, wird die Anfangsgeschwindigkeit beibehalten

$$V(T, FZ) = V\emptyset(FZ-1)$$

und der Weg

$$X(T, FZ) = X(T-1, FZ) + V(T-1, FZ) * ZI$$

sowie der Abstand

$$DX = X(T, FZ-1) - X(T, FZ)$$

danach berechnet;

- h: Erst wenn $T > AZEIT$ ist, wird die Geschwindigkeit, der Weg und der Abstand zum aktuellen Zeitpunkt mit den um eine Zeiteinheit (0,1 s) zurückliegenden Werten errechnet:

$$V(T, FZ) = V(T-1, FZ) + B(T-1, FZ) * ZI$$

$$X(T, FZ) = X(T-1, FZ) + V(T-1, FZ) * ZI \\ + B(T-1, FZ) * ZI * ZI * \emptyset.5$$

$$DX = X(T, FZ-1) - X(T, FZ);$$

- i: Überprüfung des Unfallkriteriums $DX < \emptyset$ und des Stillstandkriteriums $V(T, FZ) < VMIN$. Falls die Kriterien erfüllt sind, werden die entsprechenden Ereignisse gesetzt und das Programm bei f fortgesetzt;

- j: Beschleunigungsberechnung nach der Fahrzeugfolgegleichung:

$$B(T, FZ) = LAMDA(FZ-1) * ((V(T, FZ) ** M(FZ-1)) / \\ (X(T-ITAU, FZ-1) - X(T-ITAU, FZ)) \\ ** L(FZ-1)) * (V(T-ITAU, FZ-1) \\ - V(T-ITAU, FZ));$$

- k: Überprüfung von Beschleunigungsrestriktionen.*)
Falls $B(T, FZ) > 3.0$ wird $B(T, FZ) = 3.0$
bzw.
falls $B(T, FZ) < -9.0$ wird $B(T, FZ) = -9.0$
gesetzt.
Danach folgt der Rücksprung zum nächsten
Zeitintervall bzw. zum nächsten Fahrzeug;
- V: - Zeichnen der Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs und der berechneten Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs;
- VI: - Einlesen der aufgezeichneten Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs;
- VII: - Berechnung der mittleren quadratischen Abweichung zwischen aufgezeichneter und berechneter Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs;
- VIII: - Zeichnen der aufgezeichneten Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs.

*) Die Beschleunigungsgrenzen wurden von den Versuchsfahrzeugen nie erreicht. Da das Programm FOLGE jedoch auch für Simulationen von Folgevorgängen dient (siehe Kap. 4.4), wurden diese Grenzen eingebaut.

4.2.4.2 Ergebnisse der Programmläufe

Die beispielhaften Ergebnisse (Abb. 4.40 bis 4.44) lassen erkennen, daß das Folgeverhalten mit Hilfe der Fahrzeugfolgleichung und den gewählten Parameterwerten gut nachvollzogen werden kann. Die mittleren quadratischen Abweichungen liegen bei ca. 3 bis 5%. Sie hängen von den gewählten Parametern ab. Mit den fahrt optimalen individuellen Parametern (Abb. 4.40 und 4.42) liegen die Abweichungen um ca. 1% niedriger als bei den allgemein gültigen Parameterwerten (Abb. 4.41 und 4.43).

Die Einschwingvorgänge werden nicht gleich gut simuliert. Während nach Beschleunigungen das Überschwingen des Folgefahrzeugs in der Regel gut angenähert wird, unterliegen die berechneten Überschwingvorgänge nach Verzögerungen oftmals einer stärkeren Dämpfung als die tatsächlichen (Abb. 4.43). Dieses Verhalten rührt ebenfalls von den Parametern her; näheres hierzu folgt im Kapitel 4.4.2.

Bezüglich der vorausgegangenen Abschnitte 4.2.1 - 4.2.4 bleibt festzuhalten:

- Folgevorgänge von mit Abstandswarnsystemen ausgerüsteten Fahrzeugen sind durch die allgemeine Fahrzeugfolgleichung beschreibbar.
- Statistisch gesicherte Abhängigkeiten zwischen den gefundenen Parametern einerseits und den Versuchsmerkmalen (Strategieeinstellung, Fahrzeugposition in der Kolonne, Fahrer, Fahrzeug, Anzeigenverwirklichung) andererseits konnten nicht festgestellt werden.

- Mit Hilfe eines geeigneten Programms (FOLGE) und in Kenntnis des Fahrtverlaufs eines vorausfahrenden Fahrzeugs sowie der ermittelten Parameter läßt sich das Folgeverhalten von AWS-Fahrzeugen simulieren.

4.3 Stabilitätsuntersuchungen

4.3.1 Grenzkurven der Stabilität

Zusammen mit den optimalen Parametern l , m , τ und λ der Fahrzeugfolgegleichung und der Stabilitätsbedingung $\alpha \cdot \tau \leq 0.5$ lassen sich für jede Fahrt die Abstände $\Delta x = \Delta x_{\text{stab}}$ errechnen, die einem stabilen Folgevorgang entsprechen würden:

Die Ungleichung

$$\alpha \cdot \tau \leq 0.5$$

entspricht

$$\frac{\lambda_{l,m}(v(t))^m}{(\Delta x(t-\tau))^l} \cdot \tau \leq 0.5$$

und mit den optimalen Parametern

$$\frac{\lambda_{l,m}(v(t))^{m_{\text{opt}}}}{(\Delta x(t-\tau_{\text{opt}}))^{l_{\text{opt}}}} \tau_{\text{opt}} \leq 0.5$$

folgt durch die Umstellung

$$\Delta x(t-\tau) \geq (2 \cdot (v(t))^{m_{\text{opt}}} \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \lambda_{l,m_{\text{opt}}})^{1/l_{\text{opt}}}$$

Erfüllen die Abstände $\Delta x(t-\tau)$ diese Ungleichung, so gewährleisten sie einen stabilen Folgevorgang.

Setzt man

$$\Delta x(t-\tau) = \Delta x_{\text{stab}}(t-\tau),$$

so lassen sich damit Grenzkurven für stabile Abstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit darstellen.

Die Abbildung 4.45 zeigt die Grenzkurven der drei Strategieereinstellungen. Der unterschiedliche Verlauf ist klar zu erkennen; er ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Parameterkombinationen, die wiederum dem unterschiedlichen Fahrverhalten entsprechen.

Für alle drei Strategien liegen die Stabilitätsgrenzkurven über den Abstandsgrenzkurven (für Geschwindigkeitsdifferenzen bis 5 m/s). Des weiteren ist jedoch zu erkennen, daß die Abstände zwischen den Stabilitäts- und den Abstandsgrenzkurven unterschiedlich sind. Bei der Strategie A sind diese Differenzen deutlich größer als bei der Einstellung B und da wiederum größer als bei C (z.B. bei $v = 30$ m/s und $\Delta v = 5$ m/s ergibt sich bei A die Differenz von $\Delta_A = 15$ m, bei B erhält man $\Delta_B = 11$ m und bei C: $\Delta_C = 4$ m).

Da die gefahrenen Abstände im allgemeinen über den Sollabständen liegen (siehe Kap. 4.1.2), werden aller Wahrscheinlichkeit nach mit der Strategie C am häufigsten Abstände im stabilen Bereich erreicht. Dies ist eine Vermutung, die sich jedoch in den nächsten Kapiteln noch erhärten wird.

4.3.2 Ganglinien der Stabilität

Aussagen darüber, ob Folgefahrzeuge mit kritischen oder instabilen Abständen fahren, sind nur bei Betrachtungen über die Zeit sinnvoll, da nur so die Wechselwirkungen einzelner Kolonnenfahrzeuge untereinander feststellbar sind. Frühere Untersuchungen /16/, /25/, /26/, /31/ stellten in der Regel abschließend fest, daß ein bestimmter Anteil der beobachteten Folgefahrzeuge mit kritischen oder instabilen Abständen fährt. Im Gegensatz dazu gestatten die vorliegenden Meßdaten kontinuierliche Beobachtungen über die Zeit und ermöglichen so die Aufstellung von Stabilitätsganglinien. Des weiteren können von jedem Fahrzeug die zeitlichen Fahrtanteile, in denen mit stabilen bzw. instabilen Abständen gefahren wurde, ermittelt werden.

Mit der Stabilitätsbedingung

$$2\alpha\tau \leq 1$$

können mit den optimalen Parametern der Fahrzeugfolgegleichung nun zu jedem Zeitpunkt die $2\alpha\tau$ -Werte errechnet werden:

$$2\alpha\tau(t) = 2 \cdot \frac{\lambda_{1,m_{opt}} \cdot (v(t))^{m_{opt}}}{(\Delta x(t-\tau_{opt}))^{l_{opt}}} \cdot \tau_{opt}$$

Das heißt, zu jedem Zeitpunkt t kann für jedes Folgefahrzeug ermittelt werden, ob es sich stabil ($2\alpha\tau(t) \leq 1$) oder instabil ($2\alpha\tau(t) > 1$) verhalten

hat. Zusätzlich wird eine Betrachtungsweise der gesamten Kolonne hinsichtlich ihres Stabilitätsverhaltens über die Zeit dadurch möglich, daß die binären Informationen der Einzelfahrzeuge zum Zeitpunkt t jeweils aufaddiert werden. Diese kumulierten Verhaltensweisen gestatten dann eine Analyse des Fahrtverlaufs einer Kolonne, zum Beispiel hinsichtlich der Fahrtabschnitte mit besonders hohem Anteil instabil fahrender Einzelfahrzeuge.

Zur Bewältigung dieser Aufgabe wurde das Hauptprogramm STABIL (Abb. 4.46) entworfen. Seine Aufgabe besteht in der Berechnung von instabilen Fahrtanteilen einzelner Fahrzeuge bzw. der gesamten Folgefahrzeuge einer Kolonne sowie der zeitsynchronen Aufzeichnung der ermittelten Werte.

Die Abbildung 4.47 bis 4.51 zeigen exemplarisch die Ergebnisse einiger Programmläufe. Erste qualitative (die jeweilige Strategieeinstellung nicht berücksichtigende) Aussagen sind möglich:

- Oftmals fahren Einzelfahrzeuge während der gesamten Zeit überwiegend nur in stabilen oder nur in instabilen Bereichen; d.h., ein Wechsel zwischen beiden Verhaltensweisen ist relativ selten (z.B. Abb. 4.47, Fahrzeuge 3 und 7; Abb. 4.48, Fahrzeuge 5 und 7).
- Dem überwiegend instabilen Verhalten eines Fahrzeugs folgt oft ein Fahrzeug mit überwiegend stabilem Verhalten (z.B. Abb. 4.47, Fahrzeuge 2 und 3, 6 und 7, Abb. 4.48, Fahrzeuge 4 und 5, 7 und 6).

- Die Häufungen von kumulierten Instabilitäten sind besonders kurz vor und während Geschwindigkeitsreduzierungen gegeben; vor und während Beschleunigungsabschnitten wird die Kolonne, als Einheit betrachtet, immer "stabiler" (Abb. 4.49 und 4.50).

4.3.3 Stabilität in Abhängigkeit von den Strategie- einstellungen und der Fahrzeugposition

Die Auswirkungen der einzelnen Strategieeinstellungen auf das Stabilitätsverhalten der beteiligten Kolonnenfahrzeuge ist eine wesentliche Frage der Untersuchung. In den Abbildungen 4.52 bis 4.56 sind die mit Hilfe von STABIL ermittelten stabilen Fahrtanteile sowohl strategieabhängig, als auch von der jeweiligen Fahrzeugposition abhängig dargestellt.

Bei den konstanten Fahrprofilen 1 bis 3 (Abb. 4.52 oben und 4.53 oben) lassen sich keine Abhängigkeiten, weder von der Strategie noch von der Kolonnenposition erkennen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die zugrundeliegende auswertbare Fahrtenanzahl auch sehr gering ist (20 Folgevorgänge!) und damit eine gesicherte Aussage sowieso nicht möglich gewesen wäre.

Anders ist der Sachverhalt bei den Fahrten der Profile 4 und 5. Hier sind Abhängigkeiten von der Strategieeinstellung und der Fahrzeugposition klar erkennbar (Abb. 4.52 unten und 4.53 unten). Fast durchweg sind die mittleren stabilen Fahrtanteile mit der Einstellung C am größten, gefolgt von B und A. Des weiteren ist zu erkennen, daß die stabilen Anteile auch innerhalb der Kolonne dergestalt zunehmen, daß mit fortschreitender Fahrzeugposition der Stabilitätsanteil größer wird (Abb. 4.53). Je weiter also ein Fahrzeug in seiner Kolonnenposition vom Führungsfahrzeug entfernt ist, desto größer ist sein stabiler Fahrtanteil.

Der Vergleich von Kolonnenfahrten mit Abstandswarnsystemen (Einstellung A+B+C) gegenüber den Fahrten ohne Systeminformation (Einstellung D) zeigt letztlich, daß mit Abstandswarnsystemen größere Stabilitätsanteile erreicht werden (Abb. 4.54 bis 4.57). Die Fragestellung, ob die untersuchten Abstandstrategien bei Kolonnenfahrten eine Stabilitäts-erhöhung und damit einen Sicherheitsgewinn bewirken, muß demzufolge bejaht werden.

4.3.4 Stabilitätsfaktoren

4.3.4.1 Stabilitätsfaktoren einzelner Folgefahrzeuge

Aus der Berechnung stabiler Folgeabstände (Kap. 4.3.1) kann, zusammen mit der binären Ganglinienbetrachtung - stabil oder instabil - (Kap. 4.3.2), eine verfeinerte Aussage über die Stabilität von Folgefahrzeugen erreicht werden. Die Verbesserung besteht darin, daß durch die Einführung eines Stabilitätsfaktors γ für das Fahrzeug i

$$\gamma_i(t) = \frac{\Delta x_{\text{ist}_i}(t)}{\Delta x_{\text{stab}_i}(t)}$$

eine nicht nur von der Zeit abhängige Quantifizierung der Unterschreitung des stabilen Abstandes ermöglicht wird, sondern zusätzlich die Größe der Unterschreitung berücksichtigt wird, womit ein aussagefähigeres Maß für die Gefährlichkeit des Folgevorganges gegeben wäre.

Der Grenzwert zwischen stabilem und instabilem Verhalten ist somit bei $\gamma_i = 1$.

In Abbildung 4.58 ist die genannte Überlegung veranschaulicht. Während sich in diesem Beispiel das Fahrzeug i über die gesamte Beobachtungszeit T instabil verhält, fährt Fahrzeug j nur während der halben Zeit $T/2$ mit instabilen Abständen. Nach der bisherigen Betrachtungsweise wurde der instabile (bzw. stabile) Fahrtanteil nur durch die Zeit T_{instabil} bestimmt; jetzt wird zusätzlich die

Größe der Unterschreitung durch die Fläche F ermittelt

$$F = \int_{t_1}^{t_2} (1-\gamma(t)) dt.$$

Fahrzeug i fährt über die gesamte Zeit T mit instabilen Abständen; die Unterschreitung ist jedoch nur sehr gering, so daß die instabile Fläche F_i relativ klein ist. Demgegenüber fährt Fahrzeug j zwar nur die halbe Beobachtungszeit instabil, seine Unterschreitung ist dafür sehr groß und potentiell gefährlicher zu bewerten, was sich jetzt auch durch die größere instabile Fläche F_j dokumentiert.

Bezieht man die Fläche F auf die maximal mögliche instabile Fläche F_{ges} (das wäre bei $\gamma_i \rightarrow 0$ der Fall, was einem nur theoretisch denkbaren Folgeverhalten Stoßstange an Stoßstange entsprechen würde), so ist damit ein Maßstab für den instabilen Fahrtanteil gegeben, der im Vergleich zur reinen Zeitbetrachtung aussagefähiger ist. Die Größe der Unterschreitung stabiler Abstände läßt sich somit als Prozentsatz der instabilen Fläche F zur Gesamtfläche F_{ges} angeben:

$$\text{Instabiler Fahrtanteil} = \frac{F}{F_{\text{ges}}} \cdot 100 (\%).$$

Die Herleitung der instabilen Fläche ist in Abbildung 4.59 dargelegt. Die Funktion $\gamma_i(t)$ ist die in diskreten Werten vorliegende Ganglinie des Stabilitätsfaktors γ . Es wird nun eine Funktion $\gamma_i^*(t)$ definiert

niert, die alle γ -Werte größer/gleich Eins zu Null setzt und mit den übrigen γ -Werten die Fläche F beschreibt:

$$\gamma_i^*(t) = \begin{cases} 1-\gamma(t) & \text{für alle } \gamma_i(t) < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Für die gesamte Fahrtdauer T ergibt sich somit die instabile Fläche F_i zu:

$$F_i = \int_{t=t_a}^{t_e} \gamma_i^*(t) dt$$

und für diskret vorliegende Meßwerte wie folgt:

$$F_j = \sum_{t=t_a}^{t_e} \gamma_i^*(t) \cdot \Delta t.$$

4.3.4.2 Stabilitätsfaktoren der Kolonne

Durch die zeitgleiche Betrachtung der Stabilitätsfaktoren einzelner Fahrzeuge können Aussagen über das Verhalten der gesamten Kolonne gewonnen werden. Wie gezeigt (siehe Kapitel 4.3.2), treten zum Beispiel oftmals Kompensationseffekte dahingehend auf, daß das Folgefahrzeug n überwiegend instabile Abstände fährt, während sich das nächste Fahrzeug $n+1$ vornehmlich stabil bewegt.

Durch Addition der zeitgleichen Stabilitätsfaktoren γ_i kann nun die instabile Fläche der Kolonne F_{kol} ermittelt werden. Hierzu wird die Funktion $\gamma_{kol}^*(t)$ definiert, die die aufsummierten γ_i -Werte der einzelnen Folgefahrzeuge n vergleicht; ist diese Summe größer/gleich n wird γ_{kol}^* zu Null, ansonsten beschreibt γ_{kol}^* wie folgt die instabile Kolonnenfläche F_{kol} (Abb. 4.60):

$$\gamma_{kol}^*(t) = \begin{cases} n - \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) & \text{für alle } \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) < n \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$F_{kol} = \int_{t=ta}^{te} \gamma_{kol}^*(t) \cdot \Delta t.$$

4.3.4.3 Ergebnisse

Obwohl einzelne Fahrzeuge während der gesamten Fahrt-
dauer überwiegend mit instabilen Folgeabständen fah-
ren, ist die Qualität der Unterschreitung oftmals
deutlich verschieden, zum Beispiel bei Fahrt 12 und
den Fahrzeugen 2, 3, 4 und 7 (Abb. 4.61). Die insta-
bilen Zeitanteile liegen für alle Fahrzeuge bei ca.
100%. Durch die Flächenbetrachtung kommt jedoch der
Sachverhalt des weit gefährlicheren Folgeverhaltens
der Fahrzeuge 3, 4 und 7 (mit instabilen Flächen von
58%, bzw. 71%, bzw. 50%) gegenüber dem Fahrzeug 2
(mit 28%) deutlich zum Ausdruck.

In der Abbildung 4.62 werden die in Kapitel 4.3.2
angesprochenen Kompensationseffekte sichtbar. Die
Fahrzeuge 3 und 7 gleichen durch ihre stabilen Ab-
stände das instabile Verhalten der Fahrzeuge 2, 4
und 6 weitgehend aus. Wie die kumulierten Faktoren
zeigen, bewegt sich die Kolonne als Einheit nahe
der Kolonnenstabilitätsgrenze.

Die Beschleunigungen bzw. Verzögerungen des jeweils
Vorausfahrenden wirken sich deutlich sichtbar auf
das Stabilitätsverhalten einzelner Folgefahrzeuge
bzw. der gesamten Kolonne aus. Die Stabilität ist
meist am größten während und kurz nach den Beschleu-
nigungen; sie ist am geringsten während und kurz
nach den Verzögerungen (Abb. 4.63 und 4.64). Das
Folgeverhalten unterliegt somit auch bei Fahrten
mit Abstandswarnsystemen Reaktionseinflüssen des
Fahrers.

Das Stabilitätsverhalten ist geschwindigkeitsabhängig, wie die mittleren Stabilitätsfaktoren $\bar{\gamma}_m$ der Einzelfahrzeuge über der Eigengeschwindigkeit v zeigen (Abb. 4.65). Mit der Einstellung A wird dieser Sachverhalt am deutlichsten. Während sich bei geringen Geschwindigkeiten - ca. 10 m/s - $\bar{\gamma}$ -Werte um 0,55 ergeben, werden bei $v = 20$ m/s Werte um 0,8 und bei $v = 30$ m/s sogar Werte über 1,0 erreicht.

Vergleicht man die $\bar{\gamma}$ -Werte der Einstellungen A, B und C mit denen der Strategie D, so wird deutlich, daß geschwindigkeitsabhängig nur mit der Einstellung C durchgehend stabiler gefahren wird als mit der Strategie D.

4.4 Simulation strategieabhängiger Folgevorgänge

4.4.1 Generelle Auswirkungen der Parametergrößen

Bevor die in Kapitel 4.2.4 ermittelten optimalen Parameterkombinationen verglichen werden können, müssen die Auswirkungen bei der Änderung einzelner Parameter untersucht werden. Unter der ceteris-paribus-Bedingung werden demzufolge die Parameter einzeln geändert. Mit der Vorgabe eines eindeutigen Geschwindigkeitsverlaufs des Führungsfahrzeugs können so die Auswirkungen auf das Stabilitäts- bzw. Folgeverhalten beschrieben werden.

Als Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs dient dabei die folgende einfache Funktion:

$$v_n(t) = \begin{cases} 25 - 2,5(1 - \cos 0,5t) & \text{für alle } 0 < t < 4\pi \\ 25 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Funktion entspricht einem durchaus denkbaren Geschwindigkeitsverhalten. Dabei verzögert das Führungsfahrzeug von 25 m/s auf 20 m/s in 6,2 Sekunden und beschleunigt unmittelbar danach wieder auf 25 m/s.

4.4.1.1 Auswirkungen der Parameter l und m

In Abbildung 4.66 sind die Auswirkungen der Parameter l und m auf die Größe des geforderten stabilen Abstands Δx_{stab} dargestellt. Unter sonst konstanten Bedingungen entspricht ein zunehmendes l einer Abstandsreduzierung, während ein wachsendes m einer Abstandsvergrößerung gleichkommt.

In Abbildung 4.67 sind die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter l und m an einer möglichen Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs verdeutlicht. Gegeben ist der Störverlauf des Führungsfahrzeugs n mit der Störgröße S und der Störungsdauer T_s . Gemessen (bzw. berechnet) werden die Wirkgrößen W und die Wirkungsauern T (siehe Abb. 4.67) des Folgefahrzeugs bei unterschiedlichen Parameterkombinationen.

Mit wachsendem l ($l_2 > l_1$) wird die Wirkgröße W wegen

$$W_1 > W_2$$

kleiner und die Wirkungsdauer T wegen

$$T_1 < T_2$$

länger. Dagegen wird mit wachsendem m ($m_1 > m_3$) die Wirkgröße W wegen

$$W_1 > W_3$$

größer und die Wirkungsdauer T wegen

$$T_1 < T_3$$

kürzer.

4.4.1.2 Auswirkungen von Anfangsabstand Δx_a und Reaktionszeit τ

Die Parameter Δx_a und τ haben auf das Stabilitätsverhalten ebenfalls einen wesentlichen Einfluß. Für eine Kolonne aus 8 Fahrzeugen wurden die Anfangsabstände der Folgefahrzeuge von 30 m über 40 m bis 50 m unter sonst gleichen Bedingungen variiert (Abb. 4.68 bis 4.70).*)

Mit den kurzen Anfangsabständen ist die Wirkungs-dauer zwar deutlich kürzer, aber die Amplitude wesentlich größer als bei den längeren Abständen. Bei Anfangsabständen der Folgefahrzeuge von 30 m würde es sogar zu Auffahrunfällen - Fahrzeug 7 auf Fahrzeug 6 und Fahrzeug 8 auf Fahrzeug 7 - kommen.

Wirkungsdauer und Reaktionszeit verhalten sich dagegen umgekehrt proportional (Abb. 4.71). Kurze Reaktionszeiten entsprechen langen Wirkungsdauern mit kleinen Amplitudenänderungen; langen Reaktionszeiten folgen relativ kurze Wirkungsdauern mit zunehmenden Geschwindigkeitsamplituden.

*) Mit Hilfe des Programmteils FOBE; hier werden die Beschleunigungsrestriktionen $b_{\max} = 3\text{m/s}^2$ und $b_{\min} = -9\text{m/s}^2$ wirksam.

4.4.2 Auswirkungen der strategieabhängigen Parameterkombinationen

Die in Kapitel 4.2.4 für jede Strategieeinstellung ermittelten optimalen Parameter lassen - betrachtet man jeden Parameter für sich - eindeutig schlüssig keine Entwicklung in eine Richtung erkennen. Z.B. wächst zwar der Parameter \bar{I} von 0.97 bei Einstellung C auf 1.03 bei B und dann auf 1.18 bei A, was einer von A über B nach C abnehmenden Wirkgröße und ansteigender Wirkungsdauer entsprechen würde; gleichzeitig können jedoch durch die sich nicht in eine Richtung entwickelnden Parameter \bar{m} und $\bar{\tau}$ ($\bar{m}_A = 1,0$, $\bar{m}_B = 0.87$, $\bar{m}_C = 0.91$; $\bar{\tau}_A = 1.9$, $\bar{\tau}_B = 1.8$, $\bar{\tau}_C = 1.9$) sowie durch die ebenfalls unterschiedlichen Proportionalitätsfaktoren ($\bar{\lambda}_A = 1.04$, $\bar{\lambda}_B = 1.5$, $\bar{\lambda}_C = 0.90$) oder durch die stark differierenden Abstände Ausgleichs- oder Verstärkungseffekte auftreten.

Da diese Einflüsse in ihrer Gesamtheit nicht mehr überschaubar sind, werden sie sinnvollerweise für die unterschiedlichen Parameterkombinationen der jeweiligen Strategien ganzheitlich ausgewertet.

4.4.2.1 Anfangsabstand gleich strategiegeforderter Sollabstand

Der erste Ansatz geht von folgenden Prämissen aus:

- a) Alle Folgefahrzeuge haben die gleiche Geschwindigkeit und den gleichen Anfangsabstand zum jeweils Vorfahrenden. Der Anfangsabstand entspricht dem strategieabhängig geforderten Sollabstand, berechnet nach der Bremswegformel;
- b) der Geschwindigkeitsverlauf ist durch die in Kapitel 4.4.1 beschriebene Funktion gegeben;
- c) die Parameter für jede Strategie entsprechen den ermittelten optimalen Werten.

Als Beurteilungsgrößen sollen die Wirkgrößen und Wirkungsdauern der Folgefahrzeuge dienen.

Die Simulationsläufe für eine aus 8 Fahrzeugen bestehende Kolonne sind für die Strategien A, B und C in den Abbildungen 4.72 bis 4.74 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine eindeutige Rangfolge in der Beurteilung der Strategien.

Die Wirkungsdauer ist bei A am kürzesten und ihre Größe am stärksten. Dies ist bedingt durch die größeren Parameterwerte von l , m und τ gegenüber Einstellung B bzw. von l und m gegenüber C. Der wesentliche Einfluß rührt jedoch von den deutlich niedrigeren Anfangsabständen bei Strategie A gegenüber B und erst recht gegenüber C.

4.4.2.2 Anfangsabstand gleich mittlerer strategieabhängiger Istabstand

Wie in Kapitel 4.1.2 gezeigt, ist die Annahme, daß die Folgefahrzeuge genau mit dem vorgeschriebenen Sollabstand fahren, nicht sehr realistisch. Vielmehr liegen die Istabstände im Mittel über den Sollabständen. Ein zweiter Simulationsansatz ändert die Prämisse dahingehend, daß der Anfangsabstand dem strategieabhängigen mittleren Istabstand entspricht.

Mit Hilfe der Beurteilungsgrößen (Wirkungsdauer und Wirkgröße) sind zwischen den Strategien A, B und C jetzt nur noch graduelle Unterschiede sichtbar (Abb. 4.75 bis 4.77). Die Ableitung einer Rangfolge ist bei derartig geringen Differenzen nicht zulässig; dies gilt besonders auch unter dem durchaus selbstkritischen Blickwinkel, daß in diesem wie auch in jedem anderen Modell Annahmen getroffen wurden, die die Realität mehr oder weniger stark einschränken.

Vergleicht man dagegen die Strategien A, B und C - also die Fahrten mit Abstandsinformation - mit der Strategie D - das sind die Fahrten ohne Systeminformation - so ist hier ein unterschiedliches Folgeverhalten erkennbar (Abb. 4.78). Vor allem die Amplitudenzunahmen des ersten Überschwingvorgangs sind bei Fahrten ohne Systeminformation deutlich größer gegenüber den Fahrten mit Abstandsinformation (Abb. 4.79).

Nach diesen Ergebnissen sind somit die Auswirkungen von Störungen des Führungsfahrzeugs einer Kolonne bei Folgefahrzeugen ohne Abstandsinformation deutlich größer und damit potentiell gefährlicher, als bei Fahrzeugen mit Abstandswarnsystemen.

5. Diskussion von Sicherheitsaspekten

5.1 Problematik von Warnstrategien

Die Hauptaufgabe von Abstandswarnsystemen besteht darin, dem Fahrzeugführer einen Abstand vorzugeben, der es ihm ermöglicht, im Gefahrenfall einen Auffahrunfall zu verhindern. Die Problematik dieser Aufgabe liegt nun darin, diesen 'richtigen' Abstand zu finden und für den Auswerteteil im Gerät eindeutig zu definieren^{*)}. Neben den meßbaren Größen, Abstand und Geschwindigkeit, sind für die Berechnung des Sollabstandes in der Regel noch Angaben über die Reaktionszeit des Fahrers sowie die Bremsverzögerungen der beteiligten Fahrzeuge notwendig.

Beide Parameter, Reaktionszeit und Bremsverzögerung, können bei dem vorliegenden Konzept aktuell nicht gemessen werden. Vielmehr besteht die Notwendigkeit, darüber Annahmen zu treffen, die einerseits eine möglichst große Anzahl von denkbaren Gefahrenfällen einschließen, auf der anderen Seite aber vom Fahrer noch akzeptiert werden /43/. Die Problematik dieser, zumindest in Teilbereichen, gegenläufigen Wirkungen von Sicherheit und Fahrerakzeptanz ist in Abbildung 5.1 qualitativ dargestellt.

Wird ein Parameter in einer Abstandsvorschrift dergestalt verändert, daß er eine Vergrößerung des Sollabstandes bewirkt, so wird damit die Sicherheit - wie immer sie definiert sei - erhöht, sofern sich der Fahrer an diese Vorschrift hält. Gleichzeitig sinkt mit der Abstandsvergrößerung die Bereitschaft des Fahrers, dieser Vorschrift zu genügen (Abb. 5.1 oben).

^{*)} Zur hier diskutierten Problematik siehe auch /3/, /43/.

Die 'tatsächliche' Sicherheitswirkung entspricht daher eher dem qualitativen Kurvenverlauf in Abbildung 5.1— unten. Dieser Kurvenverlauf läßt sich quantitativ nicht beschreiben, da er von den unterschiedlichsten Einflüssen (Aufmerksamkeitsgrad des einzelnen Fahrers, individuelle Stimmungslage, Sicht- und Witterungsverhältnisse, Streckenverlauf, u.v.a.) geprägt ist. Es können jedoch allgemein drei Bereiche abgegrenzt werden:

1. Die Sicherheitswirkung steigt mit größer werdendem Sollabstand. Der Fahrer akzeptiert uneingeschränkt die Abstandsvorschrift, da er mit kleineren Abständen nach seinem Sicherheitsbedürfnis nicht fahren würde.
2. Die Zunahme der Sicherheitswirkung ist immer noch gegeben; sie ist jedoch flacher. Der Fahrer akzeptiert zwar den vorgeschlagenen Sollabstand, die Einsicht dafür ist jedoch nicht mehr uneingeschränkt bei ihm vorhanden.
3. Die dem Fahrer abverlangten zu großen Abstände kehren die Absicht einer Sicherheitssteigerung in das Gegenteil um; der Fahrer akzeptiert diese großen Sollabstände nicht und fährt nach eigenem Ermessen geringere Abstände. Die Sicherheitswirkung geht zurück.

Im Rahmen der Felderprobung /3/ wurden zahlreiche unterschiedliche Sollabstandsvorschriften getestet. Die Untersuchung hat gezeigt, daß die Fahrer diese Unterschiede in der Regel bewußt nicht bemerkt haben und deshalb der Akzeptanzaspekt im Vergleich zum Sicherheitsaspekt (zumindest bei den getesteten Einstellungen) von untergeordneter Bedeutung ist. Die folgende Diskussion von Sicherheitkriterien berücksichtigt daher in erster Linie fahrdynamische Ansätze und deren Auswirkungen auf die Sicherheit.

5.2 Sicherheitskriterien

Sowohl beim Fahren mit Abstandswarnsystemen als auch beim Fahren ohne diese Einrichtung gibt es kein allgemeingültiges (und damit richtiges) Kriterium, nach dem ein bestimmter Abstand als sicher zu bezeichnen wäre. Wohl aber lassen sich Kriterien finden, die die Risikobereitschaft des Fahrers beziehungsweise die Rechenvorschrift des Gefahrenrechners in Abstandswarnsystemen berücksichtigen. Die Grenzen der zum Ansatz kommenden Risikostufen lassen sich dabei vorrangig durch den fahrdynamischen Ansatz bestimmen, in den dann die aktuell nicht meßbaren Parameter, angenommene Reaktionszeit und Bremsverzögerung, als Faktoren eingehen.

5.2.1 Kriterium der absoluten Sicherheit

Dieser Ansatz geht davon aus, daß der Vorausfahrende in ein (plötzlich auftauchendes) Hindernis ohne eigenen Bremsweg hineinfährt und der Folgefahrer nach einer bestimmten Reaktionszeit t_R sein Fahrzeug durch eine Vollbremsung unmittelbar hinter dem stehenden Führungsfahrzeug zum Halten bringt. Unter diesen Voraussetzungen würde sich der Sollabstand des zur Vollbremsung benötigten Fahrzeugs $n+1$ wie folgt berechnen:

$$\Delta x_{\text{abs}} = v_{n+1} \cdot t_R + \frac{v_{n+1}^2}{2g\mu}$$

- mit v_{n+1} = Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs
in m/s
 t_R = Reaktions- und Umsetzzeit in s
 g = Erdbeschleunigung in m/s²
 μ = Gleitbeiwert

5.2.2 Kriterium der relativen Sicherheit

Hierbei wird angenommen, daß der Vordermann eine Notbremsung vollzieht - er hat also einen eigenen Bremsweg - und der Nachfolgende ebenfalls, nach einer gewissen Reaktionszeit t_R , maximal bremsst und dann wieder unmittelbar hinter dem Führungsfahrzeug zum Stillstand kommt. Der hierfür erforderliche relative Sicherheitsabstand berechnet sich somit zu:

$$\Delta x_{\text{rel}} = v_{n+1} \cdot t_R + \frac{v_{n+1}^2}{2g\mu_{n+1}} - \frac{v_n^2}{2g\mu_n}$$

(diesem Ansatz entsprechen die drei Strategieeinstellungen A, B und C mit jeweils unterschiedlichen Parameterkombinationen für t_R und $g\mu$).

5.2.3 Kriterium der minimalen Sicherheit

Bei gleichen Geschwindigkeits- und Verzögerungswerten der beiden Fahrzeuge reduziert sich das Kriterium der relativen Sicherheit zum Kriterium der minimalen Sicherheit:

$$\Delta x_{\text{min}} = v_{n+1} \cdot t_R$$

Da beide Fahrzeuge hierbei den gleichen Bremsweg haben, wird der Mindestabstand allein durch den in der Reaktions- und Umsetzzeit zurückgelegten Weg bestimmt.

5.2.4 Faktoren der Sicherheitskriterien

Um das Spektrum der vorgenannten drei Ansätze in ihrer Größe abzugrenzen, müssen für die einzelnen Faktoren t_R und μ Wertebereiche angegeben werden.

Als Grenzwerte der Reaktionszeit werden 0,5 und 2,0 s gewählt. Diese Werte beinhalten die Ergebnisse von zahlreichen Untersuchungen /8/, /9/, /36/, /37/ und decken damit einen Bereich ab, der vom Fahren mit hohem Aufmerksamkeitsgrad bis zu Blickwendungen des Fahrers auf die Armaturen oder in den Rückspiegel reicht.

Die Reibungskoeffizienten μ hängen im wesentlichen von der Fahrgeschwindigkeit sowie von Fahrbahnart und -zustand ab. Ebenfalls rückgreifend auf Untersuchungsergebnisse /7/, /38/, /35/ seien die Grenzen des Reibungskoeffizienten zwischen 0.8 und 0.6 im Geschwindigkeitsbereich von 10 bis 40 m/s (für trockene Fahrbahndecken) gewählt.

Danach ergibt sich ein Spektrum möglicher Sicherheitsabstände gemäß Abbildung 5.2. Je nach Ansatz und Parameterwahl ergeben sich sehr große Unterschiede und die in Kapitel 5.1 diskutierte Problematik von der 'richtigen' Warnstrategie wird überdeutlich.

5.3 Sicherheitsfaktor

Um einen charakteristischen Vergleichsmaßstab zur Beurteilung der Sicherheit im Folgefall zu ermöglichen, wird ein Sicherheitsfaktor δ ermittelt; er sei definiert als der Quotient aus dem aktuell gemessenen Abstand Δx_{ist} und einem Sollabstand Δx_{soll} bei jeweils gleichen Geschwindigkeitskonstellationen:

$$\delta = \frac{\Delta x_{\text{ist}}}{\Delta x_{\text{soll}}}$$

Definitionsgemäß sind somit 'sichere' Folgevorgänge durch ein $\delta \geq 1$ charakterisiert, während 'unsichere' Folgevorgänge durch ein $\delta < 1$ beschrieben werden.

Gleiche Sicherheitsfaktoren kleiner 1.0 bedeuten jedoch nicht zwangsläufig den gleichen Grad einer Unterschreitung der Sicherheit. Vielmehr muß die aktuelle Geschwindigkeit und der Sicherheitsansatz - das Sicherheitskriterium - mitberücksichtigt werden /39/. Deshalb erscheint es sinnvoll, die potentielle Kollisionsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der das Folgefahrzeug auf den Vordermann im Gefahrenfall auffahren würde, für die jeweilige Geschwindigkeit und dem geforderten Sicherheitskriterium zu ermitteln.

Für das Kriterium der absoluten Sicherheit ergibt sich die Kollisionsgeschwindigkeit v_{k_abs} zu (siehe Anhang 6.1 und Abb. 5.3):

$$v_{k_abs} = \sqrt{(v_{n+1}^2 + 2g\mu v_{n+1} t_R) (1-\delta)} .$$

Die Ermittlung der Kollisionsgeschwindigkeiten beim Kriterium der relativen beziehungsweise minimalen Sicherheit gestaltet sich etwas aufwendiger. Unter der Annahme gleicher Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge errechnet sich die Kollisionsgeschwindigkeit wie folgt (siehe auch Anhang 6.2):

$$v_k = v_{n+1} - b_{n+1}(t_{koll} - t_R) .$$

Zur Bestimmung der Kollisionszeit t_{koll} müssen jedoch zwei Fälle unterschieden werden:

Fall 1: Die Zeit bis zur Kollision t_{koll} ist kleiner der Zeit t_n , die das vorausfahrende Fahrzeug n bis zum Stillstand gebraucht hätte; d.h., das Folgefahrzeug fährt noch, bevor das vorausfahrende zum Stehen gekommen ist, auf. (Diese Situation ist beim minimalen Sicherheitskriterium immer gegeben).

Fall 2: Die Zeit bis zur Kollision t_{koll} ist größer als die Zeit t_n , die das Folgefahzeug n bis zum Stillstand gebraucht hätte; d.h., das Folgefahzeug fährt auf das bereits stehende Führungsfahzeug auf.

Damit ergibt sich für das relative Sicherheitskriterium für Fall 1 (und $b_n > b_{n+1}$):

$$v_{k_{\text{rel}1}} = v + b_{n+1} \left(\frac{b_{n+1} t_R}{b_n - b_{n+1}} + t_R \pm \sqrt{\left(\frac{b_{n+1} t_R}{b_n - b_{n+1}} \right)^2 + \frac{2vt_R + b_{n+1} t_R^2 - 2x_0}{b_n - b_{n+1}}} \right)$$

beziehungsweise für das minimale Sicherheitskriterium (und $b_n = b_{n+1}$)

$$v_{k_{\text{min}}} = v - b_{n+1} \left(\frac{0.5b_{n+1} t_R^2 + vt_R - x_0}{b_{n+1} t_R} - t_R \right)$$

und für Fall 2:

$$v_{k_{\text{rel}2}} = b_{n+1} \sqrt{\left(\frac{v + b_{n+1} t_R}{b_{n+1}} \right)^2 - \frac{2vt_R}{b_{n+1}} - t_R^2 + \frac{2x_0}{b_{n+1}} - \frac{v^2}{b_n b_{n+1}}}$$

Unter der Annahme geschwindigkeitsunabhängiger Beschleunigungswerte (b_n und b_{n+1}) läßt sich das relative Sicherheitskriterium für die getesteten Strategieeinstellungen anwenden. Die potentiellen Kollisionsgeschwindigkeiten für unterschiedliche δ -Werte lassen sich strategieabhängig, d.h. abhängig von der eingestellten Parameterkombination für b_n , b_{n+1} und t_R errechnen (Abb. 5.4):

Bei gleichen Sicherheitsfaktoren zeigen die Parameterkombinationen keine wesentlichen Unterschiede der Kollisionsgeschwindigkeiten. Lediglich bei geringer Unterschreitung des Sollabstandes (z.B. $\delta = 0.9$) wirken sich die Strategieeinflüsse geringfügig aus (Abb. 5.5). Je weiter jedoch der Sicherheitsabstand unterschritten wird, desto stärker kommt die Ausgleichswirkung der Parameter b und t_R zum Tragen.

Zum Beispiel wird mit der Einstellung A zwar ein vergleichsweise geringer Sollabstand vorgegeben, dessen Unterschreitung einem sehr geringen Abstand entspricht. Die potentielle Kollisionsgeschwindigkeit weicht jedoch nicht wesentlich zum Beispiel von der Strategie C ab, da mit der Strategie A dem Fahrer eine relativ geringe Reaktionszeit ($t_R = 0.8$ s) und dem Fahrzeug eine hohe Verzögerung ($b_{n+1} = 7$ m/s²) unterstellt wird. Bei Anwendung des relativen Sicherheitskriteriums mit den Strategieeinstellungen A, B und C sind somit bei gleichen δ -Werten nahezu gleich große Kollisionsgeschwindigkeiten gegeben.

5.4 Ergebnisse

Für alle Profile, Strategien und Fahrzeuge wurden die Sicherheitsfaktoren zu jedem Zeitpunkt errechnet, den Geschwindigkeitsklassen (Klassenspektrum 10-40 m/s; Klassenbreite 2 m/s) zugeordnet und entsprechend ihrer Häufigkeit je Klasse gemittelt. Für die Strategie D wurde das minimale beziehungsweise das absolute Sicherheitskriterium mit den Parametern $b_n = b_{n+1} = 7 \text{ m/s}^2$, $t_R = 1.0$ angenommen.

Es zeigt sich, daß die mittleren Sicherheitsfaktoren aller Strategieansätze eindeutig geschwindigkeitsabhängig sind (Abb. 5.6). Mit zunehmender Geschwindigkeit nehmen die Faktoren ab. Bei der Betrachtung aller Folgesituationen fällt neben den Strategieunterschieden die Tatsache auf, daß im Mittel mit relativ großen Sicherheitsreserven gefahren wird. Dies ist dadurch erklärbar, daß die Faktoren auch bei Öffnungsvorgängen berechnet wurden und daß sie dort, bedingt durch die Fahrerreaktion, sehr groß werden. Obwohl sich also bei Verzögerungssituationen (Schließvorgängen) durchaus Sicherheitsfaktoren kleiner 1 ergaben, wurden diese durch die Mittelwertbildung angehoben (Abb. 5.7 und 5.8).

Aus diesem Grunde, und weil ja der potentielle Gefahrenfall nur bei Verzögerungen auftritt, wurden in einem zweiten Schritt die Sicherheitsfaktoren nur für Schließvorgänge berechnet (Abb. 5.9). Es ergibt sich ein grundsätzlich ähnliches Bild der Geschwindigkeitsabhängigkeit, jedoch auf deutlich niedrigerem Sicherheitsniveau. Auch sind die Strategieunterschiede ebenfalls noch vorhanden.

Sie besagen, daß aufgrund der so ermittelten Faktoren die Sicherheit mit der Strategie A am größten wäre, gefolgt von B und C.

Dieser Sachverhalt ist aber nur dann gegeben, wenn sich das System Fahrer-Fahrzeug im Gefahrenfall exakt so verhält, wie es in der jeweiligen Abstandsstrategie definiert ist. Die Abstandsstrategie ist jedoch lediglich eine Vorschrift zur Definition eines sinnvoll erscheinenden Abstandes (Bremswegformel); sie besagt selbstverständlich nicht, daß die darin angesetzten Parameterwerte im Gefahrenfall auch zutreffen müssen. Für Vergleichszwecke sollte daher eher von einer einheitlichen Verhaltensweise im Gefahrenfall ausgegangen werden; d.h., der Sicherheitsfaktor sollte, unabhängig von der Strategieeinstellung, über einen einheitlichen Ansatz ermittelt werden.

Beispielhaft wurde die Einstellung B als einheitliche Verhaltensweise für alle Schließvorgänge gewählt und die Sicherheitsfaktoren der Strategien A und C und D neu berechnet. Das bedeutet, jeder Istabstand, egal welcher Strategie, wird mit dem Sicherheitsabstand verglichen, der sich aufgrund des fahrdynamischen Ansatzes nach der Strategie B ergeben hätte.

Die Ergebnisse dieses Ansatzes (Abb. 5,10) werden zusammenfassend wie folgt interpretiert:

- unterstellt man dem Fahrer im Gefahrenfall eine von den Abstandsstrategien A, B und C unabhängige Verhaltensweise, so ist die Einstellung C durchweg sicherer als B und diese wieder sicherer als A.

- bei Kolonnenfahrten mit Abstandswarnsystemen nimmt die definierte Sicherheit, beschrieben mit Hilfe des Sicherheitsfaktors δ , mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Nach dem vorgegebenen Ansatz werden mit der Strategie A Sicherheitsfaktoren kleiner/gleich 1.0 ab Geschwindigkeiten größer 26 m/s (93,6 km/h) erreicht, während sich mit den Einstellungen B und C keine Unterschreitungen der Sicherheitsgrenze innerhalb des untersuchten Geschwindigkeitsspektrums (bis ca. 130 km/h) ergeben.

- bei Kolonnenfahrten ohne Abstandswarnsysteme (Strategie D) ergibt sich über die Geschwindigkeit ein näherungsweise U-förmiger Verlauf des Sicherheitsfaktors. Die Sicherheit ist im Geschwindigkeitsbereich von 16 bis 27 m/s (ca. 58 bis 97 km/h) deutlich am geringsten.

6. Aspekte zur Leistungsfähigkeit

Es ist nicht auszuschließen, daß durch autarke Abstandswarnsysteme, für den Fall des generellen Vorhandenseins dieser Geräte in allen Fahrzeugen, die Leistungsfähigkeit einer Strecke beeinflußt wird. Die Vermutung liegt nahe, daß durch die Vergrößerung von Abständen durch Abstandswarnsysteme gegenüber den allorts beobachtbaren geringen Abständen, insbesondere bei hohem Verkehrsaufkommen, die Leistungsfähigkeit gemindert wird /3/, /26/.

Andererseits ist einleuchtend, daß mit Abstandswarnsystemen die Reduzierung der Häufigkeit zu kleiner Abstände zu einer Verringerung der Häufigkeit von großen Abständen führen kann (ebenfalls in /3/). Dies hätte jedoch lediglich zur Folge, daß die Kolonnenlängen zunehmen und die Zeitlücken zwischen den einzelnen Kolonnen abnehmen würden, womit die Leistungsfähigkeit, im kollektiven Sinne, nicht zwangsläufig beeinträchtigt wäre.

Verfolgt man diesen Gedankengang weiter, so könnte man auch mutmaßen, daß die Leistungsfähigkeit mit Abstandswarnsystemen sogar erhöht werden kann. 'Zaghafte' und 'zurückhaltende' Fahrer könnten teilweise ermutigt werden, ihre 'zu großen' Abstände zu reduzieren und ihre individuellen, den Verkehrsfluß störenden, Verhaltensweisen dem vorherrschenden Verkehrsgeschehen anzupassen.

Während sich die letztgenannte Überlegung letztlich nur durch die allgemeine Einführung der Systeme be- oder widerlegen ließe, lassen die vorliegenden Ergebnisse, zusammen mit makroskopischen Daten, Auswertungen hinsichtlich der ersten beiden Ansätze durchaus zu.

6.1 Leistungsfähigkeit der Strategieeinstellungen

Daß die unterschiedlichen Strategieeinstellungen und die damit verbundenen Verhaltensweisen, bei einer mikroskopischen Betrachtung auch unterschiedliche Kolonnenlängen unter sonst gleichen Bedingungen ergeben, konnte schon in Kapitel 4.1.1 (Abb. 4.5) gezeigt werden. Diese räumliche Betrachtung soll nun durch einen räumlich-zeitlichen Ansatz zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit erweitert werden.

Die Addition der Einzelabstände der Folgefahrzeuge einer Kolonne ermöglicht, zusammen mit den aufaddierten Fahrzeuglängen, die Berechnung einer Dichte der Kolonne, ausdrückbar in Fahrzeuge pro Längeneinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die momentane Dichte k_m ergibt sich somit zu

$$k_m = \frac{n}{\sum_{j=1}^n (\Delta x_j + L_j)} \quad \text{in} / \frac{\text{Fz}}{\text{m}} /$$

mit n = Anzahl der Folgefahrzeuge, d.h., das Führungsfahrzeug bleibt unberücksichtigt

L_j = Länge von Folgefahrzeug j

im folgenden Kolonnendichte genannt.

Gleichfalls läßt sich das momentane Geschwindigkeitsmittel der Folgefahrzeuge zum selben Zeitpunkt berechnen:

$$\bar{v}_m(t) = \frac{\sum_{j=1}^n v_j(t)}{n} \quad \text{in} / \frac{\text{m}}{\text{s}} /$$

Unterstellt man innerhalb der Kolonne Stationarität des Verkehrsablaufs^{*)}, so ist über die Beziehung

$$q = k_m \cdot \bar{v}_m \quad \text{in } / \frac{Fz}{s} /$$

der Leistungsbegriff der Stärke, ausdrückbar in Fahrzeuge pro Zeiteinheit, berechenbar; im folgenden Kolonnenstärke q_k genannt.

Die Abbildungen 6.1 bis 6.3 geben beispielhaft die Dichte-Stärke- Beziehung einiger Fahrten der Profile 4 wieder. Die unterschiedlichen Leistungsfähigkeitsspektren der jeweiligen Strategien sind trotz der Streuung der Werte klar zu erkennen.

Mit allen Einstellungen wurde das gleiche Geschwindigkeitsspektrum durchfahren. Die erreichten Kolonnendichten sind bei der Strategie A deutlich am größten, gefolgt von B und dann C. Die Ergebnisse der Strategie D (ohne Abstandswarnsystem) liegen zwischen denen von A und B (Abb. 6.1).

*) Stationarität des Verkehrsablaufs ist exakt nur dann gegeben, wenn die räumlich ermittelten Dichten und Geschwindigkeiten (wie im vorliegenden Fall) bei der Stärkeberechnung zum selben Ergebnis führen, wie lokal erfaßte Dichten und Geschwindigkeiten. D.h., bei Stationarität ist die Kontinuitätsgleichung $q = k \cdot \bar{v}$ von Zeit und Weg unabhängig /40/, /41/, /42/. Diese Unabhängigkeit ist im realen Verkehrsgeschehen exakt nie gegeben; nur innerhalb gewisser Toleranzgrenzen bezüglich der Eingangsparameter hat die Kontinuitätsgleichung ihre Gültigkeit und gestattet die Aufstellung von Fundamentaldiagrammen ($q = f(k)$).

Analog sind die Ergebnisse der geschwindigkeitsabhängigen Kolonnenstärken. Mit der Einstellung A werden die größten Stärken erreicht, gefolgt von B und dann C (Abb. 6.2).

Die Darstellung von 'Fundamentaldiagrammen der Kolonnen' zeigen die Zusammenhänge wohl am besten (Abb. 6.3). Die maximalen Stärken und entsprechenden Dichten in der nachfolgenden Tabelle spiegeln das strategieabhängige Leistungsgefälle deutlich wieder.

Strategien	maximale Kolonnenstärken / Fz/s /	entsprechende Kolonnendichten / Fz/m /
A	ca. 0,71	ca. 0,018 - 0,037
B	ca. 0,57	ca. 0,017 - 0,033
C	ca. 0,48	ca. 0,015 - 0,030
D	ca. 0,64	ca. 0,029 - 0,037

6.2 Überlegungen zu makroskopischen Auswirkungen

Inwieweit Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit zu erwarten sind, ist kaum vorherzusagen, da zahlreiche, schwer beschreibbare Einflußgrößen wirksam werden können. Diese Einflußgrößen hängen möglicherweise nicht von der neuen Technologie und deren Funktionsweise im Verkehrsgeschehen allein ab, sondern auch von denkbaren zusätzlichen Randbedingungen wie zum Beispiel veränderlichen Treibstoffpreisen, einem sich wandelnden Sicherheitsbedürfnis, der Qualität der begleitenden Maßnahmen bei der Einführung und dem Betrieb der neuen Technik und nicht zuletzt dem Wandel in der Automobilentwicklung. Aus den genannten Gründen erscheint nur die Fragestellung sinnvoll, ob mit Abstandswarnsystemen zwangsläufig eine Verringerung heutiger Leistungsfähigkeiten verbunden sein muß, beziehungsweise ab welchen Abständen oder Zeitlücken eine kollektive Herabsetzung der Leistungsfähigkeit zu erwarten ist.

Die Überprüfung dieser Fragestellung erfolgt anhand realer Meßwerte und geht von der Überlegung aus, die Fehlbeträge von 'zu kleinen' Abständen beziehungsweise Zeitlücken zu verlagern (siehe Kapitel 6).

Die Ausgangsdaten bilden Querschnittsmessungen aus dem Jahr 1978 auf der zweispurigen Bundesautobahn A 5 zwischen Bruchsal und Karlsruhe. Die bei Kilometer 617 gemessenen und berechneten Stärke - Dichte - Beziehungen verdeutlichen das Leistungsvermögen dieser Strecke. Insgesamt wurden während fünf Stunden 5020 Fahrzeuge auf der Fahrspur und 6680 Fahrzeuge auf der Überholspur erfaßt. Maximale Leistungsfähigkeiten ergaben sich danach bei ca. $q = 1560$ Fz/h und $k = 21$ Fz/km auf der Fahrspur beziehungsweise bei ca. $q = 2300$ Fz/h und $k = 24$ Fz/km auf der Überholspur, bei einer Auswertung in 1-Min-Intervallen.

Überprüft wurde nun, ob sich diese Stärke-Dichte-Beziehungen ändern, wenn man die Zeitlücken, für die die vorgeschriebenen Strategieeinstellungen nicht ausgereicht hätten, jeweils um den Betrag vergrößert, der bis zur Erreichung des Sollabstands notwendig wäre und die Berechnung der nächsten Zeitlücke dann auf den Zeitpunkt bezieht, der sich ergeben hätte, wenn das vorausfahrende Fahrzeug mit dem vorgeschriebenen Abstand gefahren wäre.

Ausgehend von den realen Meß- und Rechenergebnissen, Einfahrzeitpunkt t_{jn} von Fahrzeug n in die Zählschleife, Geschwindigkeit v_n von Fahrzeug n zum Zeitpunkt t_{jn} und Fahrzeuglänge L_n , errechnen sich die neuen Einfahrzeitpunkte t_{jn}^* wie folgt (siehe auch Abb. 6.4): Der Einfahrzeitpunkt des ersten Fahrzeugs t_{j1} auf der realen Zeitachse t entspricht dem selben Zeitpunkt auf der zu verändernden Zeitachse t^*

$$t_1^* = t_1 .$$

Der Nettoabstand des Folgefahrzeugs n zum vorausfahrenden Fahrzeug n-1 wird unter der Annahme der Geschwindigkeitskonstanz des Vorausfahrenden berechnet:

$$\Delta x_{n,n+1}^{\text{netto}} = (t_{jn} - t_{jn-1}^*) v_{n-1} - L_n$$

soll
und mit dem erforderlichen Sollabstand $\Delta x_{n,n-1}$ einer bestimmten Strategie verglichen. Ist der erreichte Nettoabstand größer oder gleich dem Sollabstand, so wird der ursprüngliche Einfahrzeitpunkt beibehalten, das heißt, die neue Zeitachse wird mit dem alten Zeitpunkt überschrieben:

$$t_{jn}^* = t_{jn} .$$

Ergibt sich ein kleinerer Nettoabstand, wird ein neuer Zeitpunkt $t_{j_n}^*$ errechnet:

$$t_{j_n}^* = t_{j_{n-1}}^* + (\Delta x_{n,n-1}^{\text{netto}} / v_n) + (L_n / v_n).$$

Mit der so ermittelten neuen Zeitachse ergeben sich zum Teil neue Einfahrzeitpunkte $t_{j_n}^*$. Damit, und mit den alten Geschwindigkeitswerten und Fahrzeuglängen, lassen sich wieder Stärke-Dichte-Beziehungen berechnen und mit den ursprünglichen realen Werten vergleichen.

Getrennt nach Fahrspuren sind diese Ergebnisse für Sollabstandsvorschriften nach den Strategien A und C in den Abbildungen 6.5 und 6.6 in Form von Fundamentaldiagrammen dargestellt. Danach sind klare Einflüsse durch Abstandswarnsysteme auf die Leistungsfähigkeit nicht zu erkennen. Die überwiegende Anzahl der gemessenen Werte (tatsächliche Einfahrzeitpunkte und die daraus resultierenden Stärken und Dichten) sind mit den strategieabhängig veränderten Werten (veränderte Einfahrzeitpunkte) identisch. Diese Identität geht zum Teil so weit, daß sich mit der Strategie A auf der Fahrspur sogar für sämtliche 300 Intervalle die gleichen Stärke/Dichte-Relationen ergaben (Abb. 6.5 oben). Die häufigsten Abweichungen zwischen tatsächlichen und veränderten Werten waren noch mit der Einstellung C auf der Überholspur festzustellen (Abb. 6.6 unten); sie veränderten jedoch die Form des Fundamentaldiagramms nicht grundsätzlich.

Der Vergleich von ursprünglichen und veränderten Fundamentaldiagrammen zeigt, daß mit Abstandswarnsystemen nicht zwangsläufig eine Minderung der Leistungsfähigkeit verbunden sein muß.

7. Schlußbemerkungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß das Fahrverhalten in Kolonne bei Fahrern, denen die kontinuierliche Information über ihren Abstand zum jeweils Vorausfahrenden durch autarke Abstandswarnsysteme gegeben wird, sich meßbar anders gestaltet, als wenn die selben Fahrer diese Zusatzinformation nicht erhalten. Die Fahrzeugführer sind grundsätzlich in der Lage, ihr Verhalten an der vorgegebenen Strategie dahingehend zu orientieren, daß die Sollabstände zum überwiegenden Teil eingehalten werden. Das Können und/oder die Bereitschaft der Fahrer, die Mindestabstände einzuhalten, ist umso geringer, je größer der geforderte Abstand ist. Dies gilt für die drei untersuchten Strategieeinstellungen, deren Ansatz durchaus nicht frei von Kritik ist, die jedoch mit den gewählten Parametervariationen zumindest ein breites Spektrum an Sollabständen vorgeben.

Die Folgevorgänge von Fahrten mit Abstandswarnsystemen sind durch ein deterministisches Fahrzeugfolgemedell beschreibbar. Unter Anwendung der allgemeinen Fahrzeugfolgegleichung sowie den ermittelten Parameterwerten und in Kenntnis der Strategieeinstellung lassen sich die Kolonnenfahrten gut simulieren.

Die Stabilitätseigenschaften einer Kolonne sind bei Fahrten mit Abstandswarnsystemen besser als ohne diese Geräte. Auch wenn das Folgeverhalten mit den Systemen teilweise immer noch instabil ist, so sind die Auswirkungen von Störungen, durch die die Kolonne anführende Fahrzeug, deutlich geringer. Der entscheidende Faktor bezüglich der Stabilität einzelner Fahrzeuge in der Kolonne, beziehungsweise der gesamten Kolonne, ist der Abstand.

Eine objektive Sicherheitsbeurteilung der Strategieeinstellungen kann nicht erfolgen. Die betrachteten Strategien lassen lediglich eine Relativierung untereinander zu. Danach ist von der Einstellung mit der relativ geringsten Fahrerakzeptanz und den relativ größten Sollabstandsforderungen die größte Sicherheit zu erwarten.

Mit der Einführung von autarken Abstandswarnsystemen sind nicht zwangsläufig Minderungen der Leistungsfähigkeit einer Strecke verbunden. Die nach bestimmten Abstandsvorschriften zu kurzen Abstände innerhalb einer Kolonne können auf Kosten der großen Abstände zwischen den einzelnen Kolonnen vergrößert werden, ohne daß sich die Stärke-Dichte-Beziehungen wirksam ändern müssen.

Wie nachgewiesen wurde, besteht die Möglichkeit bei Fahrten in Kolonne, mit autarken Abstandswarnsystemen mehr Sicherheit und einen größeren Anteil an Gleichförmigkeit des Verkehrsablaufs zu erreichen.

Literatur

- /1/ BRILON, W.:
Unfallgeschehen und Verkehrsablauf
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 201,
1976
- /2/ LEUTZBACH, W.; SIEGENER, W.; WIEDEMANN, R.:
Über den Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen
und Verkehrsbelastung auf einem deutschen Auto-
bahnabschnitt.
Accident Analysis and Prevention, Pergamon Press,
Oxford, Vol. 2, 1970
- /3/ LEUTZBACH, W.; STEIERWALD, G.; ZACKOR, H.;
JAHNKE, C.-D.:
Felderprobung autarker Abstandswarnsysteme -
Verkehrstechnische Untersuchung.
Forschungsauftrag des Bundesministers für
Forschung und Technologie, Stuttgart, 1981
- /4/ -
Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und
Straßenverkehr - Forschungsbilanz 1977.
Bundesminister für Forschung und Technologie,
Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1977
- /5/ -
Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und
Straßenverkehr - Forschungsbilanz 1978.
Bundesminister für Forschung und Technologie,
Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1978
- /6/ -
Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und
Straßenverkehr - Forschungsbilanz 1979.
Bundesminister für Forschung und Technologie,
Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1979

- /7/ SCHULZE, K.W.; DAMES, J.; LANGE, H.:
Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten.
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 189,
1975
- /8/ JOHANSSON, G.; RUMAR, K.:
Drivers' Brake Reaction Times.
Human Factors, 1971, 13(1), S.23-27
- /9/ DEWAR, R.E., ELLS, I.G., MUNDY, G.:
Reaction Time as an Index of Traffic Sign
Perception.
Human Factors, 1976, 18(4), S.381-392
- /10/ GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R.W.:
Nonlinear Follow-The-Leader-Models of Traffic
Flow.
Operations Research, Vol. 9, No. 4, 1961
- /11/ MICHAELS, R.M.:
Perceptual Factors in Car Following.
Proceedings of the Second International Symposium - Theory of Traffic Flow 1963, OECD,
Paris, 1965
- /12/ TODOSIEV, E.P.:
The Action-Point Model of the Driver-Vehicle-System.
Ohio State University, Engineering Experiment
Station, Rept. No. 202A-3, 1963
- /13/ WIEDEMANN, R.:
Simulation des Straßenverkehrsflusses.
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen
der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974

- /14/ REUSCHEL, A.:
Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleich-
förmig beschleunigtem oder verzögertem Leit-
fahrzeug.
Zeitschrift des Österr. Ing.- und Arch.-Vereins,
1950
- /15/ WHITE, W.:
Backward Waves in Highway Traffic Jams.
Proceedings of the IRE, 1957
- /16/ CHANDLER, R.E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E.W.:
Traffic Dynamics: Studies in Car-Following.
Operations Research, Vol. 6, Nr. 2, 1958
- /17/ HERMAN, R.; MONTROLL, E.W.; POTTS, R.B.;
ROTHERY, R.W.:
Traffic Dynamics: Analysis of Stability
in Car-Following.
Operations Research, Vol. 7, Nr. 1, 1959
- /18/ GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; POTTS, R.B.:
Car-Following Theory of Steady-State Traffic
Flow.
Operations Research, Vol. 7, Nr. 4, 1959
- /19/ EDIE, L.C.:
Car-Following of Steady-State Theory for
Noncongested Traffic
Operations Research, Vol. 9, Nr. 1, 1961
- /20/ ROTHERY, R.W.; SILVER, R.; HERMAN, R.:
Analysis of Experiments on Single-Lane Bus
Flow.
Operations Research, Vol. 12, Nr. 6, 1964

- /21/ KOMETANI, E.; SASAKI, T.:
Dynamic Behaviour of Traffic with a Non-Linear
Spacing-Speed Relationship.
Theory of Traffic Flow, Elsevier, New York, 1961
- /22/ DÖHLER, M.:
Straßenverkehrsuntersuchungen mittels photo-
grammetrischer Verfahren und elektronischer
Datenverarbeitung.
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 52,
1966
- /23/ TREITERER, J, TAYLOR, J.I.:
Traffic Flow Investigations by Photogrammetric
Techniques.
Highway Research Report 142, 1966
- /24/ CONSTANTINE, T.; YOUNG, A.P.:
Traffic Dynamics: Car-Following Studies.
Traffic Engineering and Control 8, 1966/67, 9
- /25/ HOEFS, D.H.:
Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeug-
kolonnen.
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik,
Heft 140, 1972
- /26/ KÖHLER, U.:
Stabilität von Fahrzeugkolonnen.
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrs-
wesen der Universität (TH) Karlsruhe,
Heft 9, 1974
- /27/ VOSS, M.:
Felderprobung autarker Abstandswarnsysteme -
Ergonomische Beurteilung.
Fraunhofer Gesellschaft - Institut für Informa-
tions- und Datenverarbeitung, Bericht Nr. 9452,
Karlsruhe 1979

- /28/ WINZER, T.:
Beschleunigungsverteilungen von Fahrzeugen auf
zweispurigen BAB-Richtungsautobahnen.
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 319,
1980
- /29/ MONTROLL, E.W.:
Acceleration Noise and Clustering Tendency of
Vehicular Traffic.
In: Theory of Traffic Flow, Elsevier, New York,
1961
- /30/ MAY, A.; KELLER, H.E.M.:
Evaluation of Single- and Multi-Regime Traffic
Flow Models.
IV. Int. Symp. über die Theorie des Verkehrs-
flusses in Karlsruhe, Straßenbau und Straßenver-
kehrstechnik, Heft 86, 1969
- /31/ TREITERER, J.:
Some Aspects of the Stability of Traffic Flow.
IV. Int. Symp. über die Theorie des Verkehrs-
flusses in Karlsruhe, Straßenbau und Straßenver-
kehrstechnik, Heft 86, 1969
- /32/ -
Großes Handbuch der Mathematik.
Buch und Zeit Verlagsgem. m.b.H. Köln, 1969
- /33/ LEUTZBACH, W.:
Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses.
Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York,
1972
- /34/ JAHNKE, C.-D.:
Untersuchungen zur Kolonnenstabilität mit Ab-
standswarnsystemen
Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und
Straßenverkehr - Forschungsbilanz 1980.
Bundesminister für Forschung und Technologie,
Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1980

- /35/ LÄTZSCH, L.; BERTHOLD, J.:
Verkehrsverhalten und Sicherheitsabstände bei
Kolonnenverkehr auf Autobahnen
Die Strasse, Heft 2, 1980
- /36/ -
Die Schrecksekunde ist zu kurz
ADAC-Motorwelt, Heft 12, 1979
- /37/ ZOMOTOR, A.:
Verhalten eines Fahrerkollektivs in Notsituationen
Polizei-Technik-Verkehr, Märzheft 1980
- /38/ WEHNER, B.:
Versuchsstrecke Billerbeck, Griffigkeitsmessungen -
Herbst 1966 und Zusammenfassung aller bisherigen
Meßergebnisse, Berlin 1968
- /39/ TREITERER, J.; HORN, B.E.:
Untersuchungen zur Verkehrssicherheit bei Kolonnen-
fahrten
Straßenverkehrstechnik, Heft 9/10, 1967
- /40/ MARTIN, W.:
Untersuchungen über die Möglichkeit, Verkehrsstärke-
erhebungen im Rahmen städtischer bzw. regionaler
Verkehrsplanungen durch Verkehrsdichteerhebungen
zu ersetzen
Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr
G-5 (16/67), Karlsruhe 1969
- /41/ COERS, H.G.:
Zum Charakter des Straßenverkehrsflusses
Die Strasse, Heft 6, 1970

/42/ -

Das Fundamentaldiagramm - Eine Zusammenstellung
bisheriger Erkenntnisse

Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen,
Kirschbaum Verlag, Heft 89, 1973

/43/ LEUTZBACH, W.; STEIERWALD, G.:

Erwartete Verbesserungen des Verkehrsablaufs
und der Unfallbilanz durch autarke Abstands-
warnsysteme

Proceedings of the International Symposium on
Traffic and Transportation Technologies,
Volume CI, BMFT, Bonn 1979

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 2.1: Phasen der Entstehung und Auflösung einer Kolonne aus zwei Fahrzeugen
- Abb. 2.2: Beispiele unterschiedlicher Stabilitätsfälle
- Abb. 2.3: Bereiche kolonnenstabiler und -instabiler Abstände
- Abb. 3.1: Blockschaltbild Abstandswarnradar FM/CW-Verfahren - Quelle: /5/ Seite 551
- Abb. 3.2: Blockschaltbild Abstandswarnradar Pulsverfahren - Quelle: /6/ Seite 181
- Abb. 3.3: Funktionsprinzip autarkes Abstandswarnradar
- Abb. 3.4: Eingebaute Radarsensoren in Versuchsfahrzeugen
- Abb. 3.5: Realisierungen der optischen Anzeigen
- Abb. 3.6: Skizze der realisierten AWS-Anzeigen (nicht maßstabsgetreu) - Quelle: /27/ Seite 11
- Abb. 3.7: Meßwerte und Zustandsgrößen der Datenaufzeichnung
- Abb. 3.8: Blockschaltbild der Datenaufzeichnung - Quelle: /5/ Seite 592
- Abb. 3.9: Installierte Datenaufzeichnung - Quelle: /6/ Seite 173
- Abb. 3.10: Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsdifferenz
- Abb. 3.11: Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit und konstanter Geschwindigkeitsdifferenz
- Abb. 3.12: Fahrprofile des Führungsfahrzeugs - Quelle: /3/

- Abb. 3.13: Versuchsstrecke Hockenheim-Ring - Quelle: Hockenheim-Ring GmbH
- Abb. 3.14: Versuchsumfang der Kolonnenfahrten
- Abb. 3.15: Beispiel der vorliegenden Meßdaten (Auszug aus Fahrtdatensatz)
- Abb. 3.16: Normierung der Geschwindigkeiten der Folgefahrzeuge 2 bis 7
- Abb. 3.17: Relative Fehlerschranken der Eigengeschwindigkeit und des Abstandes sowie der Geschwindigkeitsdifferenz
- Abb. 3.18: Mittlere Fehler der Abstands-, Geschwindigkeits- sowie Geschwindigkeitsdifferenzmessung
- Abb. 4.1: Geschwindigkeitganglinien der Fahrprofile 1, 2 und 3
- Abb. 4.2: Geschwindigkeitganglinien der Fahrprofile 4 und 5
- Abb. 4.3: Ganglinien der Nettoabstände Profil 4A
- Abb. 4.4: Ganglinien der Nettoabstände Profil 5A
- Abb. 4.5: Ganglinien der kumulierten Abstände Profil 4A
- Abb. 4.6: Ganglinien der kumulierten Abstände Profil 5A
- Abb. 4.7: Abstände in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit
- Abb. 4.8: Istabstand minus Sollabstand in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit
- Abb. 4.9: Abstandsverhalten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz
- Abb. 4.10: Dynamische Änderung von Abständen über der Eigengeschwindigkeit Profil 5A
- Abb. 4.11: Dynamische Änderung von Abständen über der Eigengeschwindigkeit Profil 4A

- Abb. 4.12: Istabstand minus Sollabstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz
- Abb. 4.13: Kenngrößen v , s , V und ACN der Fahrzeuge 1 bis 7 - Fahrt 12
- Abb. 4.14: Mittlere Geschwindigkeiten \bar{v} , Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit V und Beschleunigungsrauschen ACN
- Abb. 4.15: Variationskoeffizienten V der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrzeugstelle
- Abb. 4.16: Beschleunigungsrauschen ACN in Abhängigkeit von der Fahrzeugstelle
- Abb. 4.17: "Kongruente" Geschwindigkeitsganglinien des Führungsfahrzeugs (Profil 1 bis 3)
- Abb. 4.18: "Kongruente" Geschwindigkeitsganglinien des Führungsfahrzeugs (Profile 4A und 5A)
- Abb. 4.19: Mittlere Abweichung der Variationskoeffizienten ($\overline{\Delta V}$) bezogen auf das Führungsfahrzeug und in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition in der Kolonne
- Abb. 4.20: Mittleres Beschleunigungsrauschen in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition in der Kolonne
- Abb. 4.21: Zeitliche Fahrtabgrenzungen zur Optimierung nach der Fahrzeugefolgegleichung
- Abb. 4.22: Absolute Häufigkeitsverteilung der Restabweichung R
- Abb. 4.23: Relative Häufigkeitsverteilung der Restabweichung R
- Abb. 4.24: Restabweichungen in Abhängigkeit vom Beschleunigungsrauschen
- Abb. 4.25: Häufigkeiten des Parameters m
- Abb. 4.26: Häufigkeiten des Parameters l
- Abb. 4.27: Verteilung der Parameter m und l
- Abb. 4.28: Häufigkeiten des Reaktionszeitparameters τ

- Abb. 4.29: Häufigkeiten der Proportionalitätskonstanten λ
- Abb. 4.30: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie A
- Abb. 4.31: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie B
- Abb. 4.32: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie C
- Abb. 4.33: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie D
- Abb. 4.34: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - alle Strategien
- Abb. 4.35: Fahrerabhängige τ -Werte
- Abb. 4.36: Systemabhängige τ -Werte
- Abb. 4.37: Mittlere Parameter m und l der Strategien A, B und C
(desgleichen von anderen Autoren)
- Abb. 4.38: Hauptprogrammablauf von FOLGE
- Abb. 4.39: Programmablauf von FOBE
- Abb. 4.40: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 9 - individuelle Parameter
- Abb. 4.41: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 9 - allgemeine Parameter
- Abb. 4.42: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 18 - individuelle Parameter
- Abb. 4.43: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 18 - allgemeine Parameter
- Abb. 4.44: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 5 - allgemeine Parameter

- Abb. 4.45: Abstandsgrenzkurven und Grenzkurven stabiler Abstände
- Abb. 4.46: Hauptprogrammablauf von STABIL
- Abb. 4.47: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
Fahrt 18 - Strategie B - Profil 5A
- Abb. 4.48: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
Fahrt 4 - Strategie C - Profil 5A
- Abb. 4.49: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
Fahrt 5 - Strategie A - Profil 4A
- Abb. 4.50: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
Fahrt 16 - Strategie D - Profil 4A
- Abb. 4.51: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
Fahrt 5 - Strategie A - Profil 2A
- Abb. 4.52: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile
- Abb. 4.53: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile der Einstellungen A, B und C
- Abb. 4.54: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile der Profile 1 bis 3 mit und ohne Systeminformation
- Abb. 4.55: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile der Profile 4 und 5 mit und ohne Systeminformation
- Abb. 4.56: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile aller Fahrten mit und ohne Systeminformation
- Abb. 4.57: Stabile Fahrtanteile mit und ohne Abstandsinformation
- Abb. 4.58: Prinzipskizze zur Erläuterung der instabilen Fläche

- Abb. 4.59: Funktionale Herleitung der instabilen Fläche über die Zeit
- Abb. 4.60: Grafische Darstellung der Ermittlung der instabilen Kolonnenfläche
- Abb. 4.61: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
Fahrt 12 - Strategie A - Profil 5A
- Abb. 4.62: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
Fahrt 18 - Strategie B - Profil 5A
- Abb. 4.63: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
Fahrt 5 - Strategie A - Profil 4A
- Abb. 4.64: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
Fahrt 10 - Strategie A - Profil 5A
- Abb. 4.65: Stabilitätsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit
- Abb. 4.66: Abstandsänderungen durch Parametervariation von l und m
- Abb. 4.67: Stör- und Wirkgrößenänderungen bei Parametervariationen von l und m
- Abb. 4.68: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe - Anfangsabstand = 30 m
- Abb. 4.69: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe - Anfangsabstand = 40 m
- Abb. 4.70: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe - Anfangsabstand = 50 m
- Abb. 4.71: Simulierte Geschwindigkeitsverläufe bei Variation des Reaktionszeitparameters
- Abb. 4.72: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination A; (Anfangsabstand = strategieabh. Sollabstand)

- Abb. 4.73: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination B;
(Anfangsabstand = strategieabh. Sollabstand)
- Abb. 4.74: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination C;
(Anfangsabstand = strategieabh. Sollabstand)
- Abb. 4.75: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination A;
(Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)
- Abb. 4.76: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination B;
(Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)
- Abb. 4.77: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination C;
(Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)
- Abb. 4.78: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination D;
(Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)
- Abb. 4.79: Wirkungsdauer und Wirkgrößenzunahmen der Strategien A bis D
- Abb. 5.1: Qualitative Darstellung der Akzeptanz- und Sicherheitsproblematik
- Abb. 5.2: Mindestabstände bei minimaler und absoluter Sicherheit
- Abb. 5.3: Kollisionsgeschwindigkeiten für verschiedene Sicherheitsfaktoren kleiner 1.0
($t_R = 1s$)
- Abb. 5.4: Kollisionsgeschwindigkeiten der Strategieeinstellungen A, B und C bei verschiedenen Sicherheitsfaktoren < 1
- Abb. 5.5: Kollisionsgeschwindigkeiten der Strategieeinstellungen A, B und C für die Sicherheitsfaktoren $\delta = 0.5$ und $\delta = 0.9$

- Abb. 5.6: Mittlere Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - Alle Folgesituationen
- Abb. 5.7: Beispielhafter Verlauf des Sicherheitsfaktors δ und der Geschwindigkeit v_2 des Folgefahrzeugs
- Abb. 5.8: Beispielhafter Verlauf des Sicherheitsfaktors δ während der Beschleunigungs- und Verzögerungsabschnitte von Profil 4A
- Abb. 5.9: Mittlere Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - Schließvorgänge
- Abb. 5.10: Mittlere Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - Schließvorgänge - bei einheitlicher Reaktion im Gefahrenfall
- Abb. 6.1: Kolonnendichten der Strategien A, B, C und D in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Kolonne
- Abb. 6.2: Kolonnenstärken der Strategien A, B, C und D in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Kolonne
- Abb. 6.3: Kolonnenstärken in Abhängigkeit von der Kolonnendichte
- Abb. 6.4: Veranschaulichung der strategieabhängigen Versetzung der Einfahrzeitpunkte an einer Meßstelle
- Abb. 6.5: Fundamentaldiagramme der Fahrspur
- Abb. 6.6: Fundamentaldiagramme der Überholspur

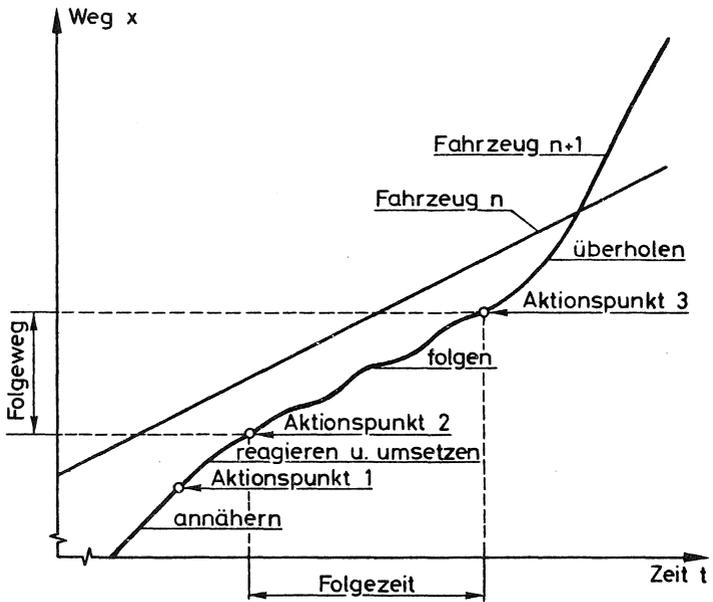


Abb. 2.1: Phasen der Entstehung und Auflösung einer Kolonne aus zwei Fahrzeugen

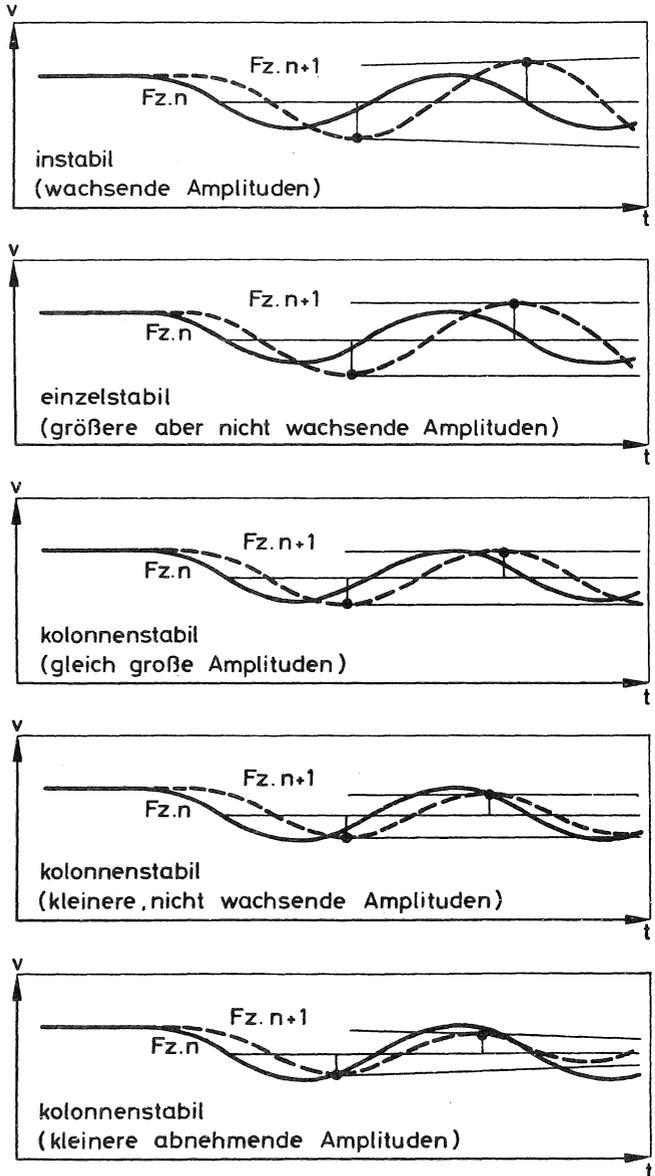


Abb. 2.2: Beispiele unterschiedlicher Stabilitätsfälle

1 Absolut sicherer Abstand: $\Delta x_{\min} = \frac{v_{n+1}^2}{2b_{n+1}} + v_{n+1} \cdot t_R$

mit $b_{n+1} = 5.0 \text{ m/s}^2$; $t_R = 0.5 \text{ s}$

2 Relativ sicherer Abstand: $\Delta x_{\min} = \frac{v_{n+1}^2}{2b_{n+1}} - \frac{v_n^2}{2b_n} + v_{n+1} \cdot t_R$

mit $b_{n+1} = 5.0 \text{ m/s}^2$; $b_n = 7.5 \text{ m/s}^2$;
 $t_R = 0.5 \text{ s}$

3 Stabilitätskriterium: $\Delta x_{\min} = (2 \cdot \lambda_{1,m} \cdot \tau \cdot v_{n+1}^m)^{1/l}$

mit $\lambda_{1,m} = 1.61$; $m = 0.2$; $l = 0.5$

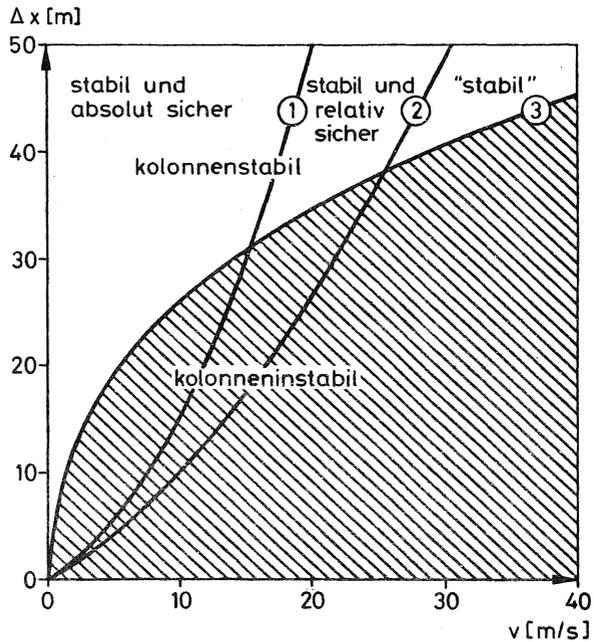


Abb. 2.3: Bereiche kolonnenstabiler und -instabiler Abstände

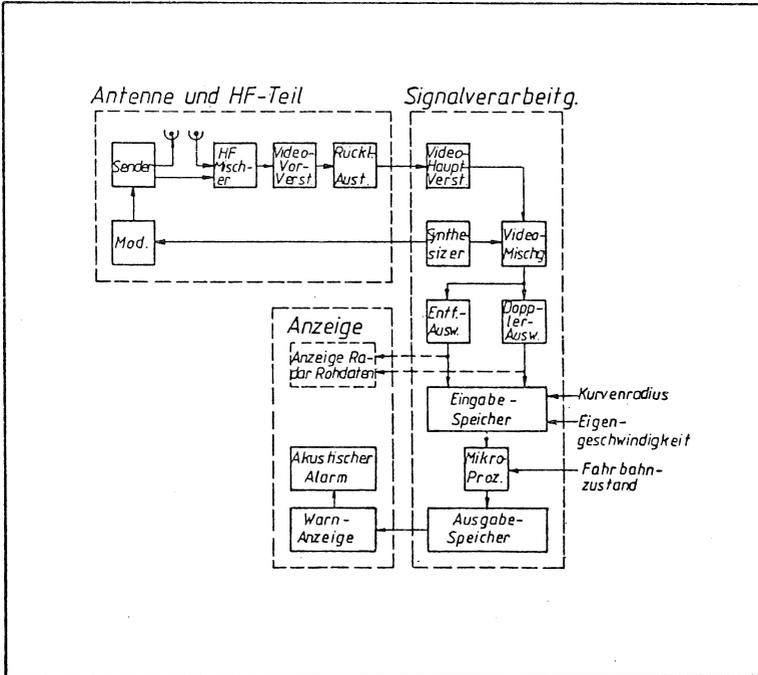


Abb. 3.1: Blockschaltbild Abstandswarnradar FM/CW-Verfahren - Quelle: /5/ Seite 551

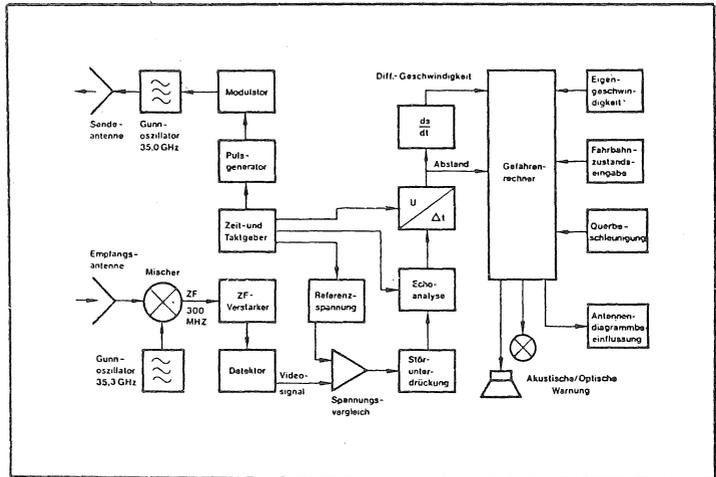


Abb. 3.2: Blockschaltbild Abstandswarnradar Pulsverfahren - Quelle: /6/ Seite 181

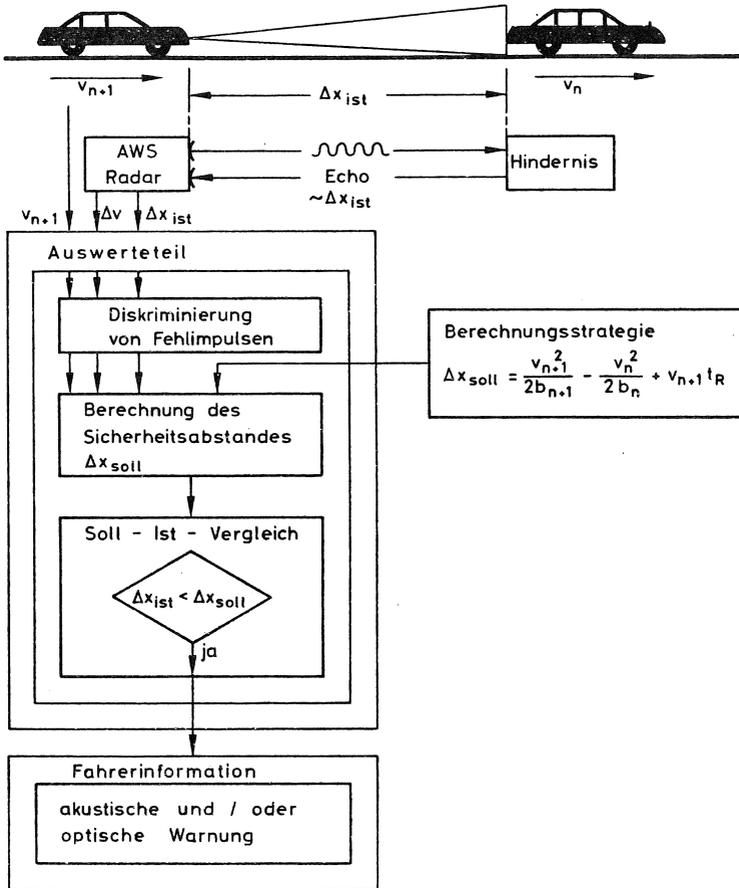
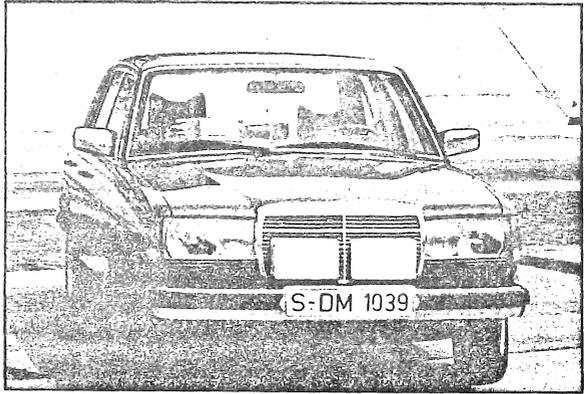


Abb. 3.3: Funktionsprinzip autarkes Abstandswarnradar



a. Quelle: /6/ Seite 170

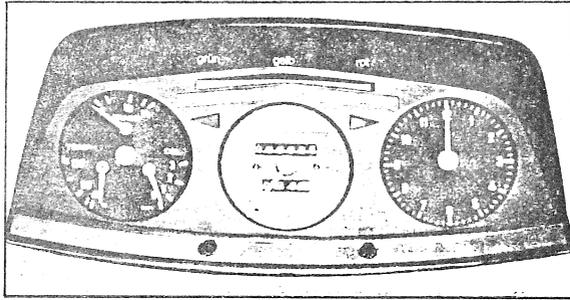


b. Quelle: /6/ Seite 180

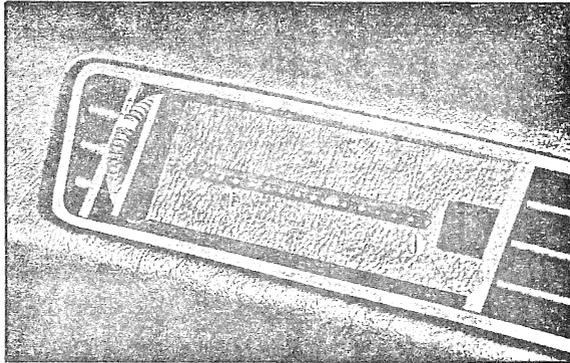


c. Quelle: /5/ Seite 568

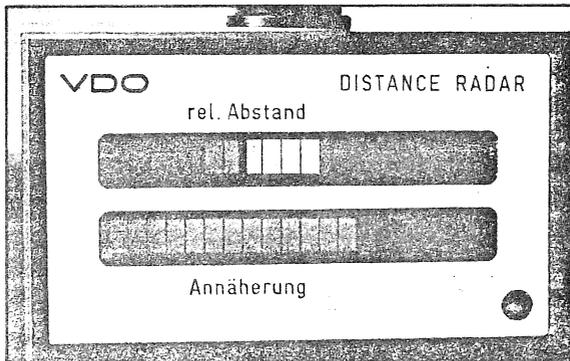
Abb. 3.4: Eingebaute Radarsensoren in Versuchsfahrzeugen



a. Quelle: /5/ Seite 561



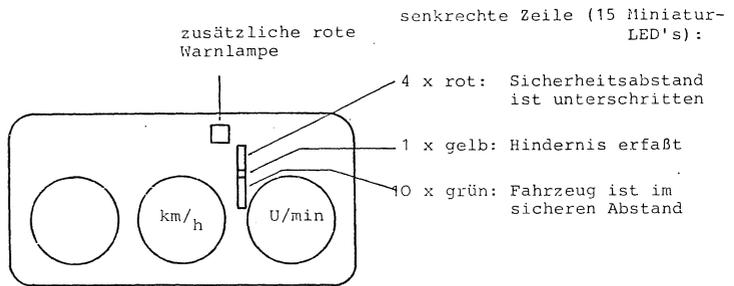
b. Quelle: /5/ Seite 571



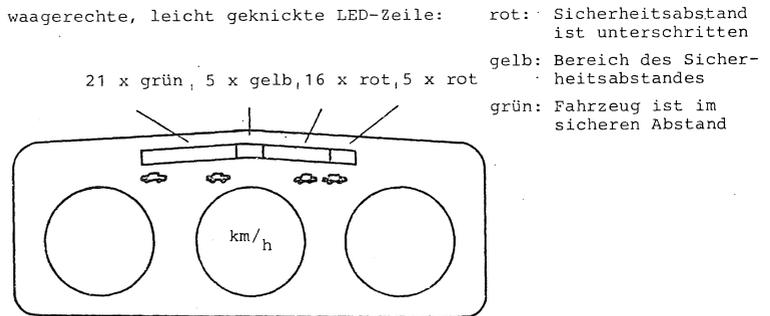
c. Quelle: /6/ Seite 182

Abb. 3.5: Realisierungen der optischen Anzeigen

a) Bosch/AEG-Telefunken: im Anzeigenfeld eingebaut



b) Daimler-Benz/SEL: im Anzeigenfeld eingebaut



c) VDO: separates, seitlich angebrachtes Kästchen

2 waagerechte LED-Zeilen á 20 LED's; obere Zeile:

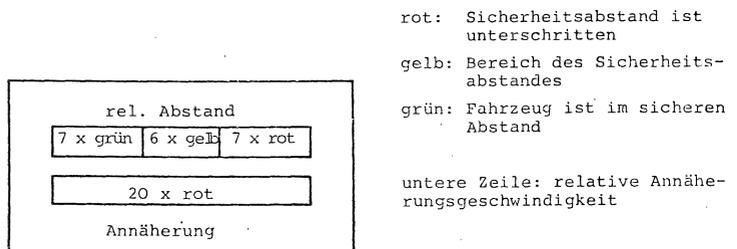


Abb. 3.6: Skizze der realisierten AWS-Anzeigen (nicht maßstabsgetreu) - Quelle: /27/ Seite 11

Meßwert bzw. Zustandsgröße	Formelzeichen	EDV-Symbol	Dimension
Eigengeschwindigkeit*)	v	VE	km/h
Geschwindigkeitsdifferenz*)	Δv	VD	km/h
Istabstand*)	Δx_{ist}	IA	m
Sollabstand*)	Δx_{soll}	SA	m
Weg*)	x	WEG	100 m
Uhrzeit, Datum*)	t	ST,MI,SE, TAG	0.1 s
Quereschleunigung	b_q	BQ	0.1 m/s ²
Längsbeschleunigung	b_l	BL	0.1 m/s ²
Vertikalbeschleunigung	b_v	BV	0.1 m/s ²
Lenkradeinschlag	γ	LNK	1 grd

Zündung*)		ZU	
Licht		LI	
Nebelleuchte		NE	
Wischer		WI	
Außentemperatur < 0°C		TEM	
Fahrtrichtungsanzeige links		BLL	
Fahrtrichtungsanzeige rechts		BLR	
Bremslicht*)		BR	
Alarm*)		AL	
Alarm und $\Delta v > 15$ km/h		AAL	
Zielerkennung		ZIE	
Zielgültigkeit		ZIG	
Fahrerkommentar		KOM	
*) Meßwerte und Zustandsgrößen, die in allen Versuchsfahrzeugen aufgezeichnet wurden			

Abb. 3.7: Meßwerte und Zustandsgrößen der Datenaufzeichnung

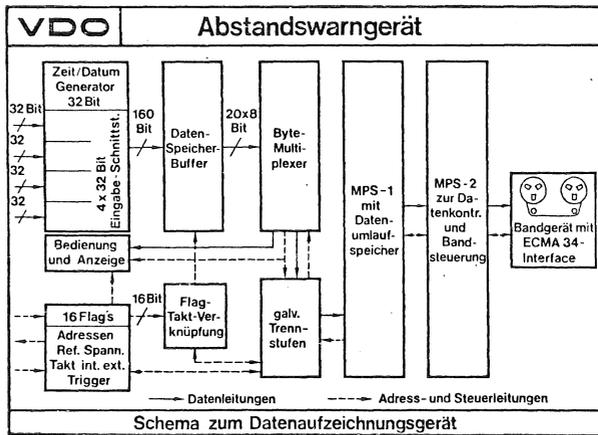


Abb. 3.8: Blockschaltbild der Datenaufzeichnung - Quelle: /5/ Seite 592

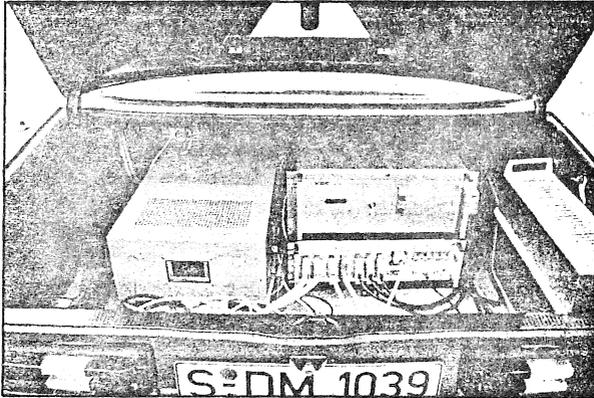
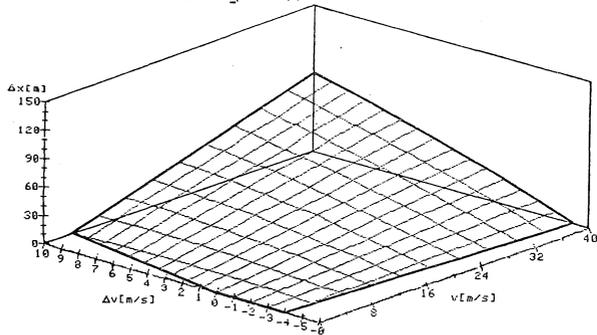
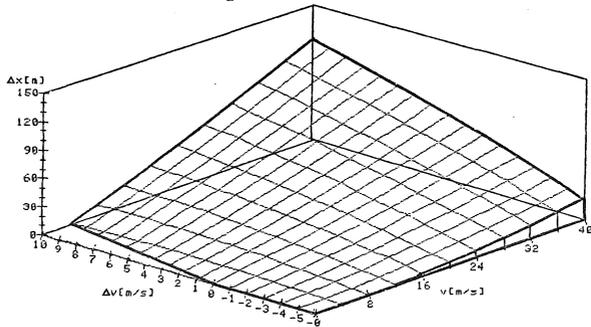


Abb. 3.9: Installierte Datenaufzeichnung
Quelle: /6/ Seite 173

Sicherheitsabstand $\Delta x = f(v, \Delta v)$
 Strategie A



Sicherheitsabstand $\Delta x = f(v, \Delta v)$
 Strategie B



Sicherheitsabstand $\Delta x = f(v, \Delta v)$
 Strategie C

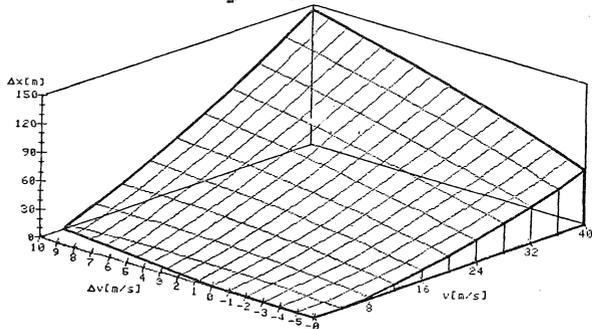


Abb. 3.10: Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsdifferenz

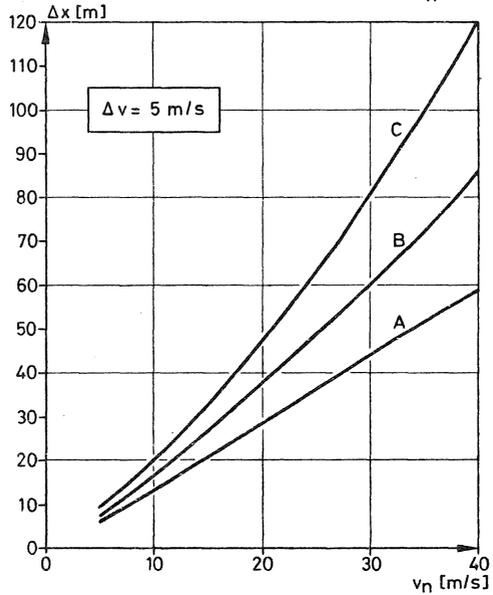
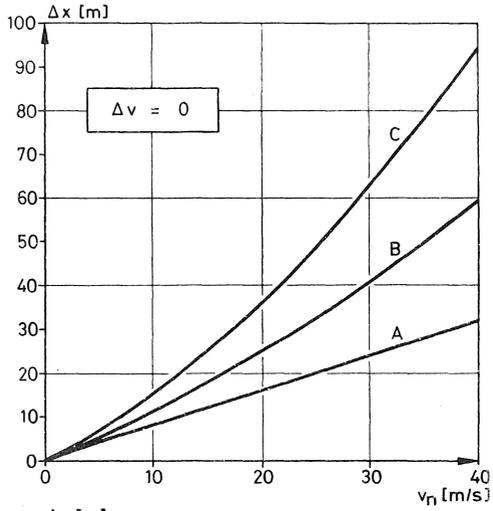


Abb. 3.11: Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit und konstanter Geschwindigkeitsdifferenz

Geschw. des Führungsfahrzeugs
km/h

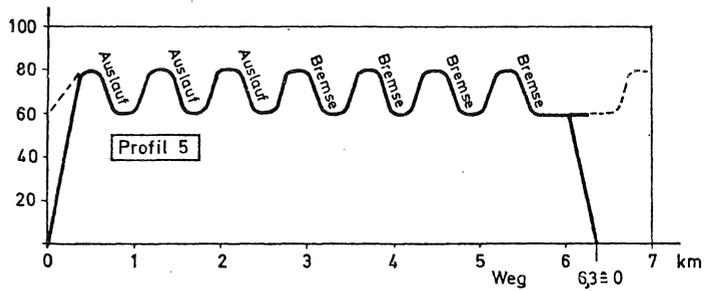
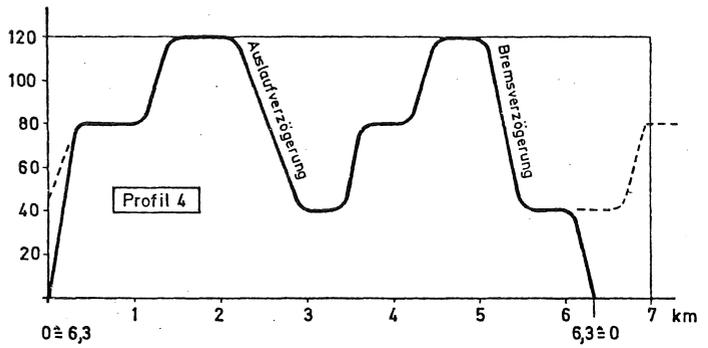
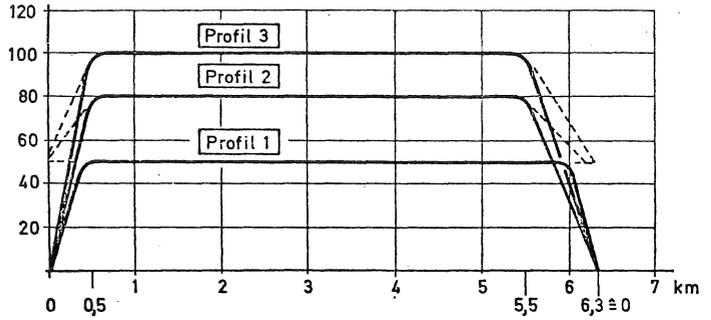


Abb. 3.12: Fahrprofile des Führungsfahrzeugs
Quelle: /3/

MOTODROM HOCKENHEIM

M · 1 : 15000

STRECKENÜBERSICHT

GRAND-PRIX-KURS 6,78861 KM.

KLEINER RENN-KURS 2,63439 KM.

ZEICHENERKLÄRUNG

- V Verwaltung
- F Fahrerlager
- RD Renndienste
- B Boxen
- S/Z Start u. Ziel
- P Polizei, Sanitätsdienst
Feuerwehr
- H.TR Haupttribüne
- N.TR Nordtribüne
- S.TR Südtribüne
- I.TR. Innentribüne
- G Gaststätte
- HM Hotel Motodrom
- P Parkplatz

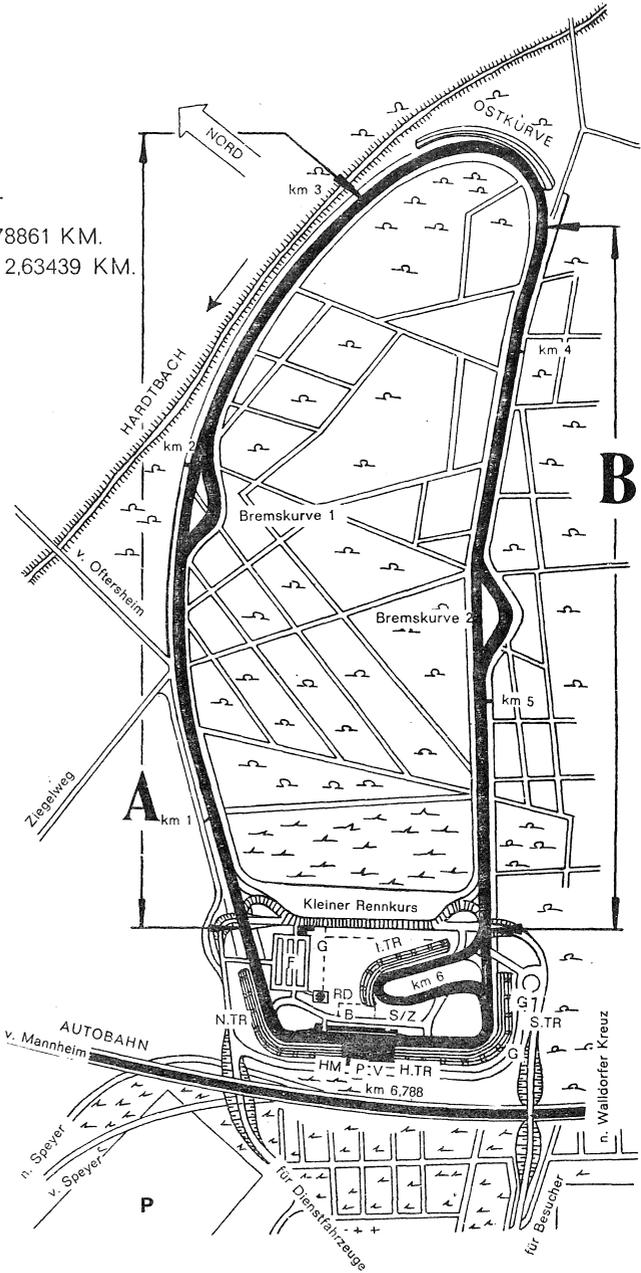


Abb. 3.13: Versuchsstrecke Hockenheim-Ring
Quelle: Hockenheim-Ring GmbH

Fahrt-Nr.	Runden-Nr.	Strategie	Fahrprofil	Fahrzeugreihenfolge
1*)	01 - 02	B	3 + 5	1 - 7 - 5 - 2 - 6 - 4 - 3
2*)	03 - 04	B	2 + 5	1 - 3 - 4 - 7 - 2 - 5 - 6
3*)	05 - 06	D	4 + 3	1 - 2 - 5 - 7 - 6 - 4 - 3
4	07 - 08	C	5 + 1	1 - ⑤ - 7 - 4 - 3 - 2 - 6
5	09 - 10	A	2 + 4	1 - 4 - 2 - 3 - 6 - ⑤ - 7
6	11 - 12	D	5 + 3	1 - 6 - ⑤ - 3 - 4 - 2 - 7
7	13 - 14	D	2 + 5	1 - ⑤ - 6 - 7 - 3 - 2 - 4
8	15 - 16	C	4 + 1	1 - ③ - 4 - ⑤ - 7 - 2 - 6
9	17 - 18	D	5 + 4	1 - 3 - 7 - 4 - 2 - 6 - ⑤
10	19 - 20	A	5 + 4	1 - ⑦ - 6 - 3 - 4 - ⑤ - 2
11*)	21 - 22	B	4 + 1	1 - 6 - 3 - 4 - 7 - 2 - 5
12	23 - 24	A	3 + 5	1 - 4 - 2 - 3 - 5 - ⑦ - 6
13	25 - 26	C	4 + 4	1 - 5 - 2 - 6 - 7 - 3 - ④
14	27 - 28	A	3 + 4	1 - 4 - 3 - 6 - 2 - 7 - 5
15	29 - 30	C	4 + 4	1 - 6 - 2 - 5 - ④ - 3 - 7
16	31 - 32	D	4 + 1	1 - 2 - 6 - ④ - 7 - 3 - 5
17	33 - 34	B	4 + 5	1 - 6 - 4 - 2 - 3 - 5 - ⑦
18	35 - 36	B	5 + 4	1 - 3 - 6 - 2 - ⑦ - 4 - 5

*) Diese Fahrten wurden wegen Aufzeichnungsausfällen des Führungsfahrzeugs und mehrerer Folgefahrzeuge nicht ausgewertet.

○ Die Meßwerte dieser Fahrzeuge liegen nicht vor (fehlende bzw. fehlerhafte Aufzeichnung, fehlerhafte Aufbereitung).

Abb. 3.14: Versuchsumfang der Kolonnenfahrten

Zeit /s/	Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs /m/s/										Bremsbetätigung des Führungsfahrzeugs /0.1s/										Geschwindigkeit von Fz. 2 /m/s/										Istabstand von Fz.2 zu Fz.1 /m/										Sollabstand von Fz.2 zu Fz.1 /m/										Bremsbetätigung von Fz.2 /0.1s/										Meßwerte von Fz.2																																							

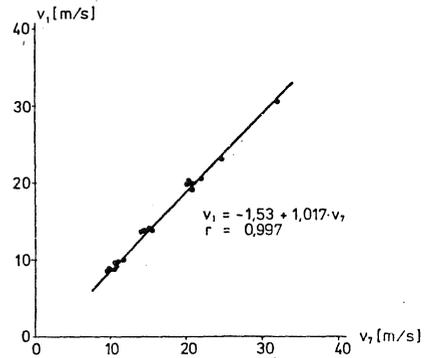
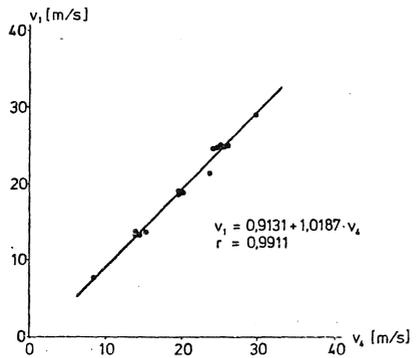
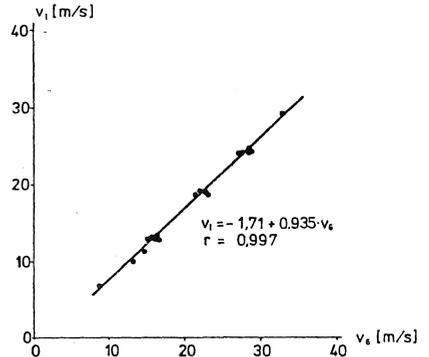
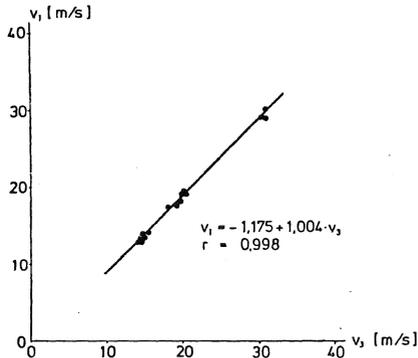
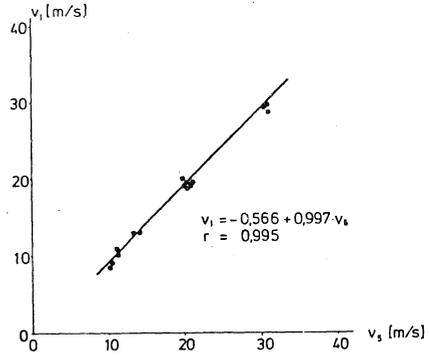
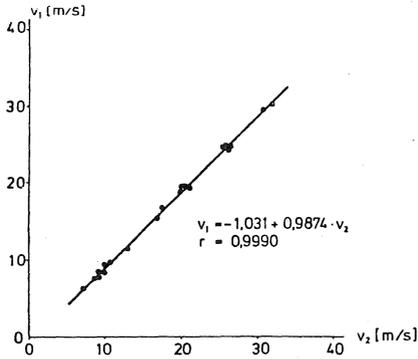


Abb. 3.16: Normierung der Geschwindigkeiten der Folgefahrzeuge 2 bis 7

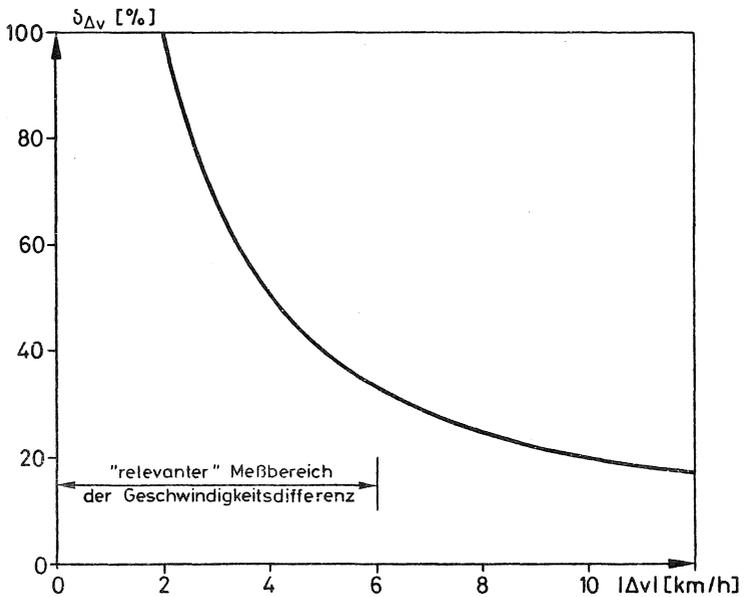
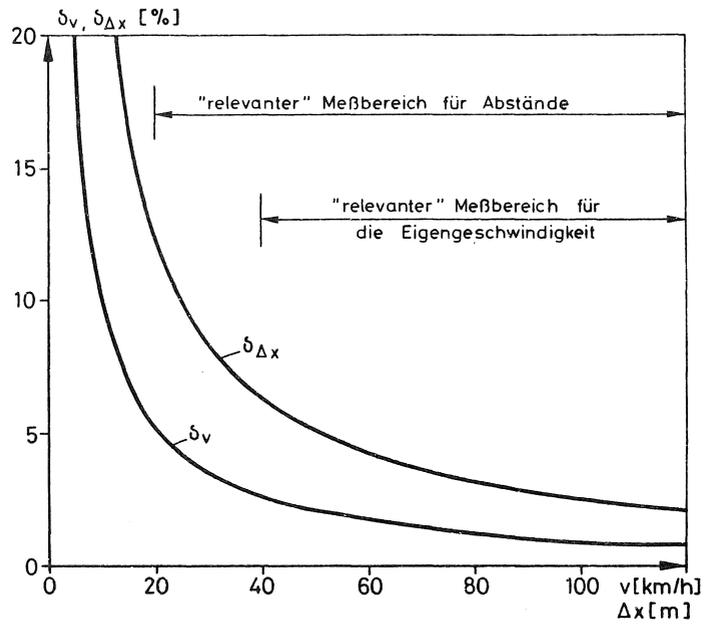


Abb. 3.17: Relative Fehlerschranken δ der Eigengeschwindigkeit und des Abstandes sowie der Geschwindigkeitsdifferenz

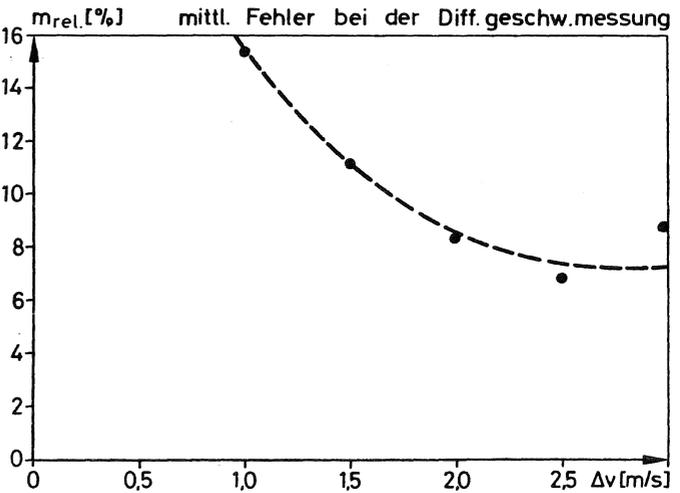
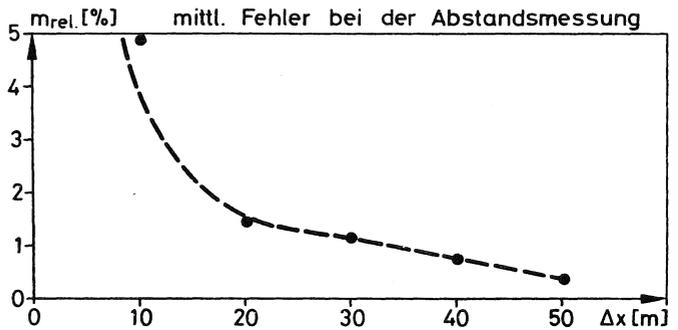
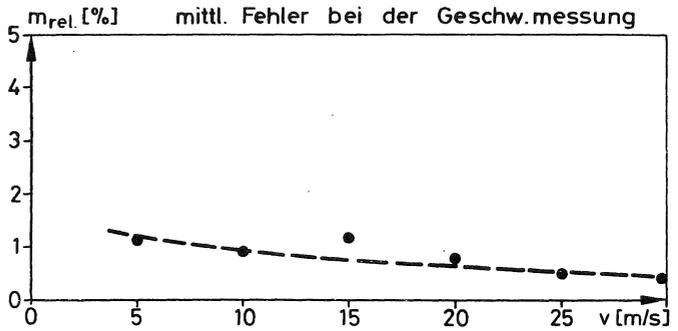


Abb. 3.18: Mittlere Fehler der Abstands-, Geschwindigkeits- sowie Geschwindigkeitsdifferenzmessung

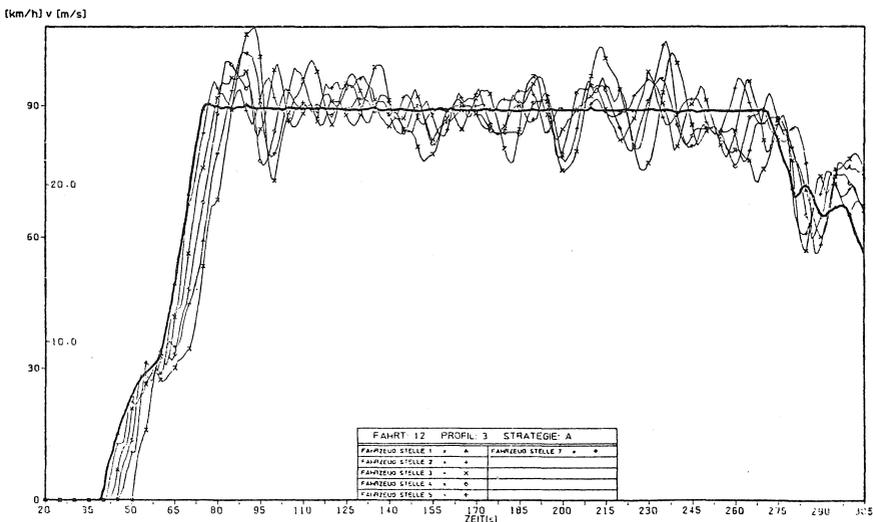
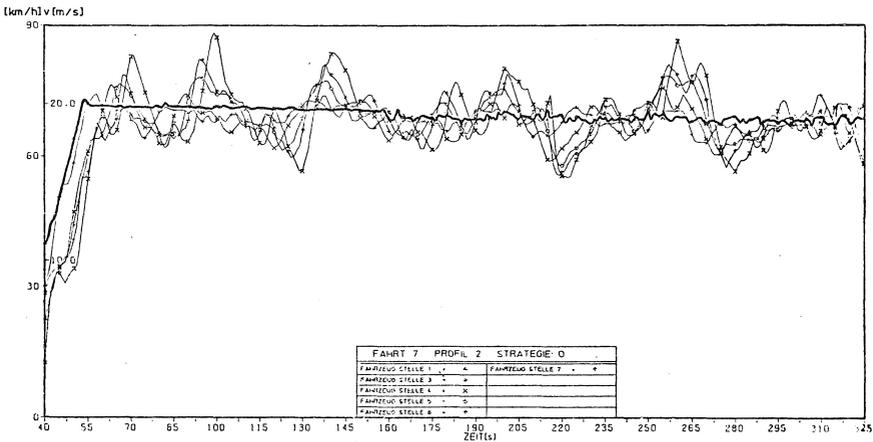
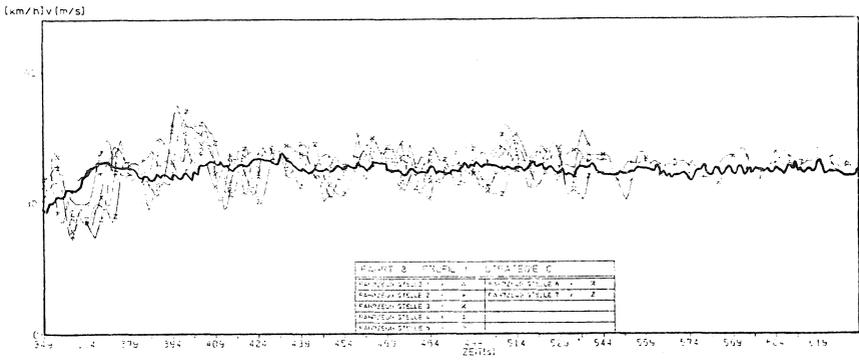


Abb. 4.1: Geschwindigkeitsganlinien der Fahrprofile 1, 2 und 3

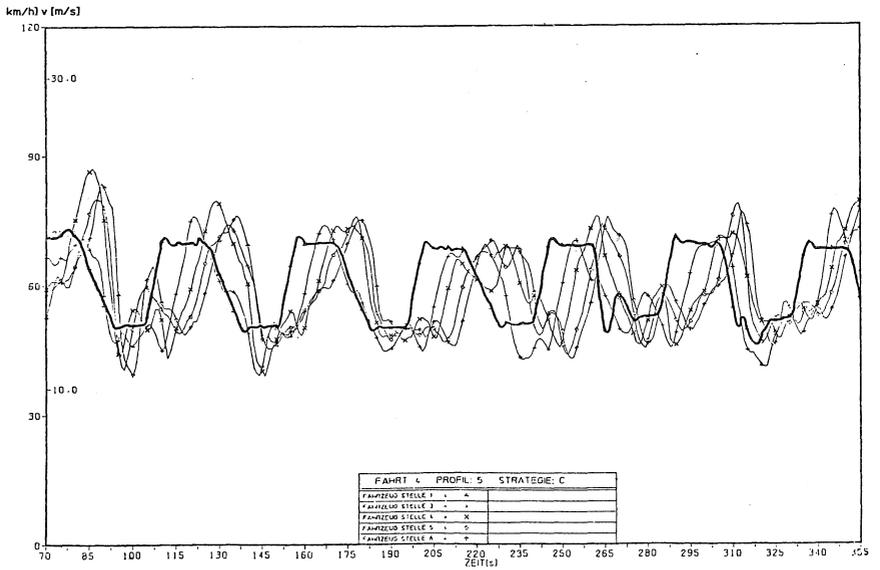
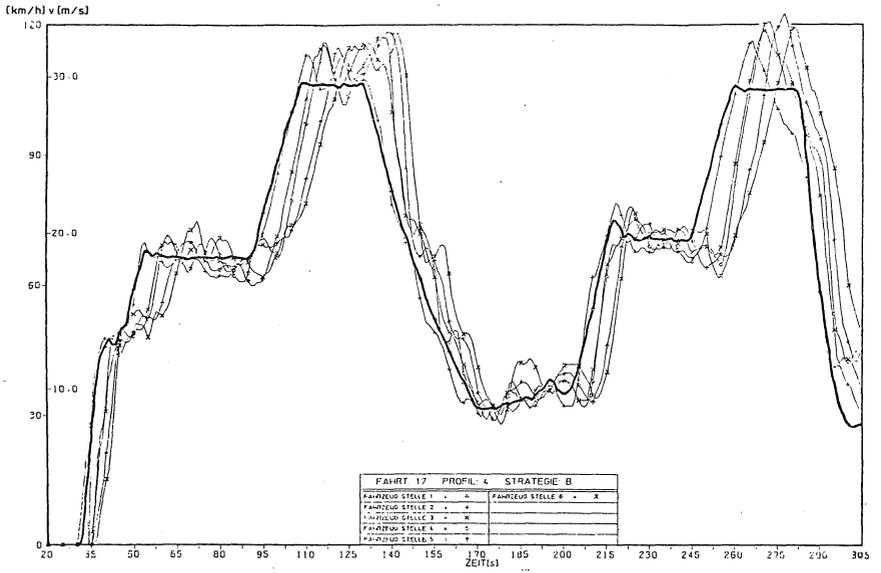


Abb. 4.2: Geschwindigkeitsganglinien der Fahrprofile 4 und 5

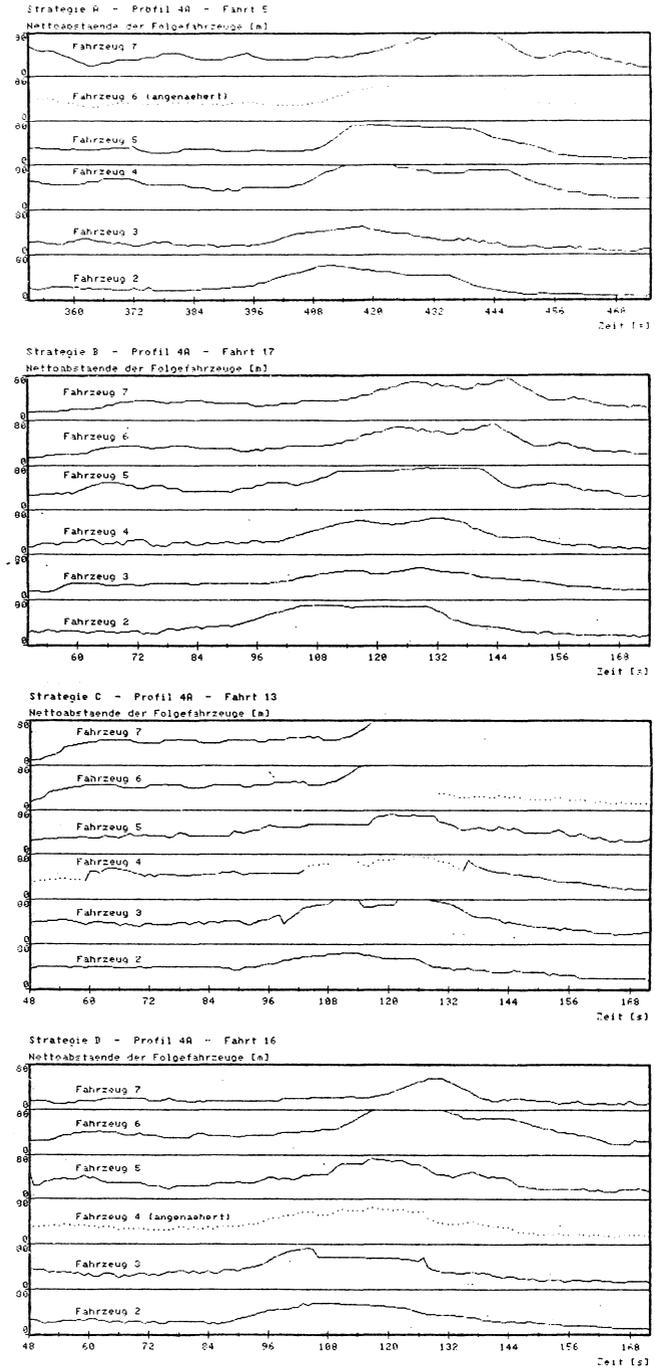


Abb. 4.3: Ganglinien der Nettoabstände
Profil 4A

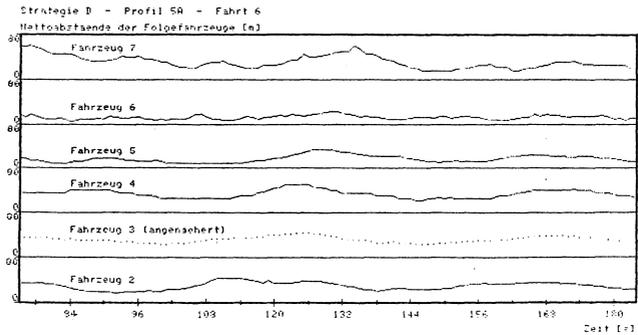
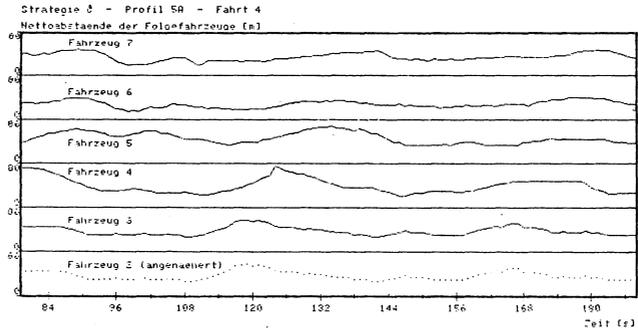
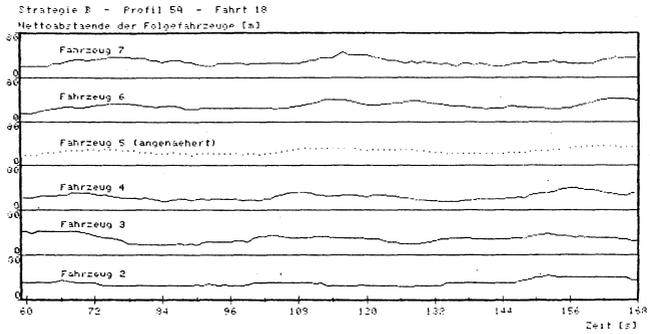
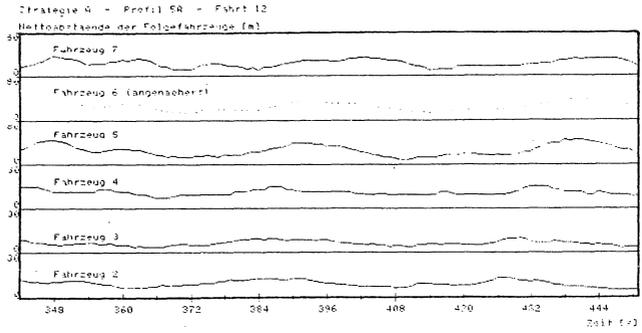


Abb. 4.4: Ganglinien der Nettoabstände
Profil 5A

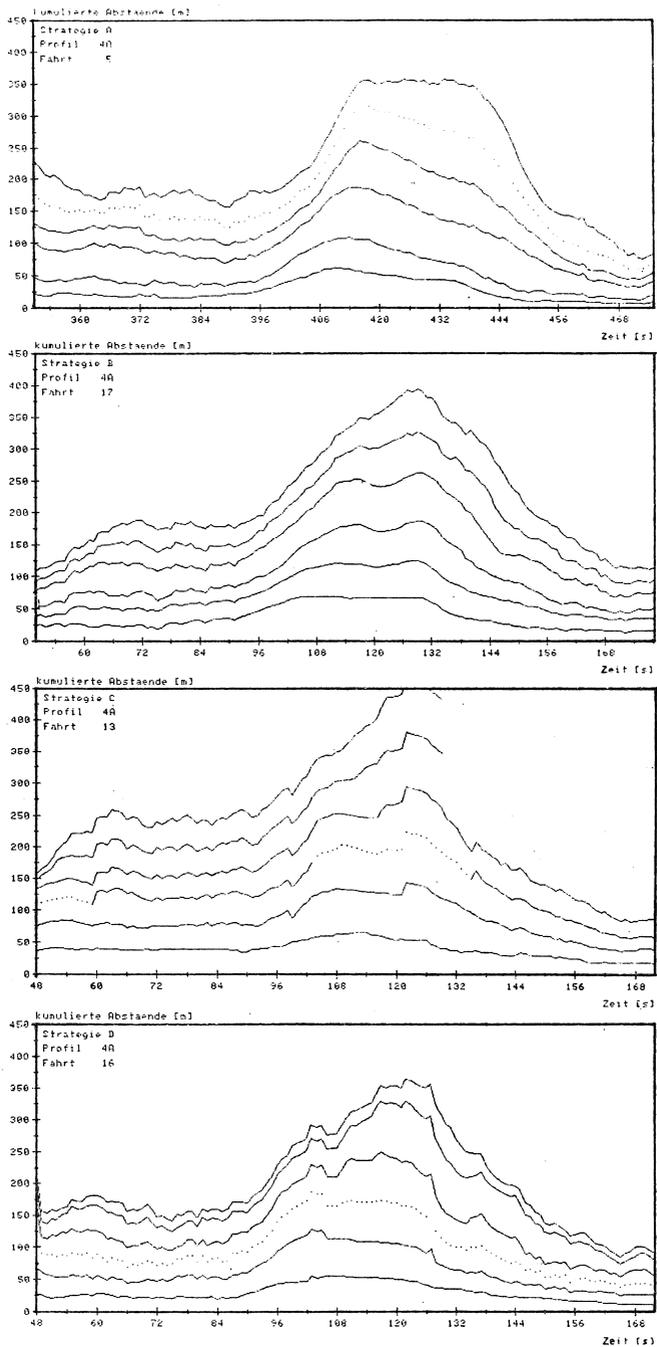


Abb. 4.5: Ganglinien der kumulierten Abstände Profil 4A

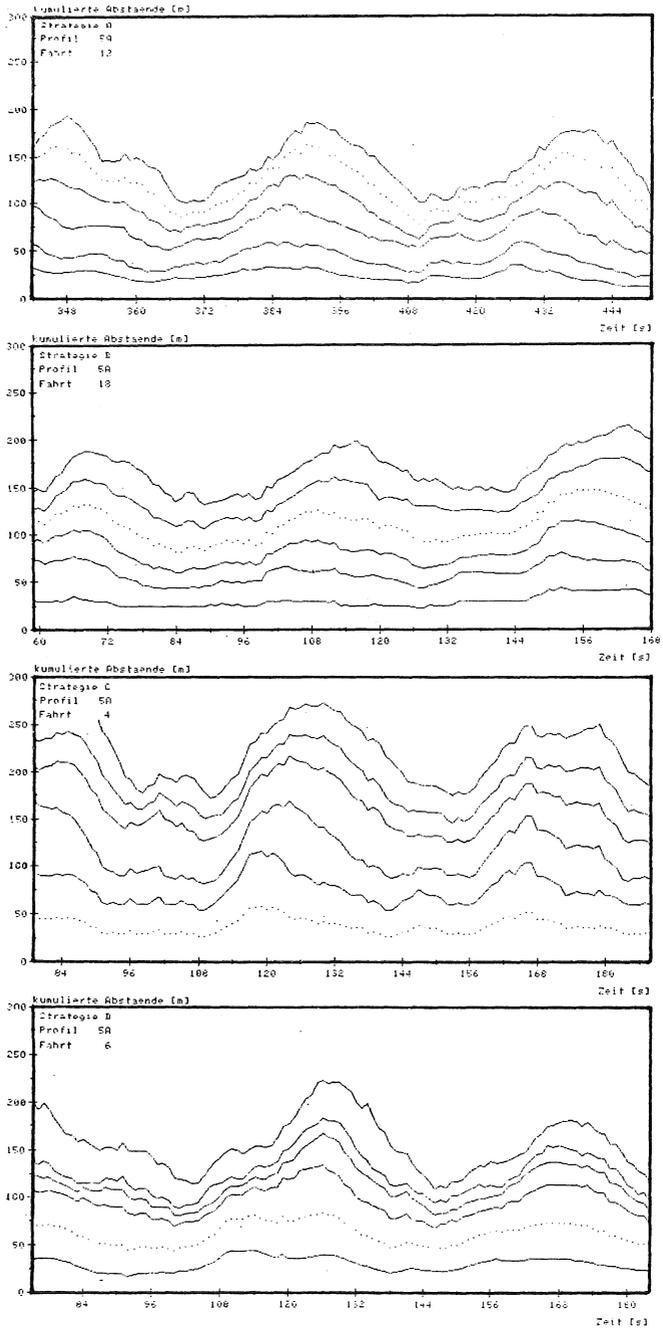


Abb. 4.6: Ganglinien der kumulierten Abstände Profil 5A

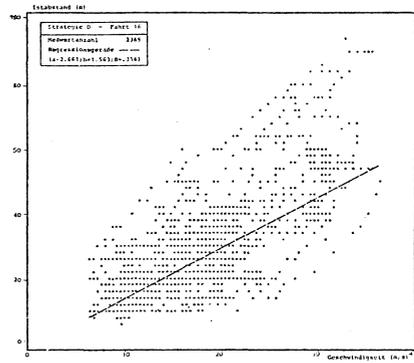
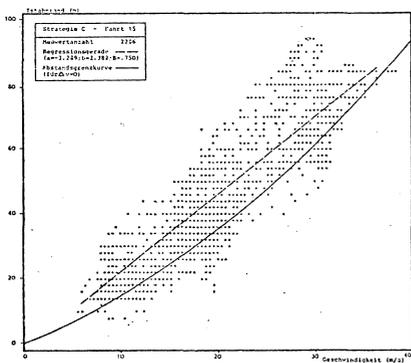
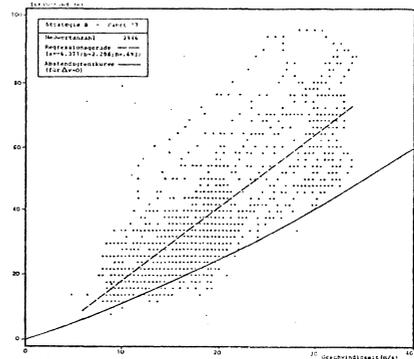
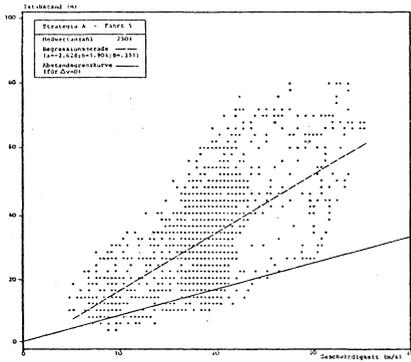


Abb. 4.7: Abstände in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit

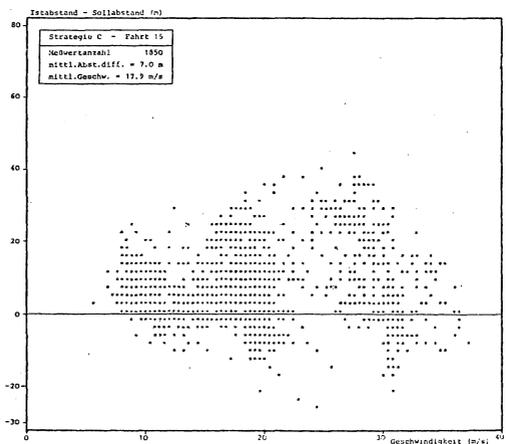
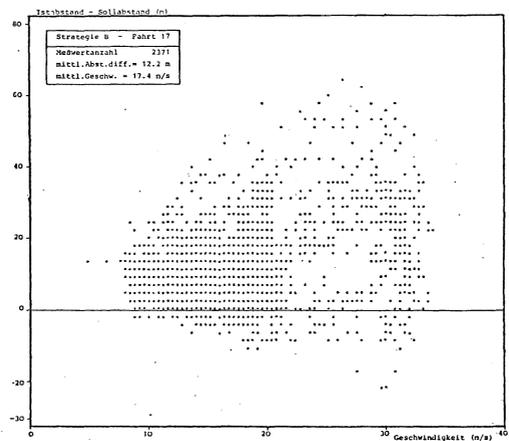
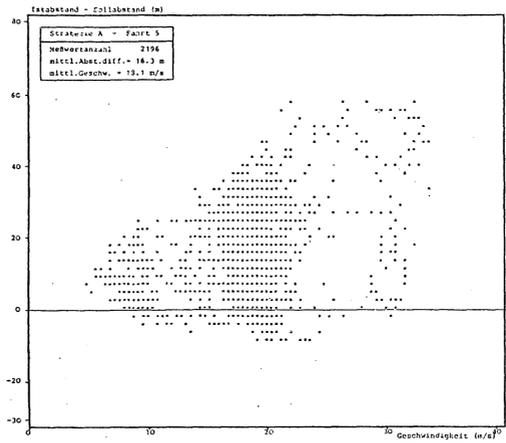


Abb. 4.8: Istabstand minus Sollabstand in Abhängigkeit von der Eigengeschwindigkeit

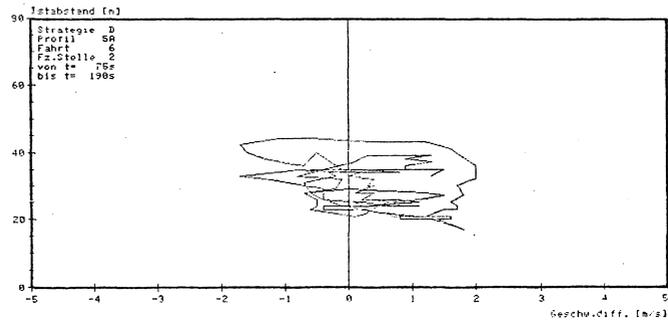
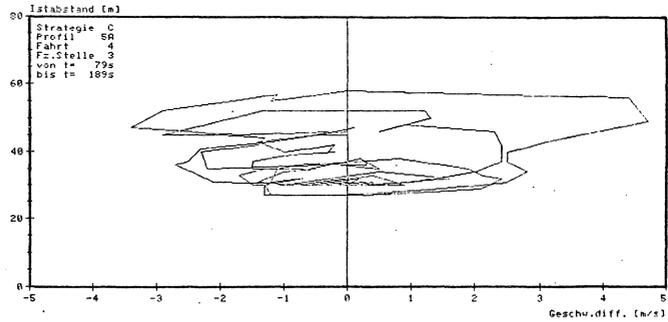
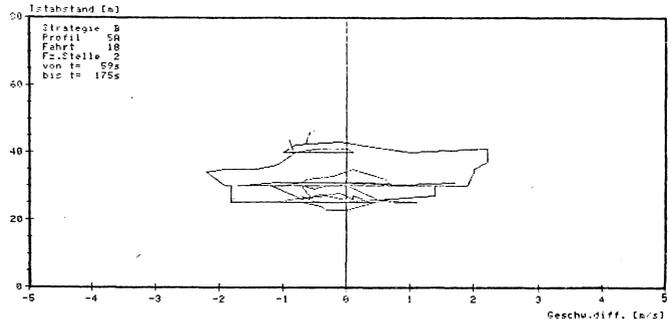
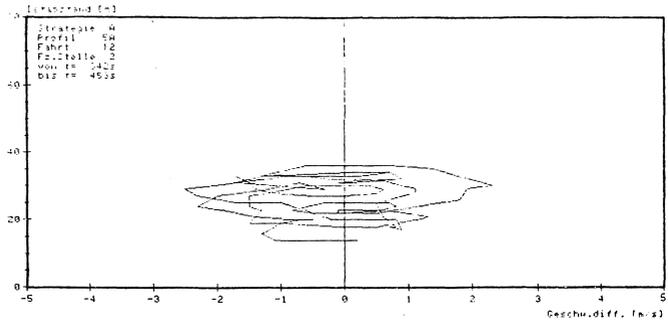


Abb. 4.9: Abstandsverhalten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz

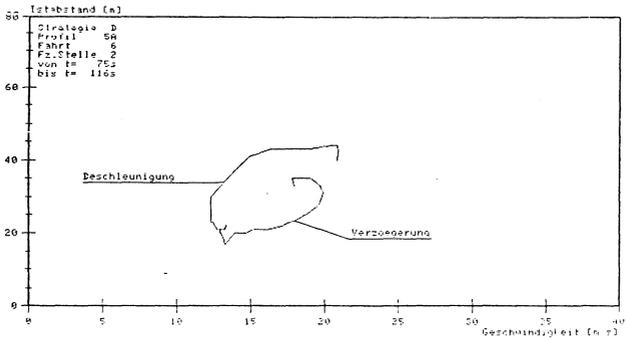
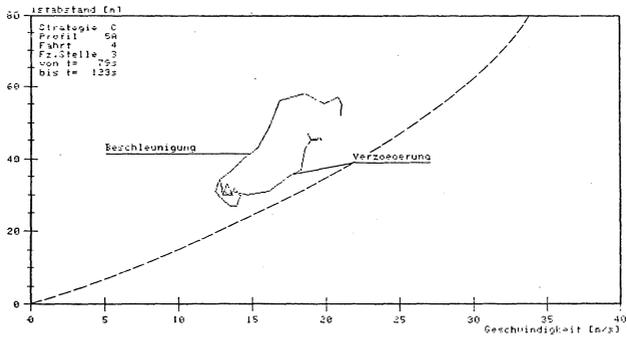
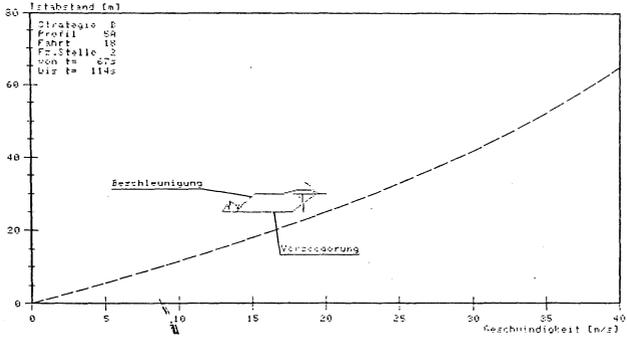
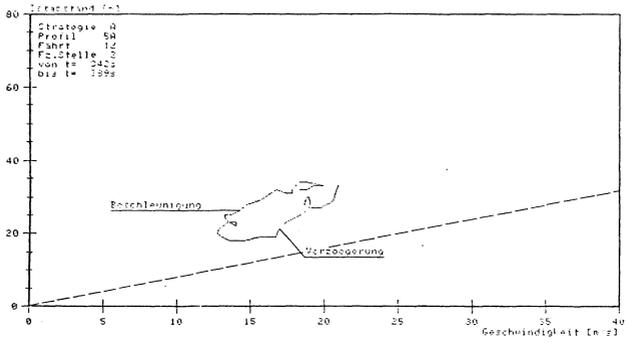


Abb. 4.10: Dynamische Änderung von Abständen über der Eigengeschwindigkeit
 Profil 5A

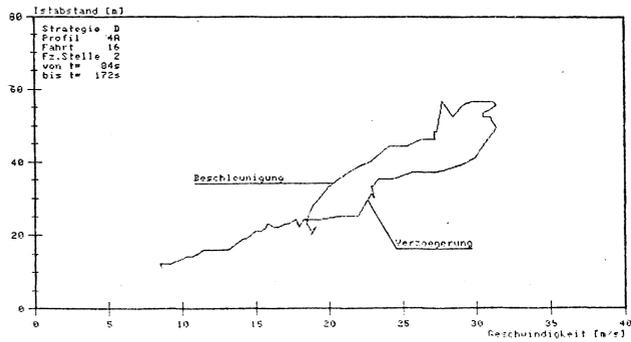
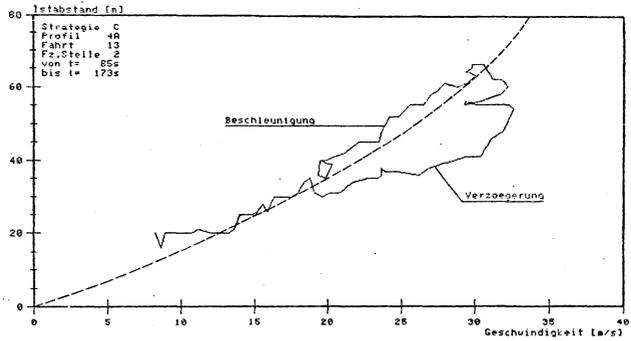
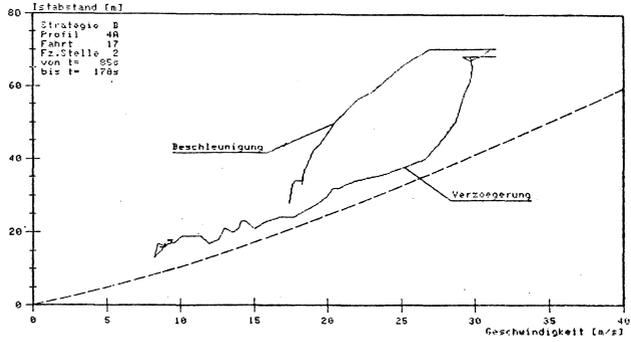
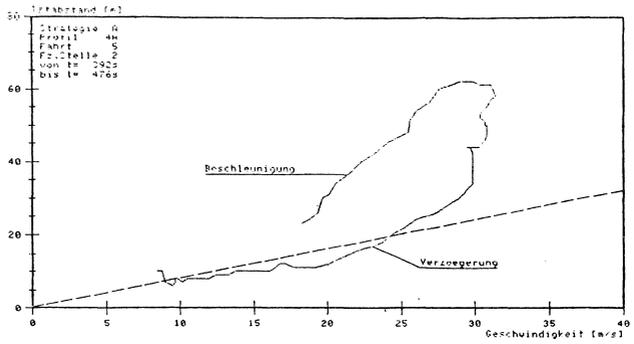


Abb. 4.11: Dynamische Änderung von Abständen über der Eigengeschwindigkeit Profil 4A

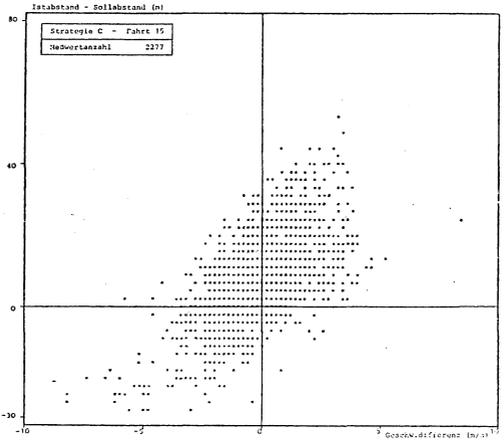
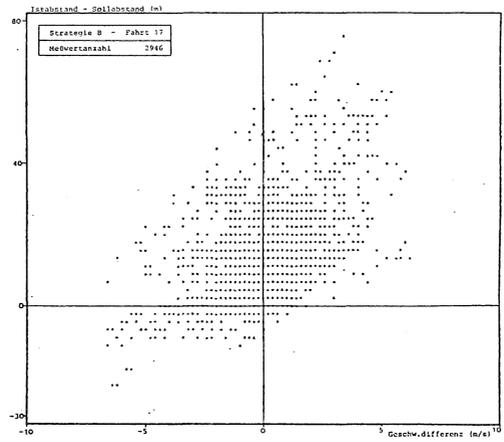
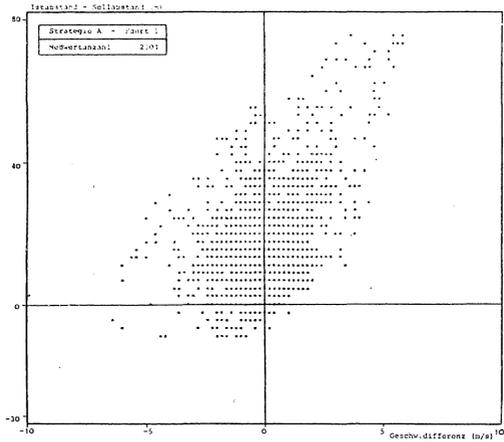
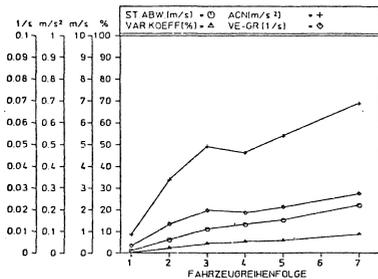


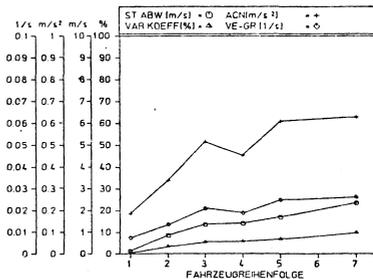
Abb. 4.12: Istabstand minus Sollabstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz

FAHRT-NR. 12 STRATEGIE: A PROFIL: 3A



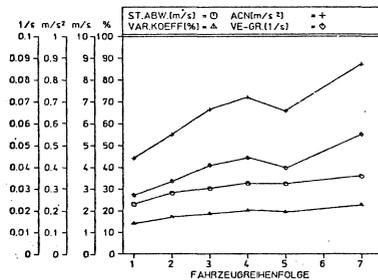
	1	2	3	4	5	6	7
VE (m/s)	24.83	25.05	24.63	24.67	25.22		25.03
ST.ABW (m/s)	0.10	0.62	1.11	1.32	1.52		2.20
VAR.KOEF (%)	0.11	2.46	4.47	5.36	6.05		8.78
ACN (m/s²)	0.087	0.339	0.492	0.462	0.500		0.688
VE-GRAD (1/s)	0.003	0.013	0.020	0.019	0.021		0.027

FAHRT-NR. 12 STRATEGIE: A PROFIL: 3B



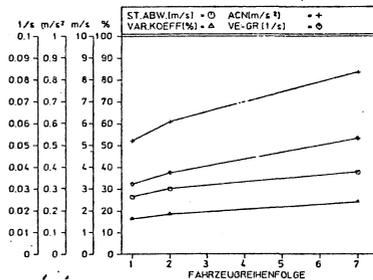
	1	2	3	4	5	6	7
VE (m/s)	24.73	24.96	24.55	24.07	24.38		23.91
ST.ABW (m/s)	0.13	0.86	1.35	1.41	1.69		2.35
VAR.KOEF (%)	0.53	3.43	5.52	5.85	6.94		9.83
ACN (m/s²)	0.186	0.339	0.517	0.454	0.608		0.628
VE-GRAD (1/s)	0.007	0.014	0.021	0.019	0.025		0.026

FAHRT-NR. 12 STRATEGIE: A PROFIL: 5A



	1	2	3	4	5	6	7
VE (m/s)	16.26	16.38	16.18	16.20	16.62		15.80
ST.ABW (m/s)	2.29	2.80	3.02	3.25	3.23		3.57
VAR.KOEF (%)	14.11	17.10	18.85	20.08	19.41		22.61
ACN (m/s²)	0.442	0.550	0.664	0.720	0.657		0.871
VE-GRAD (1/s)	0.027	0.033	0.041	0.044	0.040		0.055

FAHRT-NR. 12 STRATEGIE: A PROFIL: 5B



	1	2	3	4	5	6	7
VE (m/s)	16.10	16.22					15.61
ST.ABW (m/s)	2.63	3.00					3.76
VAR.KOEF (%)	16.34	18.51					24.09
ACN (m/s²)	0.520	0.608					0.834
VE-GRAD (1/s)	0.032	0.037					0.053

Abb. 4.13: Kenngrößen \bar{v} , s , V und ACN der Fahrzeuge 1 bis 7 - Fahrt 12

Fahrt	S	P	t.d. T s	Fahrzeugst. 1			Fahrzeugst. 2			Fahrzeugst. 3			Fahrzeugst. 4			Fahrzeugst. 5			Fahrzeugst. 6			Fahrzeugst. 7			
				\bar{v}	V	ACN																			
				m/s	%	m/s ²																			
4	C	5A	142	16.7	13.8	.42				15.7	17.1	.53	16.2	16.8	.60	16.2	15.1	.49	16.2	15.3	.53				
			130	16.7	13.8	.52				16.3	15.7	.59	16.1	16.3	.68	16.1	16.1	.67							
			1A	219	11.7	4.0	.22				11.6	10.7	.42												
			1B	190	11.0	5.5	.29				11.3	11.8	.45												
5	A	2A	129	18.9	1.7	.28	19.2	3.7	.33	18.9	5.7	.38	18.9	5.8	.31	18.8	8.9	.40				18.6	11.2	.48	
			127	19.0	1.0	.25	19.3	5.2	.36	19.1	6.0	.38	19.0	6.1	.31	18.9	7.5	.36				18.6	10.6	.52	
			4A	160	18.2	40.4	.50	18.5	41.0	.46	18.4	42.4	.52	18.3	41.4	.49	18.1	44.1	.54				17.8	42.6	.61
			4B	132	16.8	44.5	.63	17.2	43.9	.67															
6	D	5A	145	16.7	14.8	.52	16.3	16.7	.55				16.4	17.0	.50	16.5	19.4	.63	16.5	20.5	.78	16.2	22.4	.80	
			143	15.6	18.4	.59	15.6	19.2	.57				15.7	18.2	.65	15.8	17.7	.65	15.7	18.9	.73	15.3	20.4	.81	
			3A	104	24.3	0.8	.13	24.3	4.0	.28						25.1	7.0	.45	25.0	8.3	.59	24.3	10.6	.70	
			3B	103	24.2	0.9	.29									24.1	7.2	.39							
7	D	2A	128	19.6	1.5	.19				19.1	3.1	.24	19.0	4.8	.29	19.4	6.1	.30	19.5	7.7	.45	19.6	9.9	.55	
			127	19.1	1.2	.24				18.9	3.4	.22	18.7	5.5	.27	19.0	7.0	.28	19.1	8.5	.44	19.1	10.3	.55	
			5A	135	16.3	15.1	.53				16.5	22.8	.68	16.3	24.9	.80	16.7	24.1	.80	16.8	25.7	.91	16.8	27.7	.98
			5B	170	15.4	16.6	.61									16.7	24.1	.80	16.8	25.7	.91	15.7	20.5	.82	
8	C	4A	161	17.7	44.7	.53				18.1	44.6	.61				17.5	45.3	.68	17.9	46.2	.81	17.8	44.9	.64	
			120	17.9	43.5	.72				18.3	42.7	.92				17.7	41.3	.91	18.1	40.8	.99	17.9	37.8	.92	
			1A	228	10.5	3.1	.28				10.8	7.0	.31												
9	D	5A	131	16.1	14.4	.43	15.9	16.4	.54	15.5	19.0	.63	16.0	18.6	.74				15.8	16.5	.66				
			147	15.7	17.2	.52	15.5	18.5	.60	15.1	19.5	.64	15.5	19.5	.68				15.1	18.3	.63				
			4A	158	18.3	41.9	.38				18.2	45.0	.65	18.2	45.0	.65									
			4B	107	19.3	40.3	.75				19.2	38.8	.91												
10	A	5A	130	17.0	14.1	.47				16.6	17.2	.56	16.8	16.9	.55	16.9	18.8	.68				15.8	19.8	.72	
			137	16.1	17.0	.56				15.7	19.8	.65	16.0	18.5	.69	16.1	17.8	.71				15.6	24.1	.83	
			4A	161	18.1	41.3	.42				17.7	46.8	.60				18.1	45.2	.69				17.8	46.4	.81
			4B	98	22.1	30.0	.74										21.5	28.0	.58						
12	A	5A	98	16.3	14.1	.44	16.4	17.1	.55	16.2	18.7	.66	16.2	20.1	.72	16.6	19.4	.66				15.8	22.6	.87	
			98	16.1	16.3	.52	16.2	18.5	.61													15.6	24.1	.83	
			3A	142	24.8	0.4	.09	25.1	2.5	.34	24.8	4.5	.49	24.7	5.4	.46	25.2	6.1	.54	25.0	8.8	.69	23.9	9.8	.63
			3B	132	24.7	0.5	.19	25.0	3.4	.34	24.6	5.5	.52	24.1	5.9	.45	24.4	6.9	.61						
13	C	4A	151	18.7	39.2	.38	19.1	37.9	.49	18.7	40.7	.57				18.2	41.0	.53							
			119	20.3	35.0	.66	20.7	33.9	.72	20.4	34.6	.82				19.8	32.5	.72							
			4B	151	19.3	36.1	.38	19.7	35.0	.53	19.4	37.1	.52				18.9	35.5	.65						
14	A	3A	145	24.9	0.4	.12	25.2	1.2	.18	24.6	2.8	.29	24.9	5.2	.36	25.1	8.2	.45	24.4	7.9	.52				
			98	24.8	0.3	.10	25.1	2.0	.22	24.5	4.2	.29	24.5	5.6	.35	24.7	6.6	.49	24.0	7.6	.45				
			4A	151	19.3	34.5	.40	19.6	35.4	.50	19.2	36.0	.53	19.1	39.8	.57	19.3	39.5	.67						
			4B	136	19.3	39.1	.72	19.5	39.2	.74				19.0	38.5	.77	19.2	38.7	.92						
15	C	4A	145	18.8	37.0	.40	18.9	39.2	.51	19.2	38.0	.54	19.6	35.4	.57				19.1	38.4	.68				
			150	18.0	40.5	.55	18.2	40.0	.61	18.3	40.0	.61	18.8	37.1	.68				18.1	38.8	.62				
			4A	160	18.1	38.5	.46	18.6	40.4	.51	18.8	39.6	.58	19.3	37.0	.70				18.9	37.6	.57			
16	D	4A	150	18.8	37.9	.40	18.8	38.9	.52	18.6	40.7	.55				18.3	40.4	.57	18.6	39.7	.58				
			4B	132	19.7	35.1	.53	19.7	35.4	.55	19.4	36.3	.61				19.4	33.2	.61						
17	B	4A	156	18.5	37.4	.40	18.3	39.9	.50	18.8	38.9	.53	18.5	39.8	.68	18.4	39.0	.61	18.9	37.5	.63				
			122	18.8	40.7	.62	18.6	38.9	.65	18.8	39.0	.69	18.8	38.7	.76	18.7	38.2	.70	19.1	35.1	.66				
			5A	123	16.3	13.3	.43	16.2	16.5	.57	16.6	16.9	.61	16.3	16.9	.67									
			5B	141	15.8	15.2	.52				15.9	17.7	.62												
18	B	5A	137	15.8	12.7	.40	16.0	14.0	.43	15.8	16.4	.52	16.0	16.8	.58				16.3	16.6	.59	16.6	15.5	.60	
			138	15.6	15.3	.48	15.7	15.6	.53	15.2	17.4	.53	15.3	17.6	.58				15.4	15.7	.65	15.4	16.0	.70	
			4A	154	18.3	37.4	.43				18.3	40.8	.58				19.0	39.1	.71						

Abb. 4.14: Mittlere Geschwindigkeiten \bar{v} , Variationskoeffizienten der Geschwindigkeit V und Beschleunigungsrauschen ACN

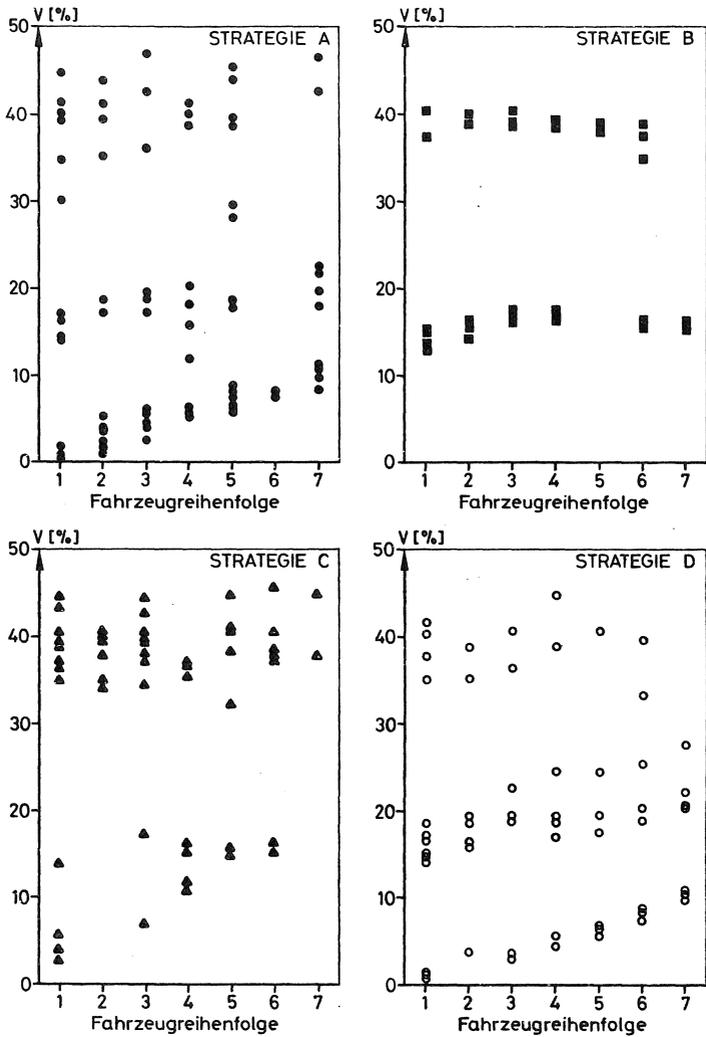


Abb. 4.15: Variationskoeffizienten V der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrzeugstelle

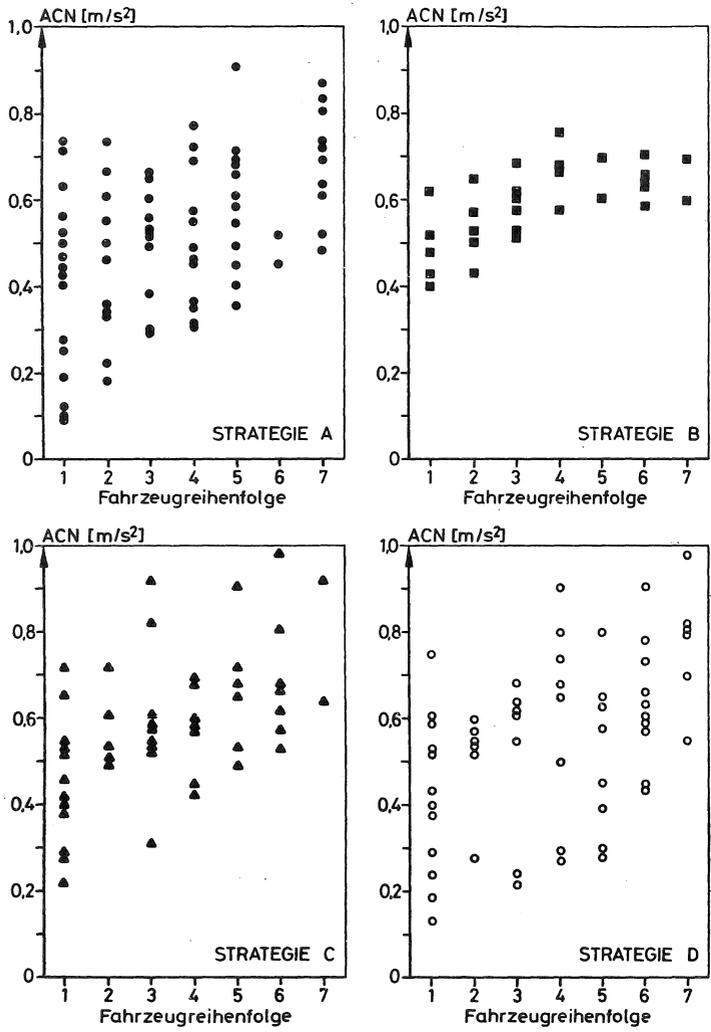


Abb. 4.16: Beschleunigungsrauschen ACN in Abhängigkeit von der Fahrzeugstelle

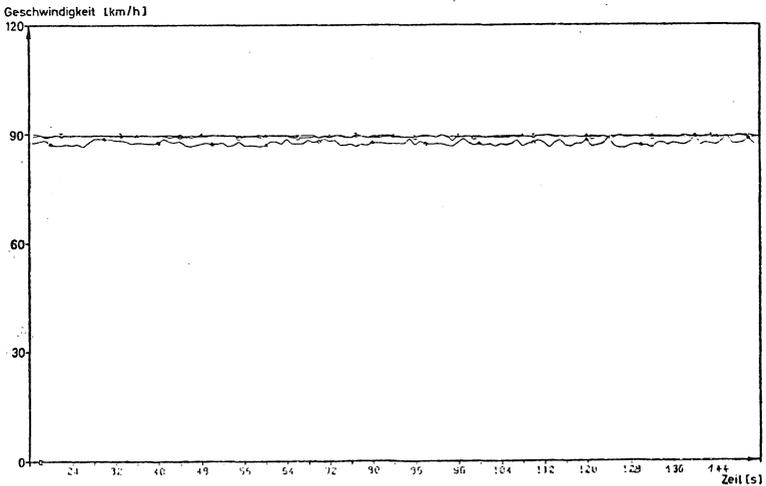
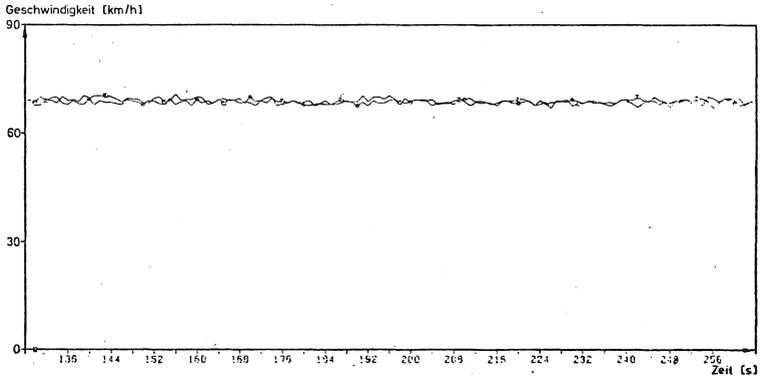
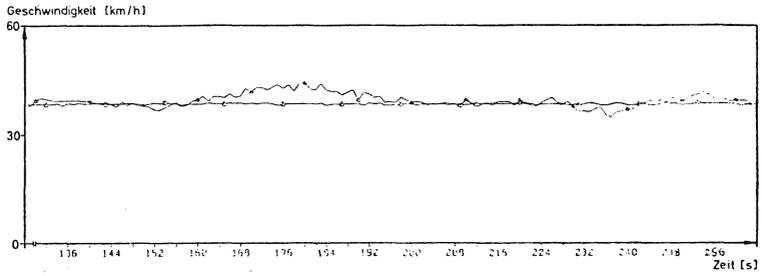


Abb. 4.17: "Kongruente" Geschwindigkeitsganglinien des Führungsfahrzeugs (Profile 1 bis 3)

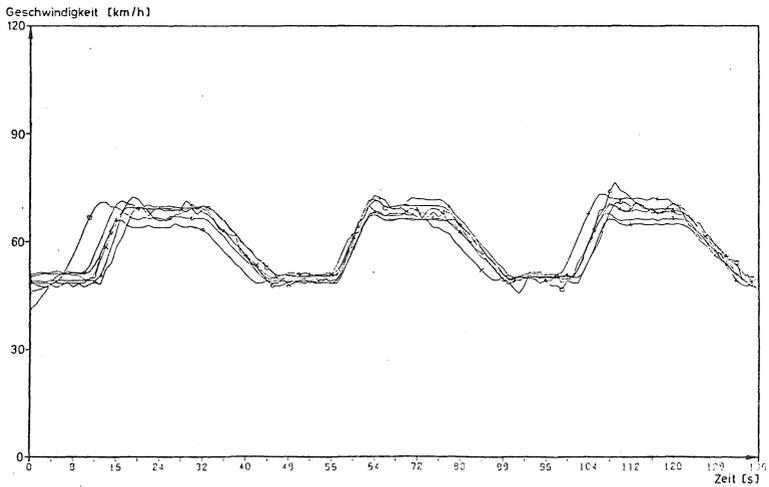
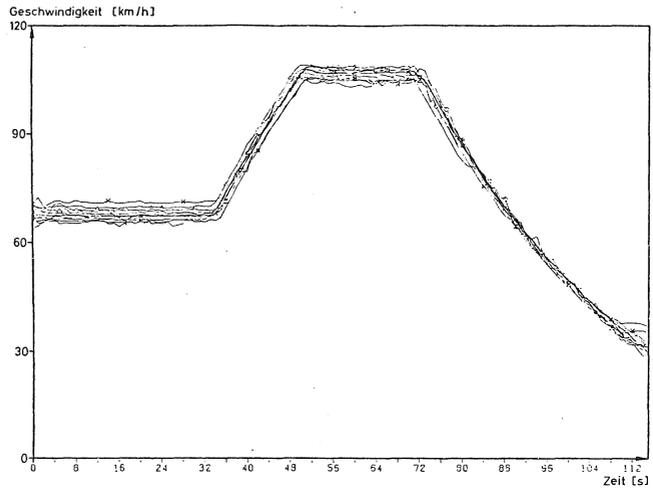


Abb. 4.18: "Kongruente" Geschwindigkeitsganglinien des Führungsfahrzeugs (Profil 4A und 5A)

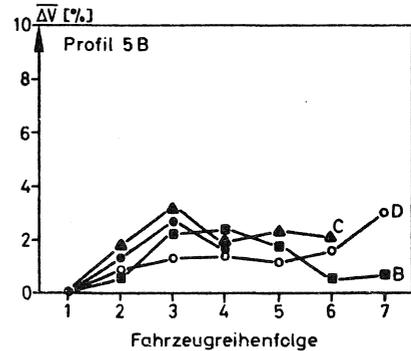
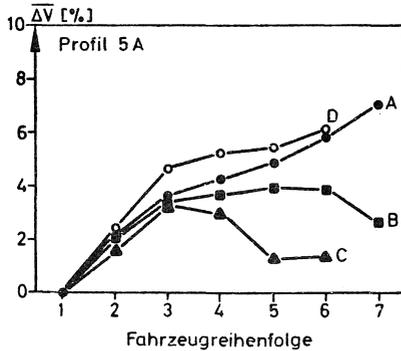
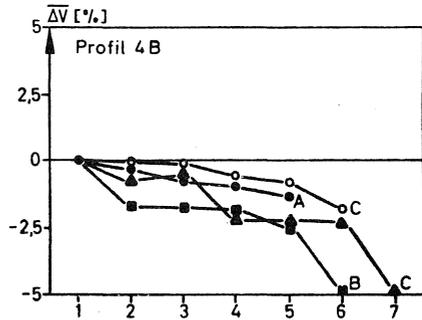
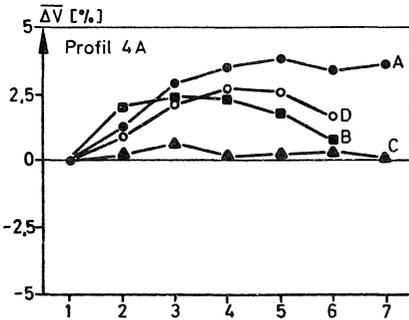
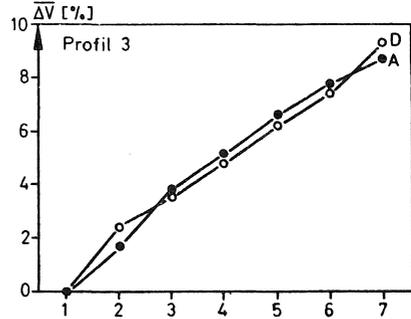
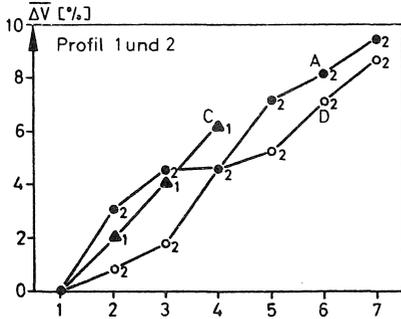


Abb. 4.19: Mittlere Abweichungen der Variationskoeffizienten ($\overline{\Delta V}$) bezogen auf das Führungsfahrzeug und in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition in der Kolonne

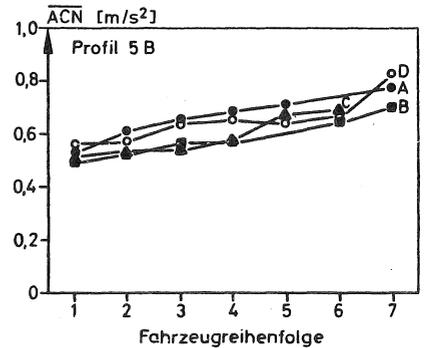
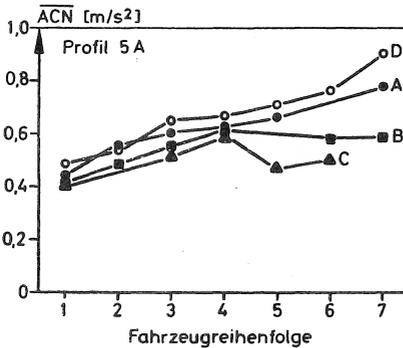
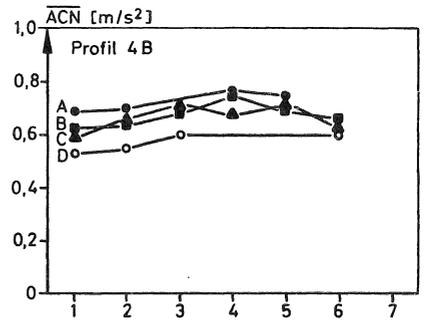
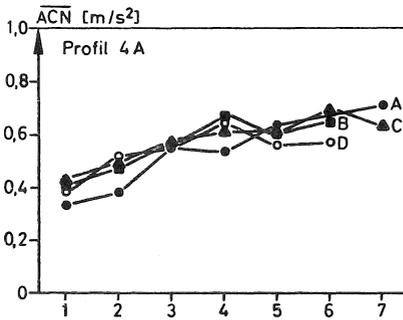
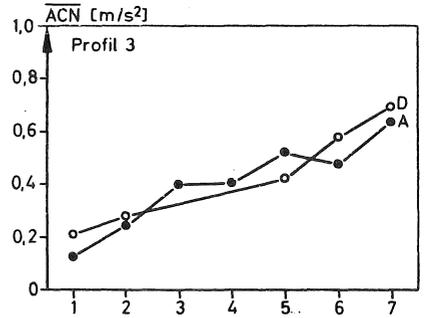
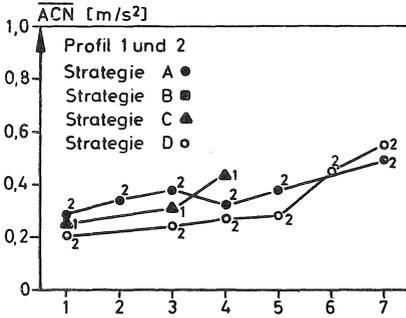


Abb. 4.20: Mittleres Beschleunigungsrauschen in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition in der Kolonne

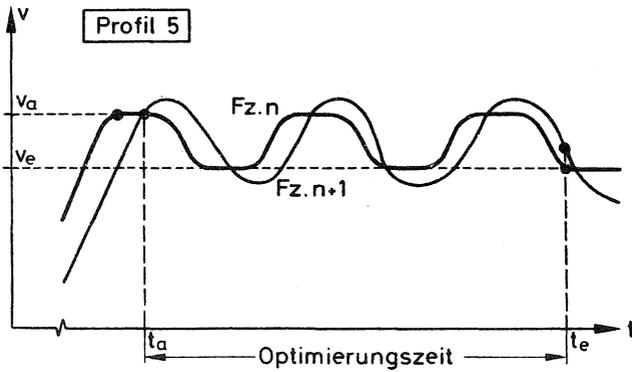
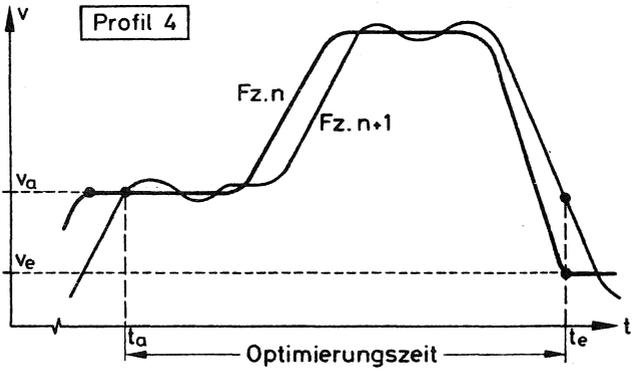
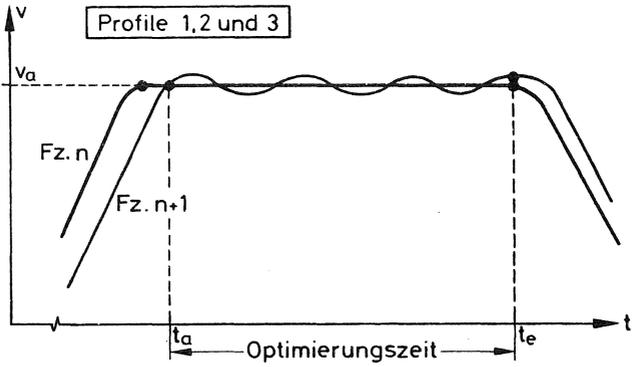


Abb. 4.21: Zeitliche Fahrtabgrenzungen zur Optimierung nach der Fahrzeugfolgegleichung

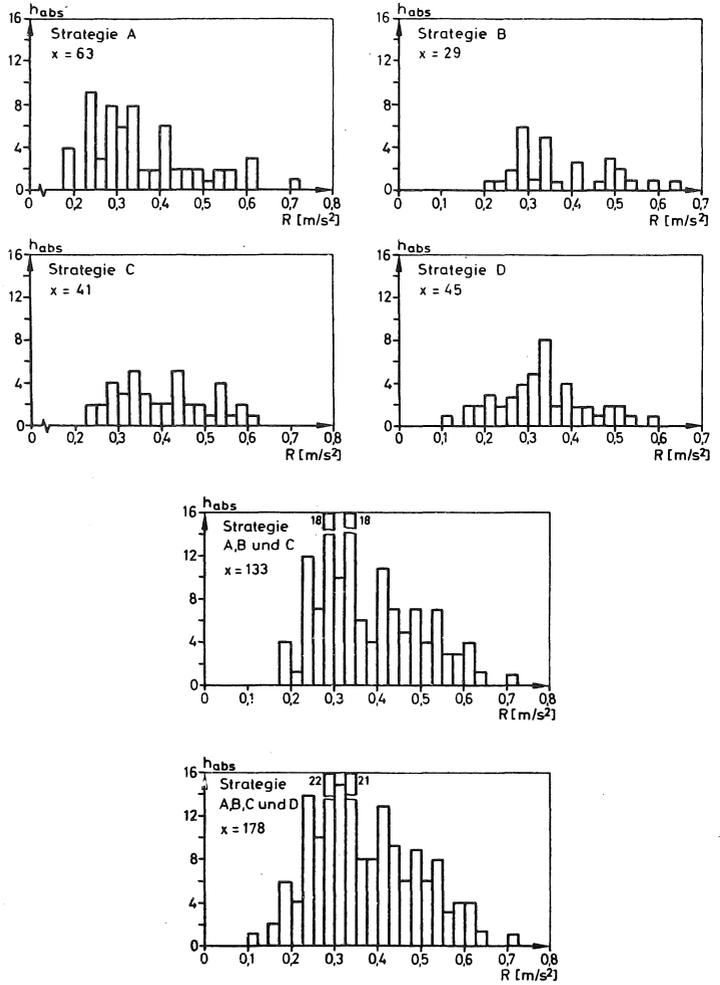


Abb. 4.22: Absolute Häufigkeitsverteilungen der Restabweichung R

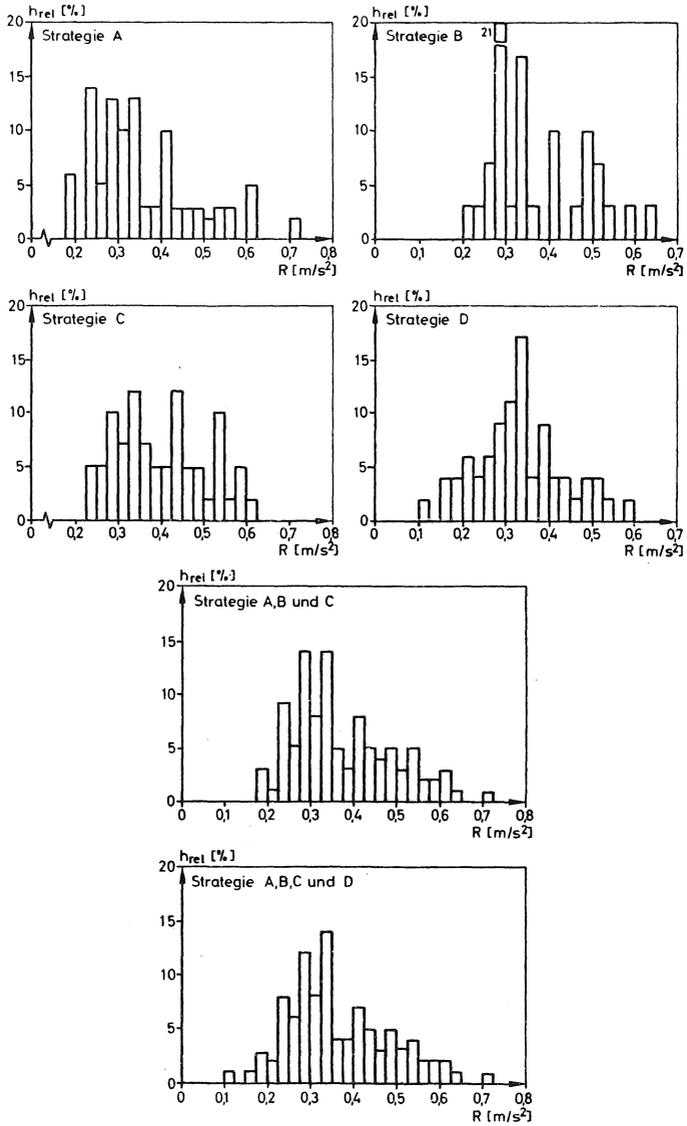


Abb. 4.23: Relative Häufigkeitsverteilungen der Restabweichung R

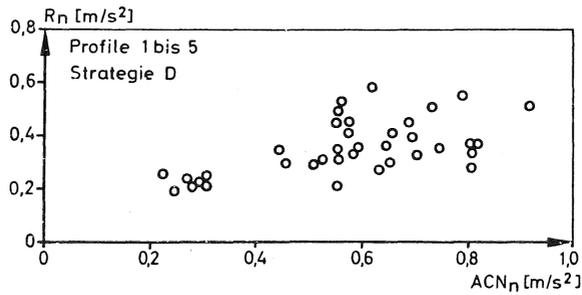
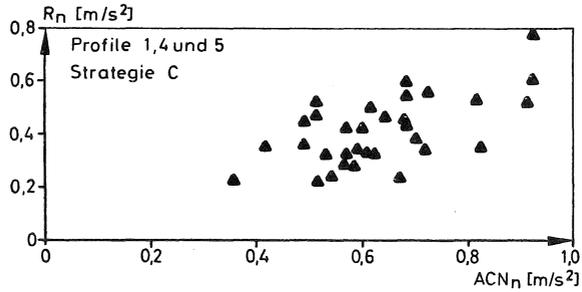
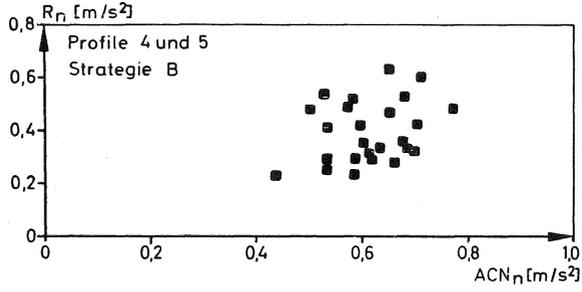
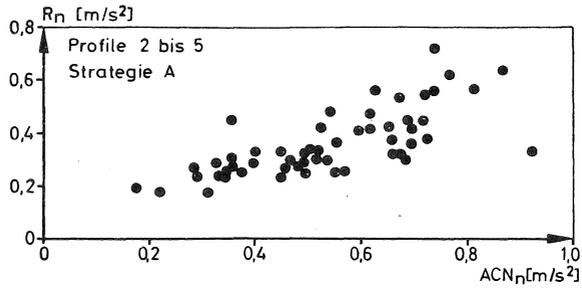


Abb. 4.24: Restabweichungen in Abhängigkeit vom Beschleunigungsrauschen

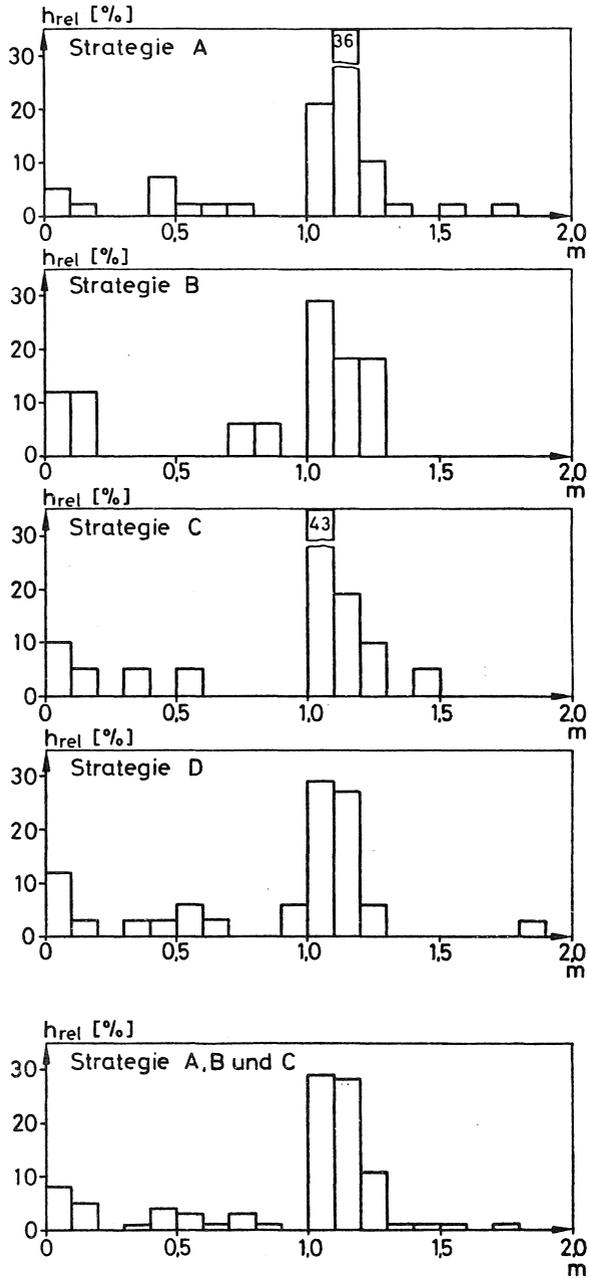


Abb. 4.25: Häufigkeiten des Parameters m

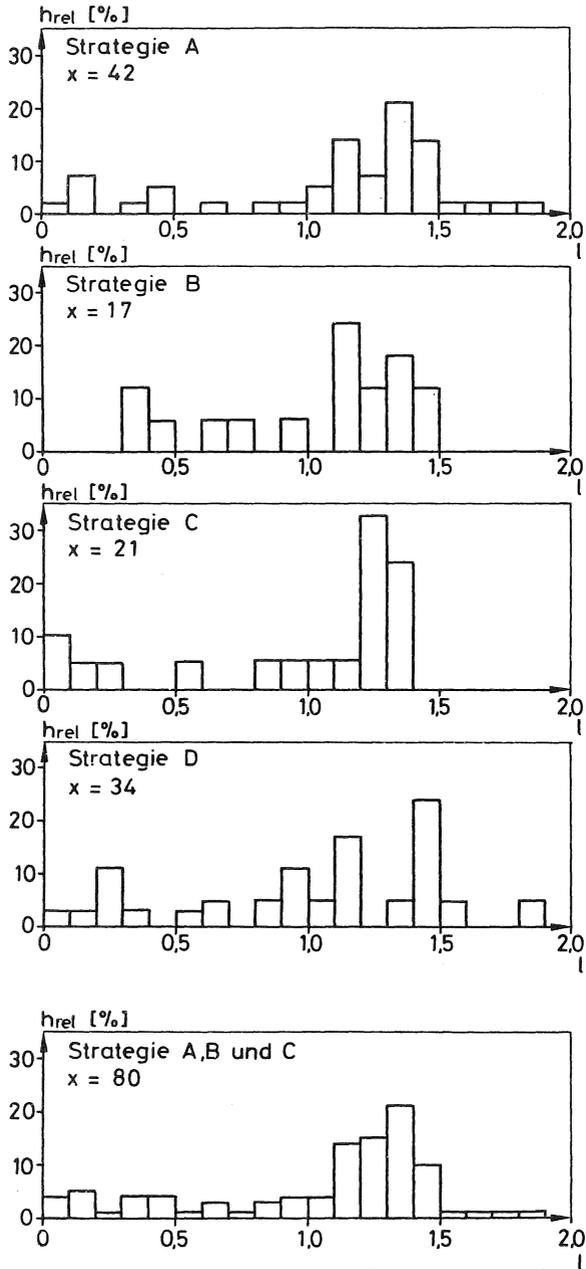


Abb. 4.26: Häufigkeiten des Parameters l

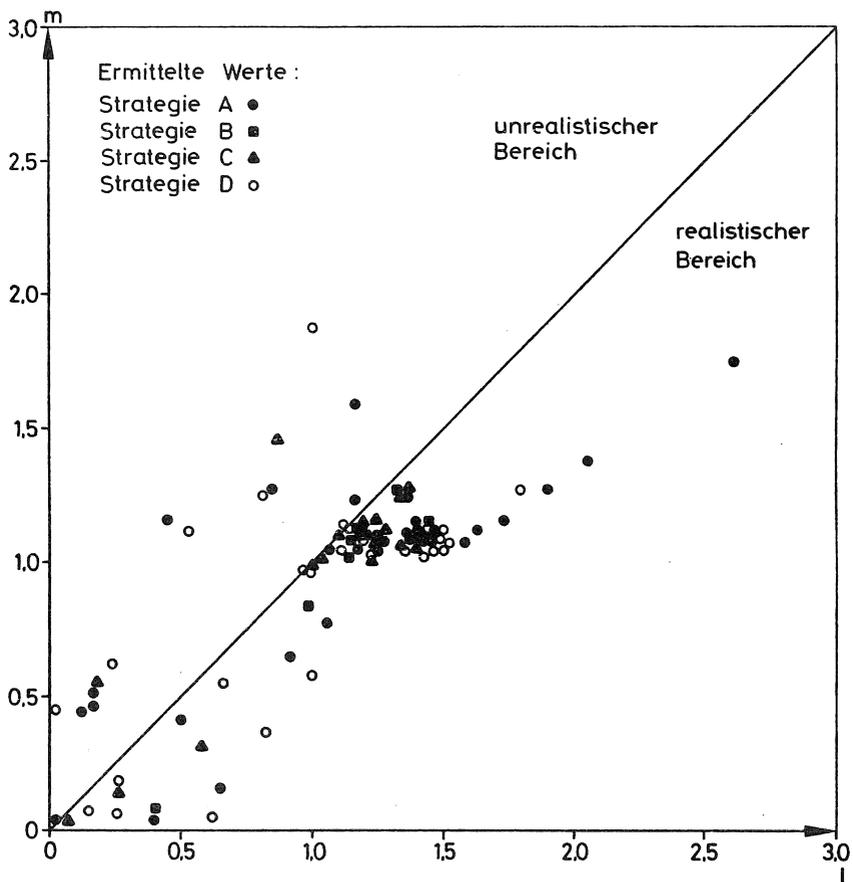


Abb. 4.27: Verteilung der Parameter m und l

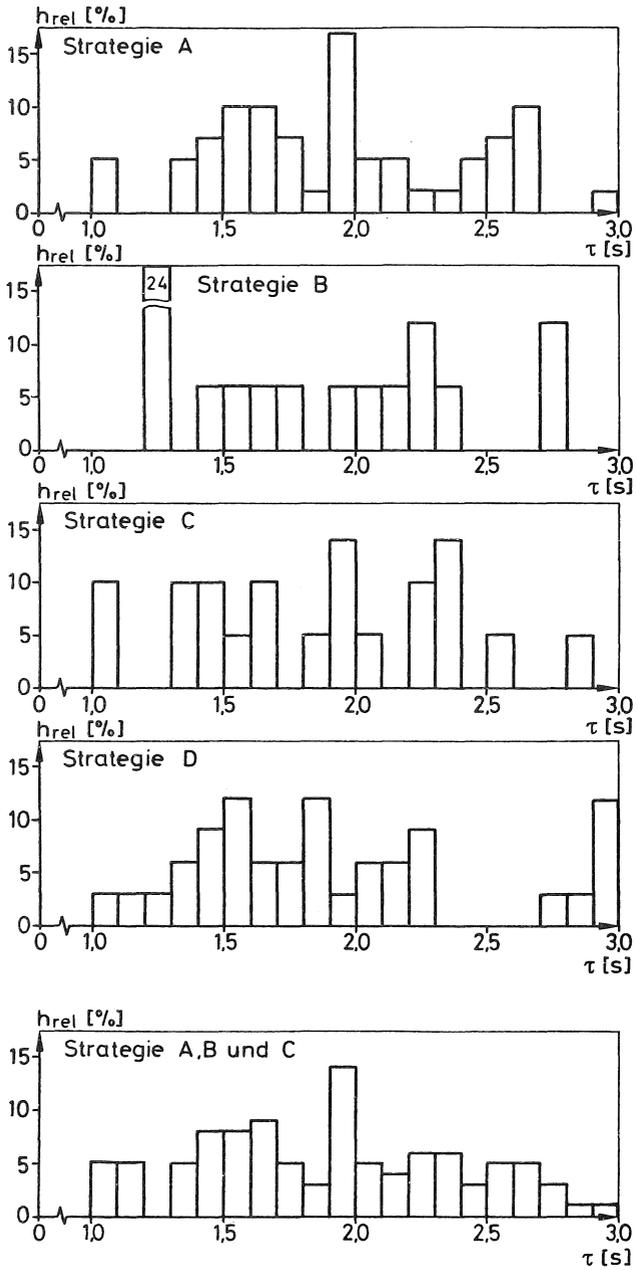


Abb. 4.28: Häufigkeiten des Reaktionszeitparameters τ

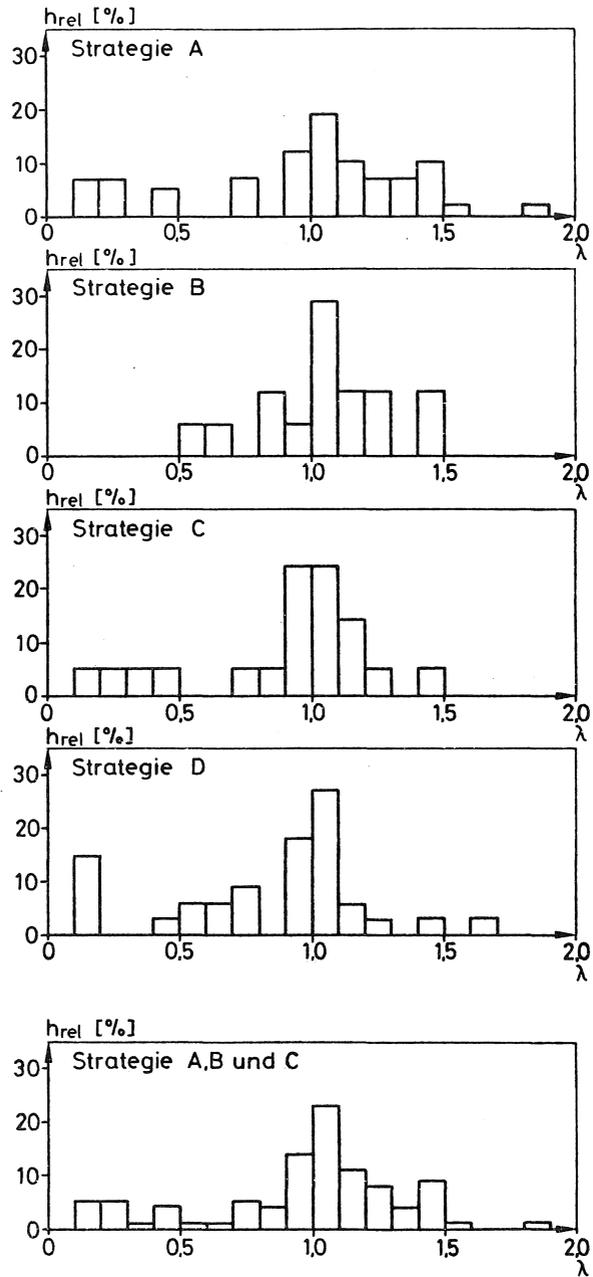


Abb. 4.29: Häufigkeiten der Proportionalitätskonstanten λ

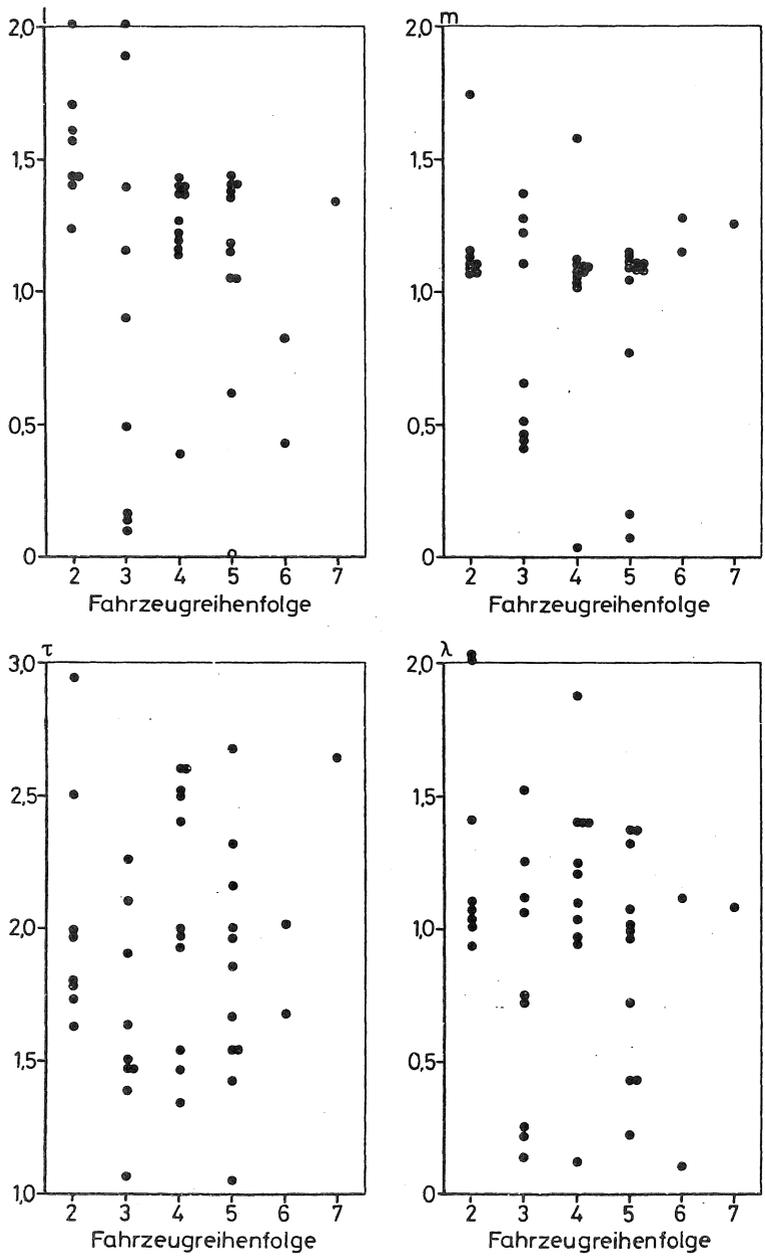


Abb. 4.30: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie A

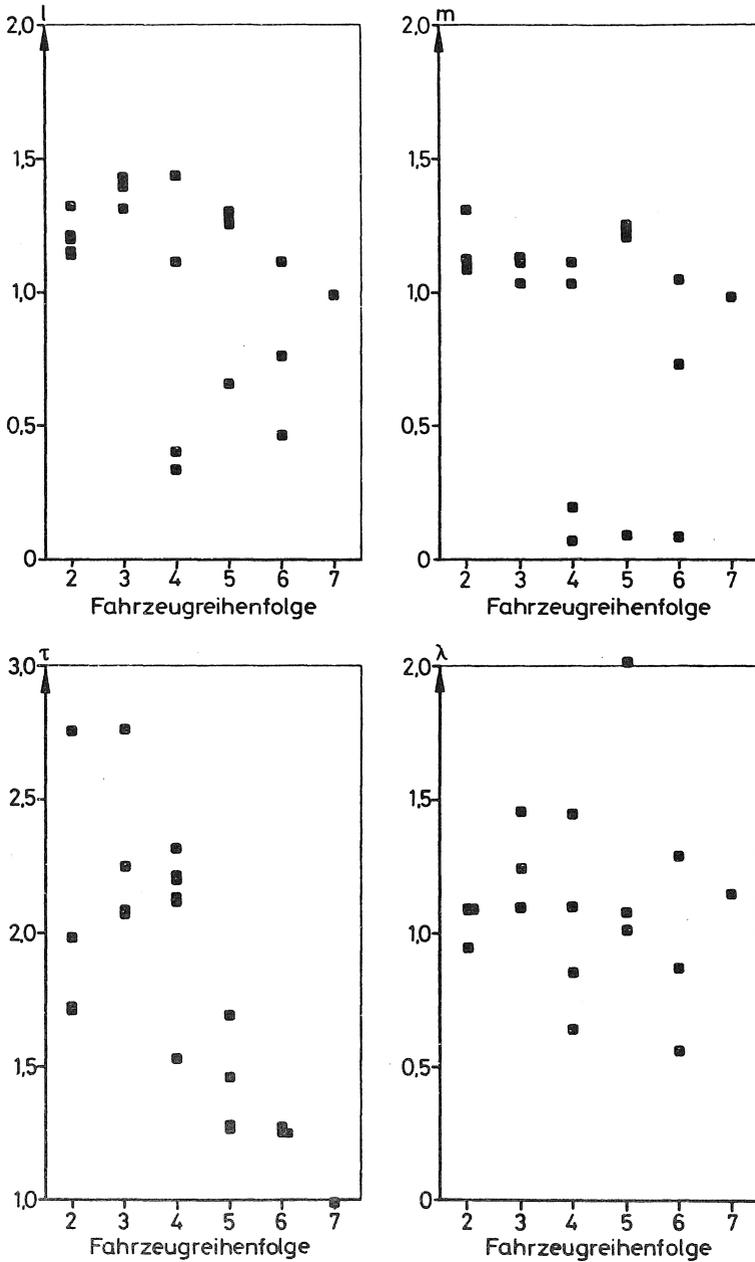


Abb. 4.31: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie B

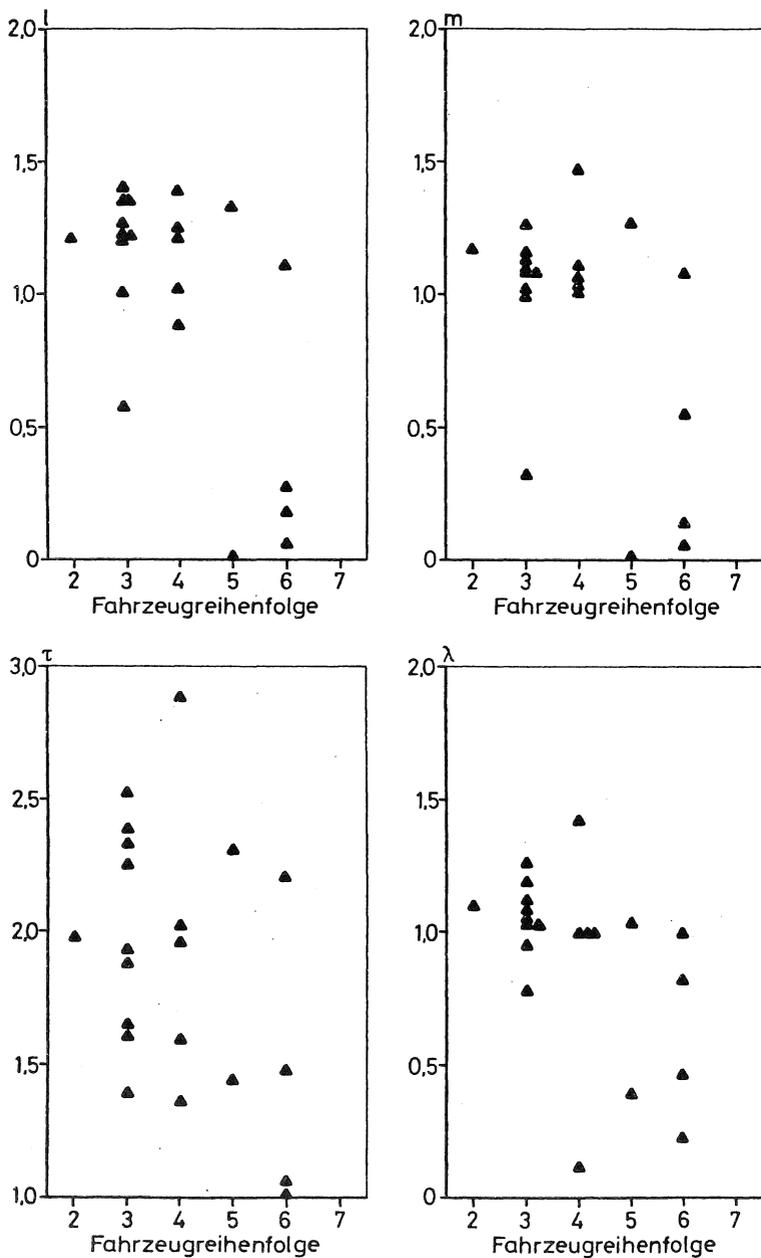


Abb. 4.32: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie C

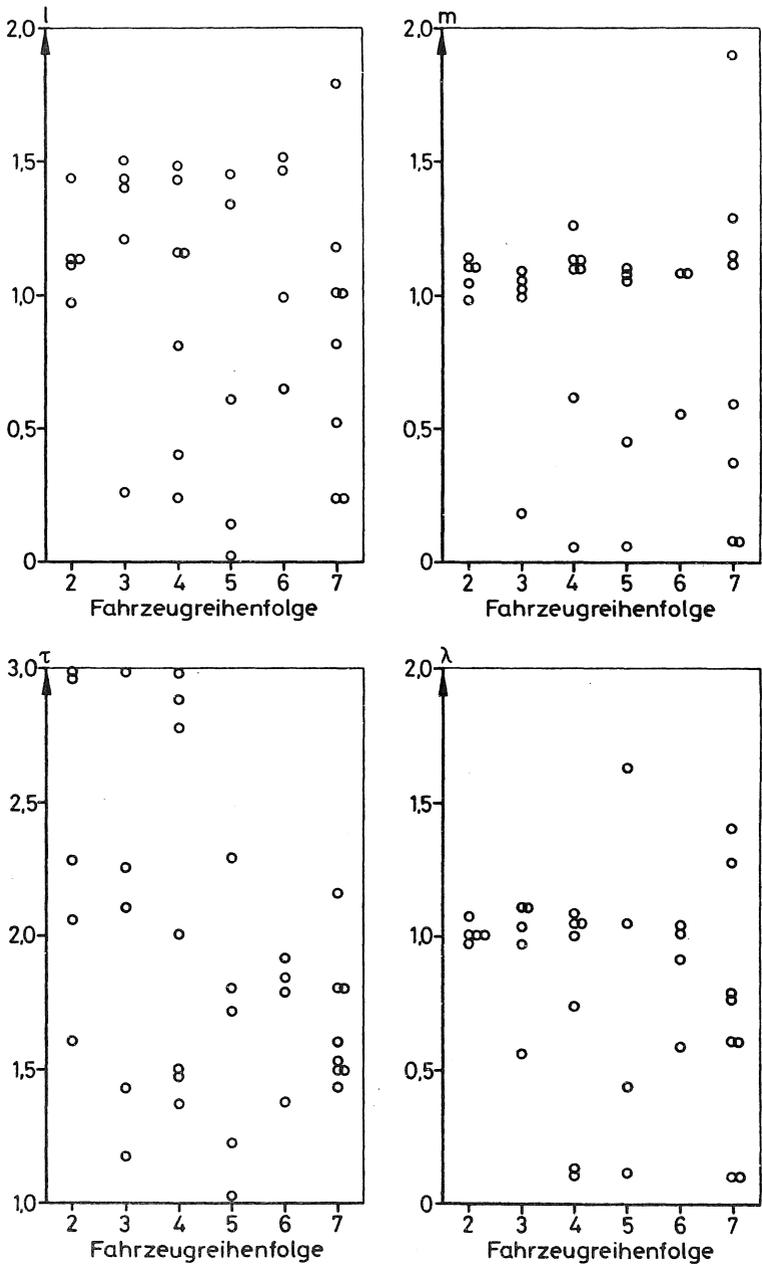


Abb. 4.33: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - Strategie D

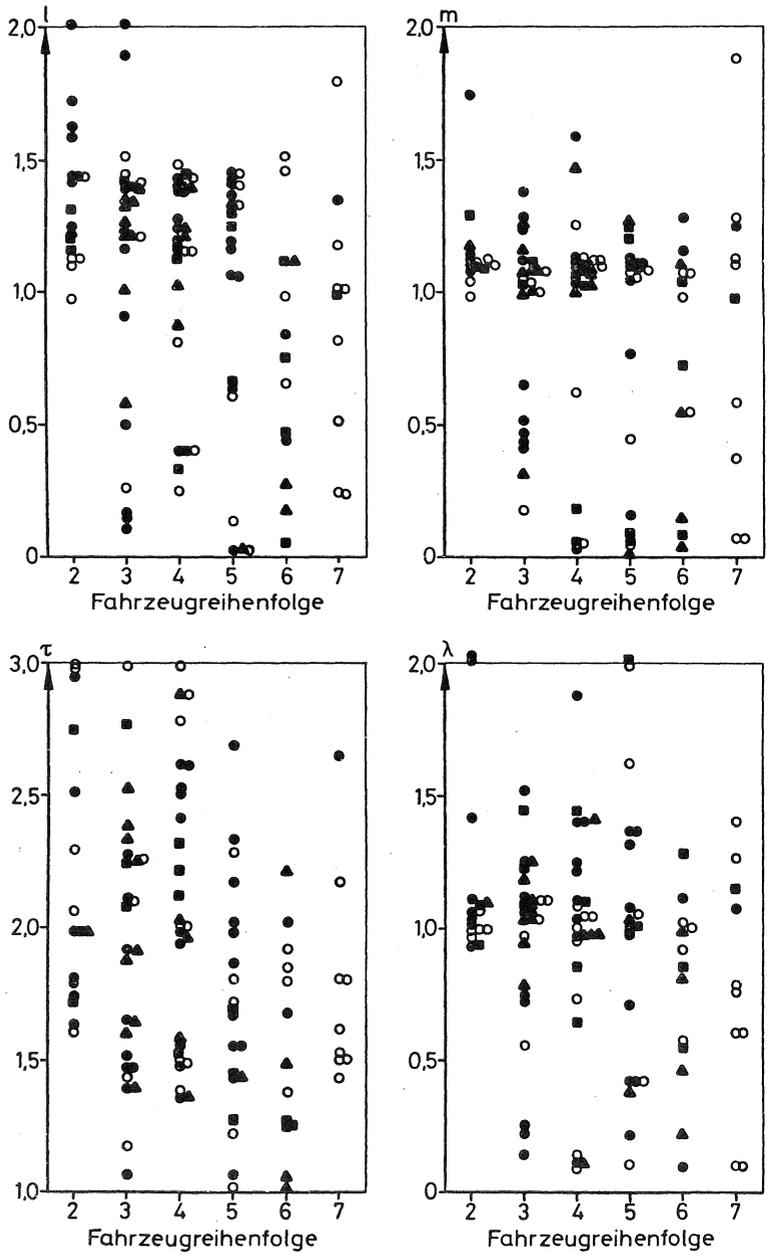


Abb. 4.34: Parameter l , m , τ und λ in Abhängigkeit von der Fahrzeugposition - alle Strategien

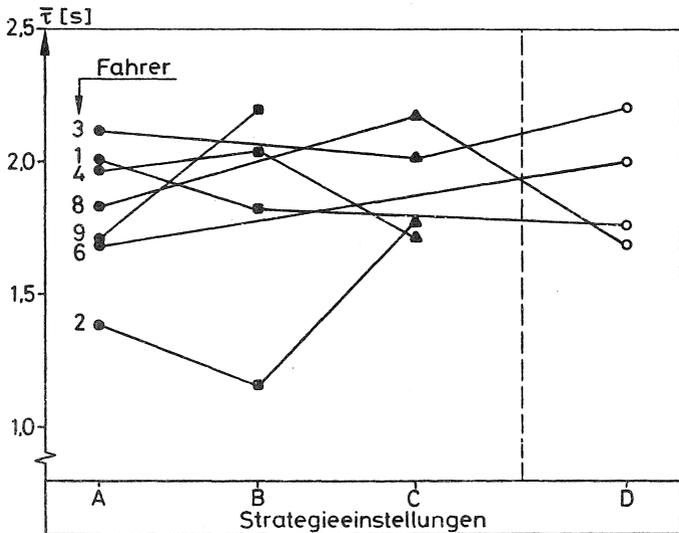
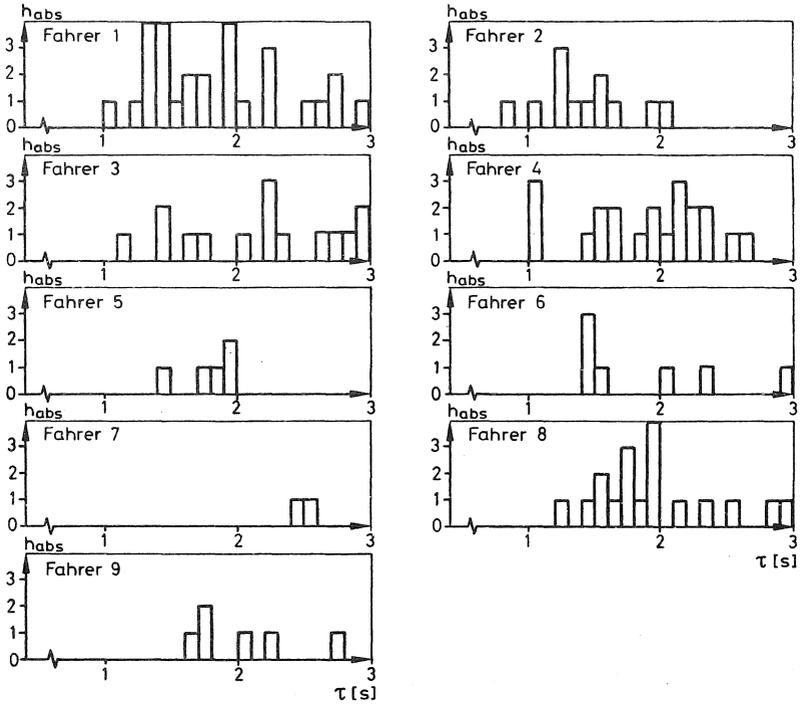


Abb. 4.35: Fahrerabhängige τ -Werte

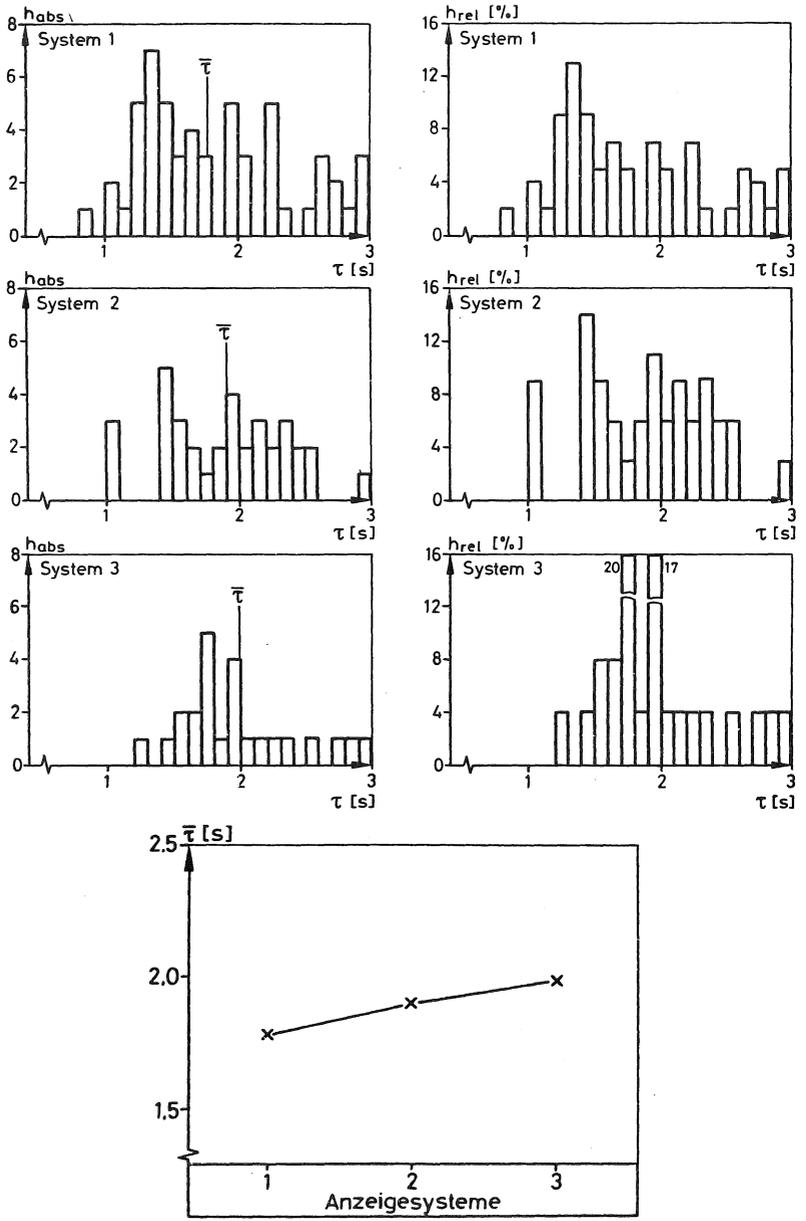


Abb. 4.36: Systemabhängige τ -Werte

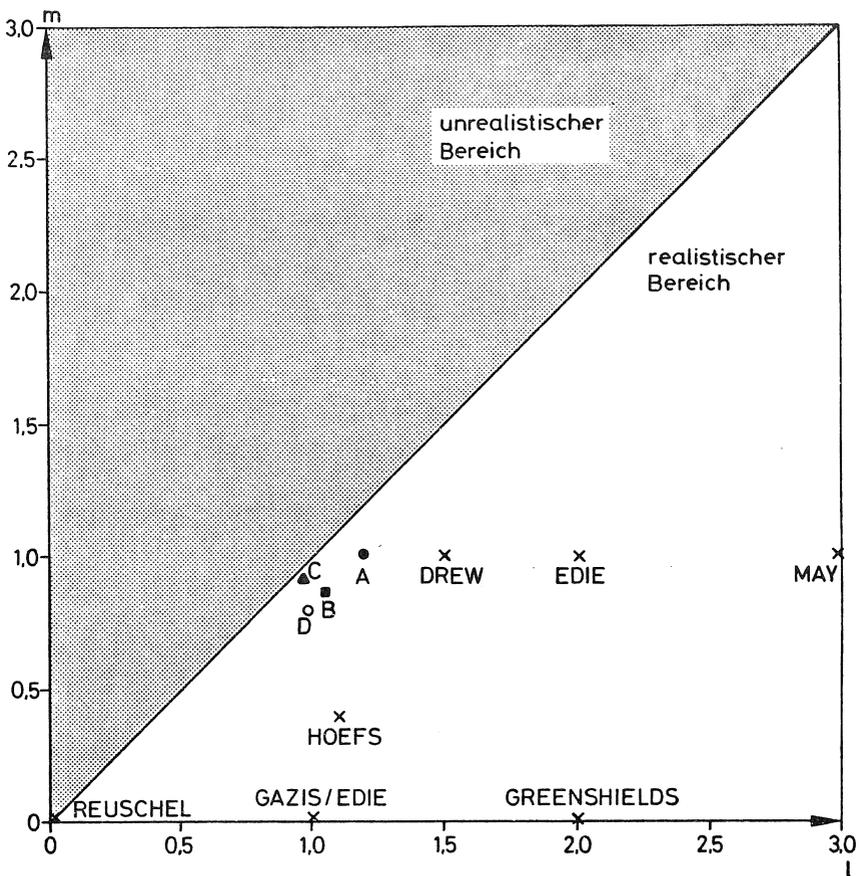


Abb. 4.37: Mittlere Parameter m und l der Strategien A, B, C und D (desgleichen von anderen Autoren)

Hauptprogrammablauf FOLGE

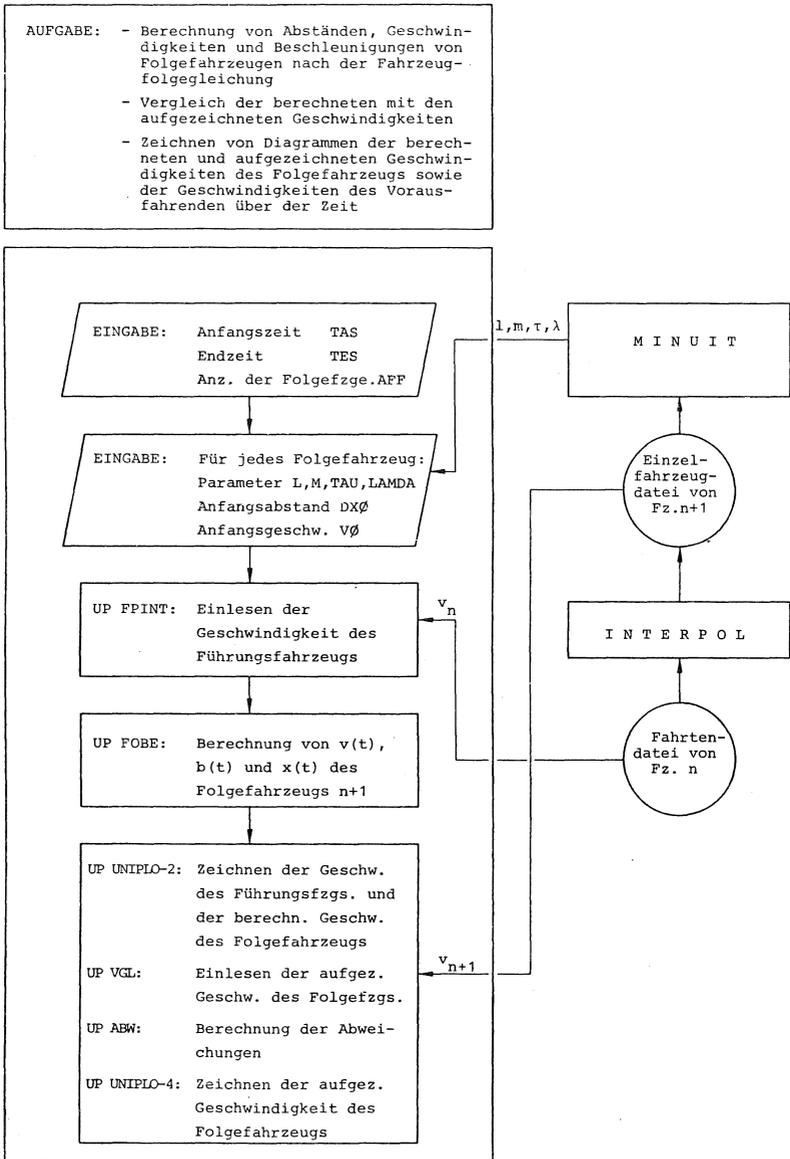


Abb. 4.38: Hauptprogrammablauf von FOLGE

Unterprogramm FOBE

AUFGABE: Berechnungen von $x(t)$, $v(t)$ und $b(t)$ beliebig vieler Folgefahrzeuge nach der Fahrzeugfolgegleichung

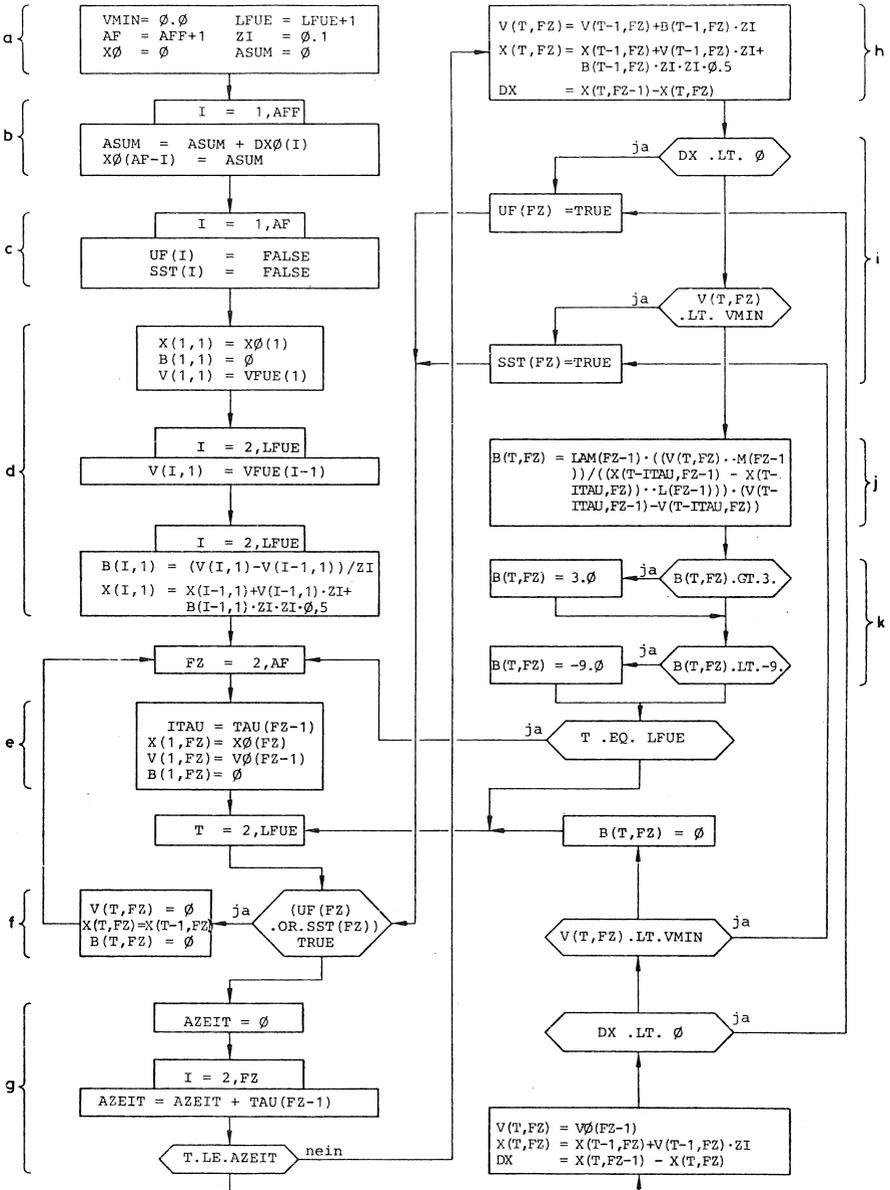


Abb. 4.39: Programmablauf von FOBE

(km/h) (m/s)

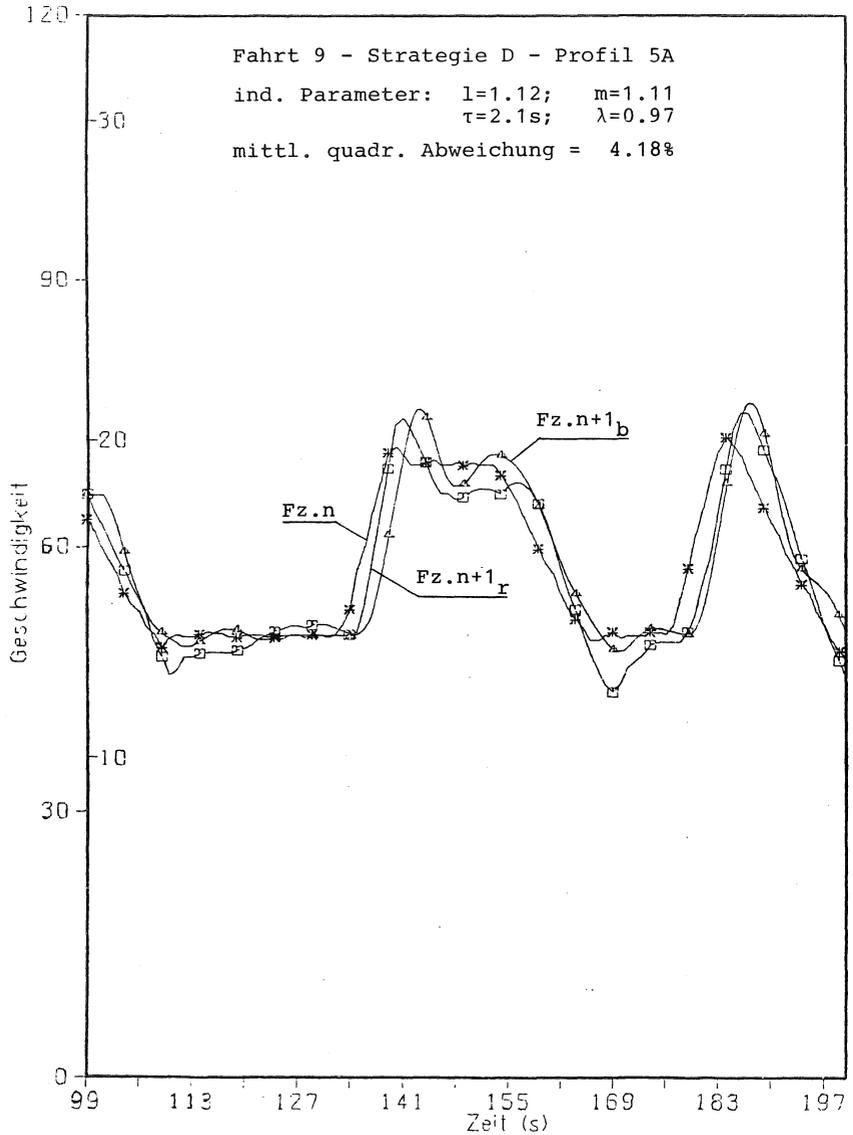


Abb. 4.40: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 9 - individuelle Parameter

(km/h) (m/s)

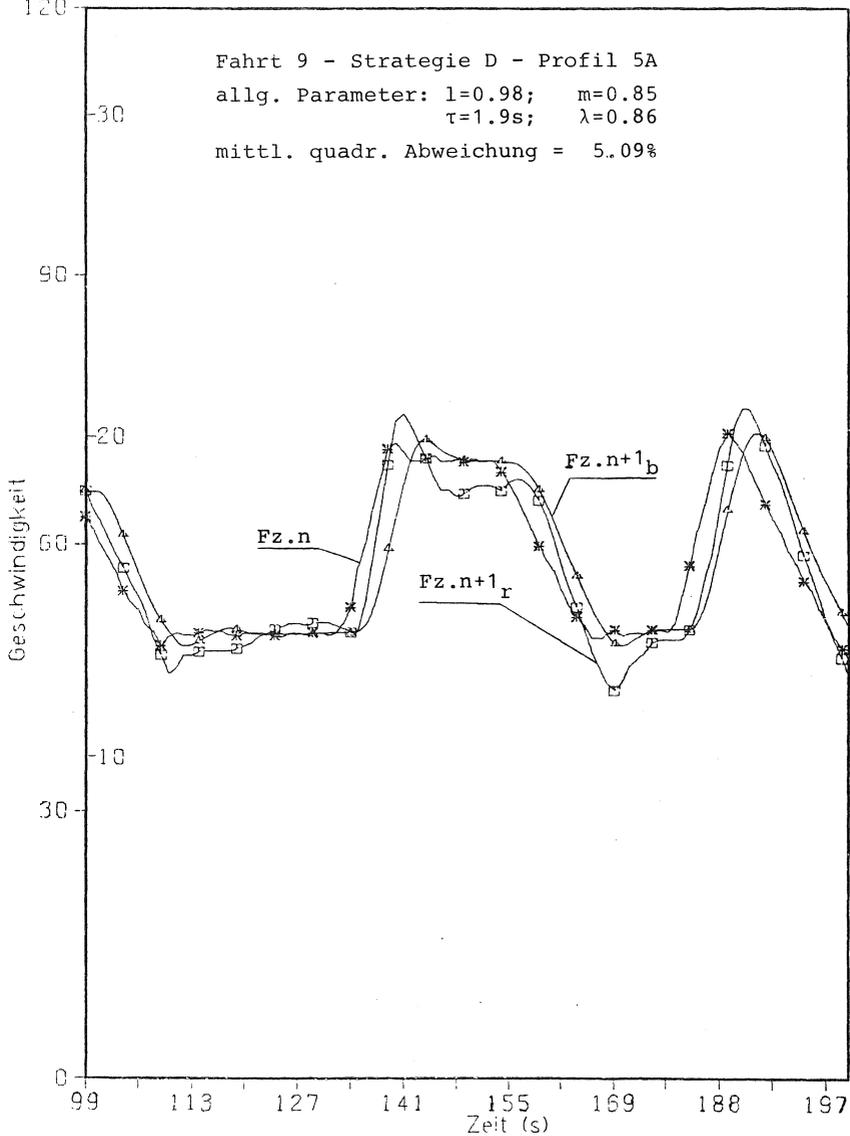


Abb. 4.41: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 9 - allgemeine Parameter

(km/h) (m/s)

120

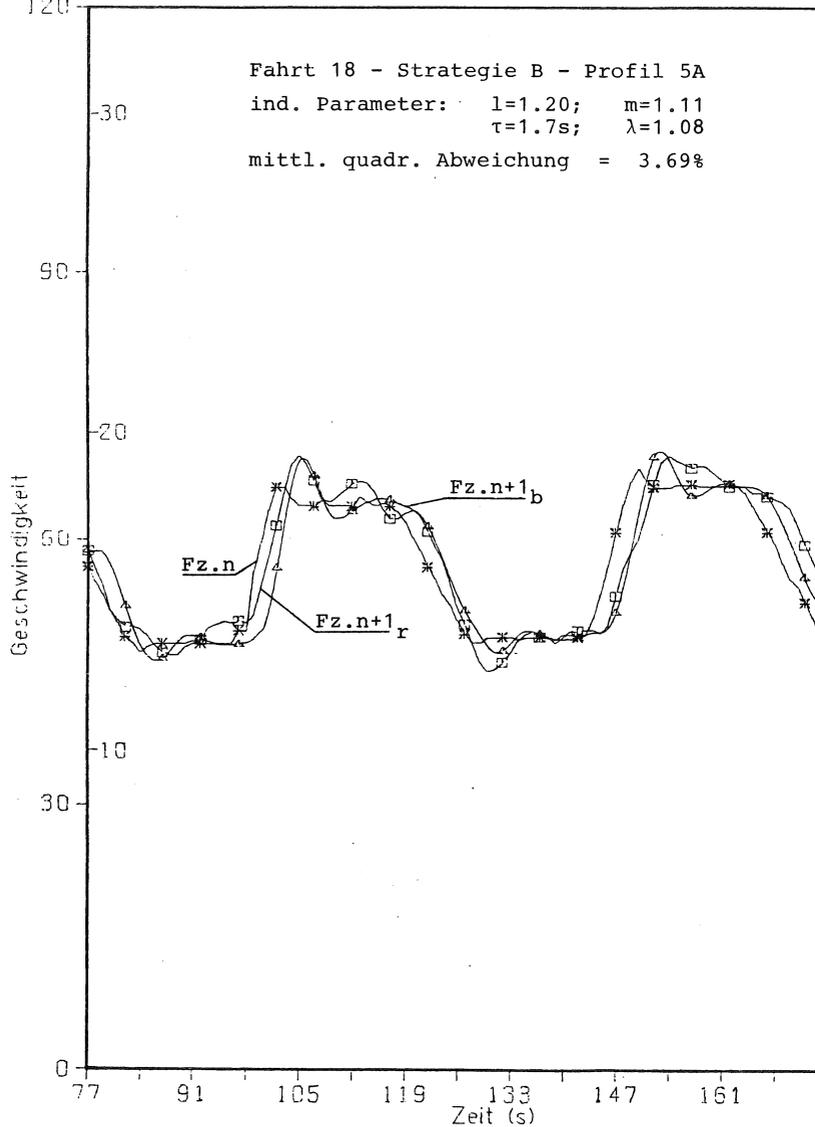


Abb. 4.42: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 18 - individuelle Parameter

(km/h) (m/s)

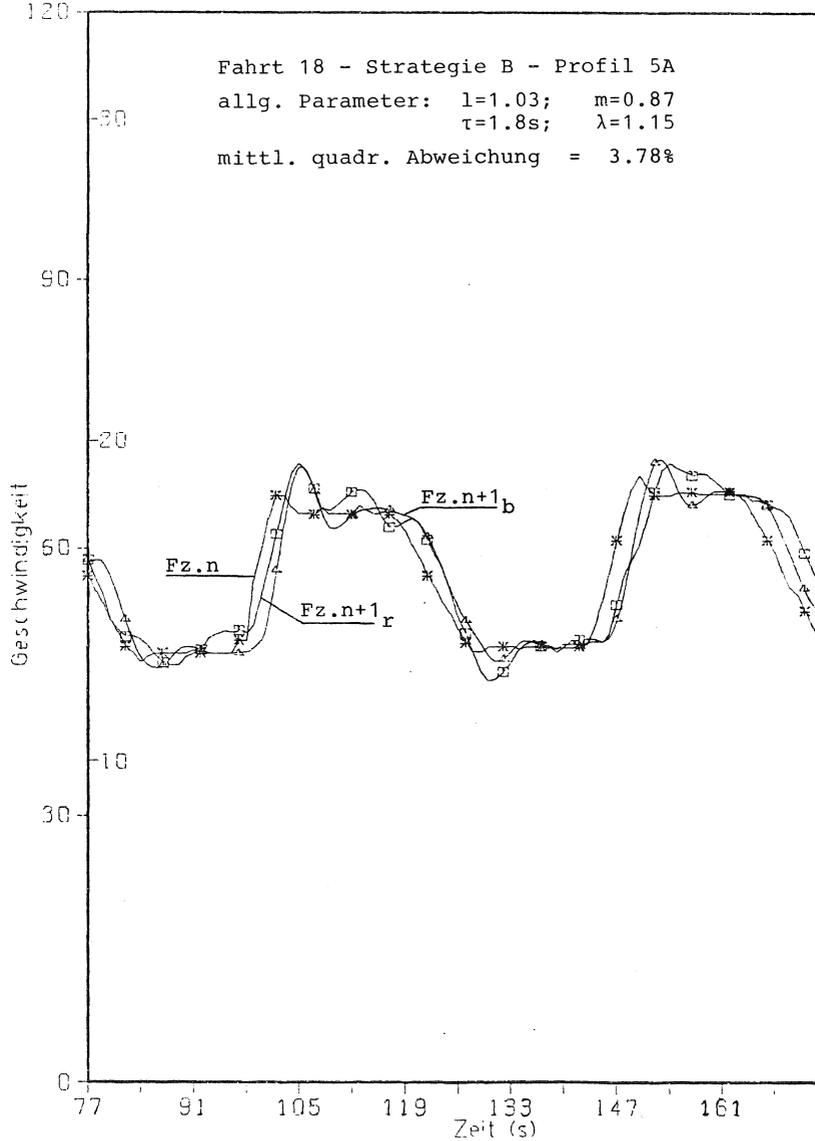


Abb. 4.43: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real) eines Folgefahrzeugs
Fahrt 18 - allgemeine Parameter

(km/h) (m/s)

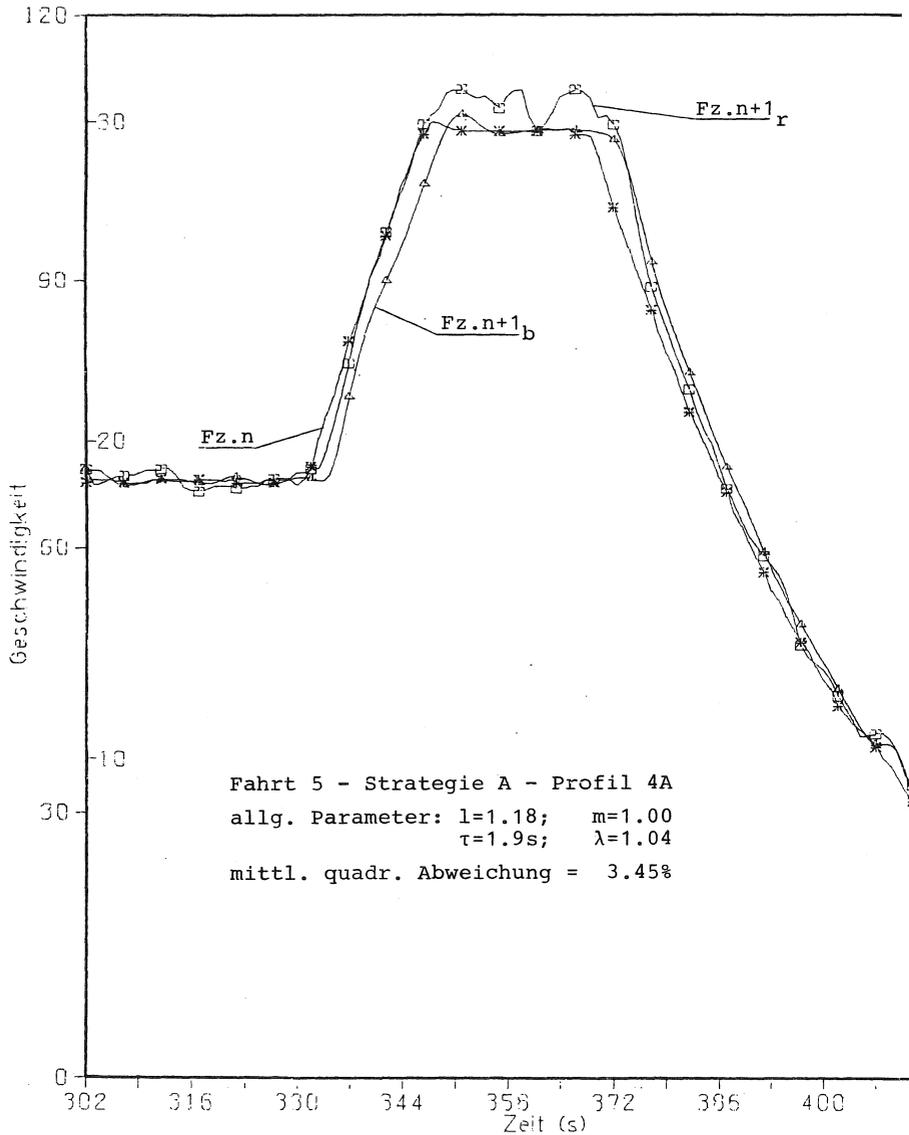


Abb. 4.44: Ganglinien der Geschwindigkeit (berechnet und real eines Folgefahrzeugs
Fahrt 5 - allgemeine Parameter

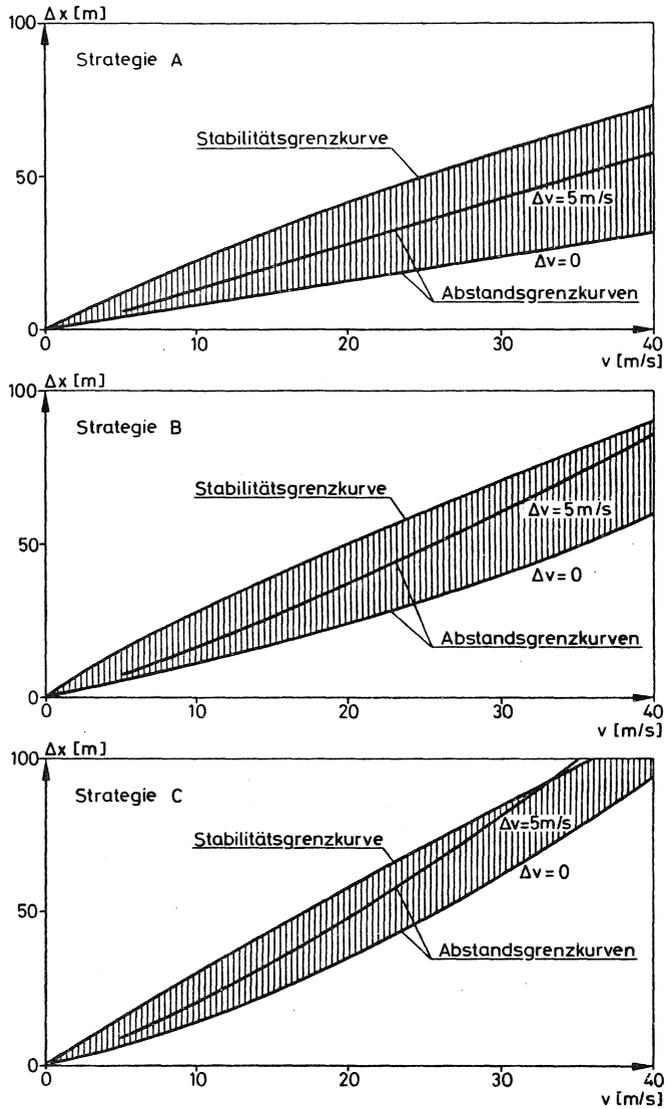


Abb. 4.45: Abstandsgrenzkurven und Grenzkurven stabiler Abstände

Hauptprogrammablauf STABIL

AUFGABE: Berechnung der instabilen Fahrtanteile und zeichnen folgender Diagramme: Instabilitäten einzelner Fahrzeuge und kumulierte Instabilitäten und Geschwindigkeiten über die Zeit

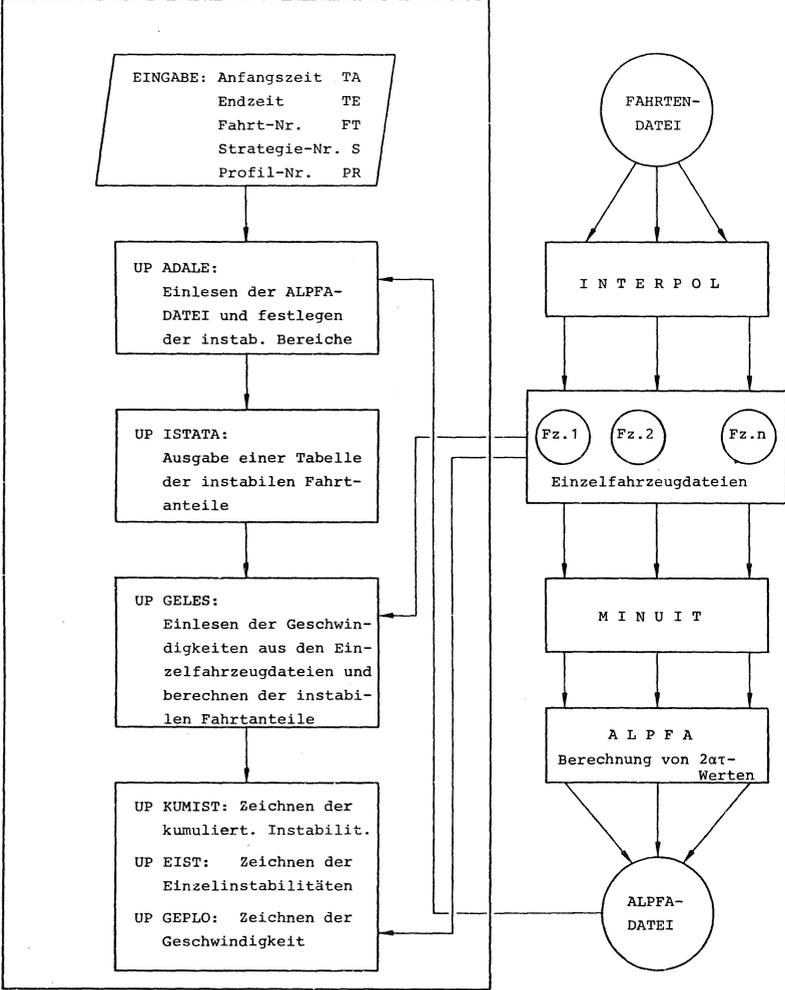


Abb. 4.46: Hauptprogrammablauf von STABIL

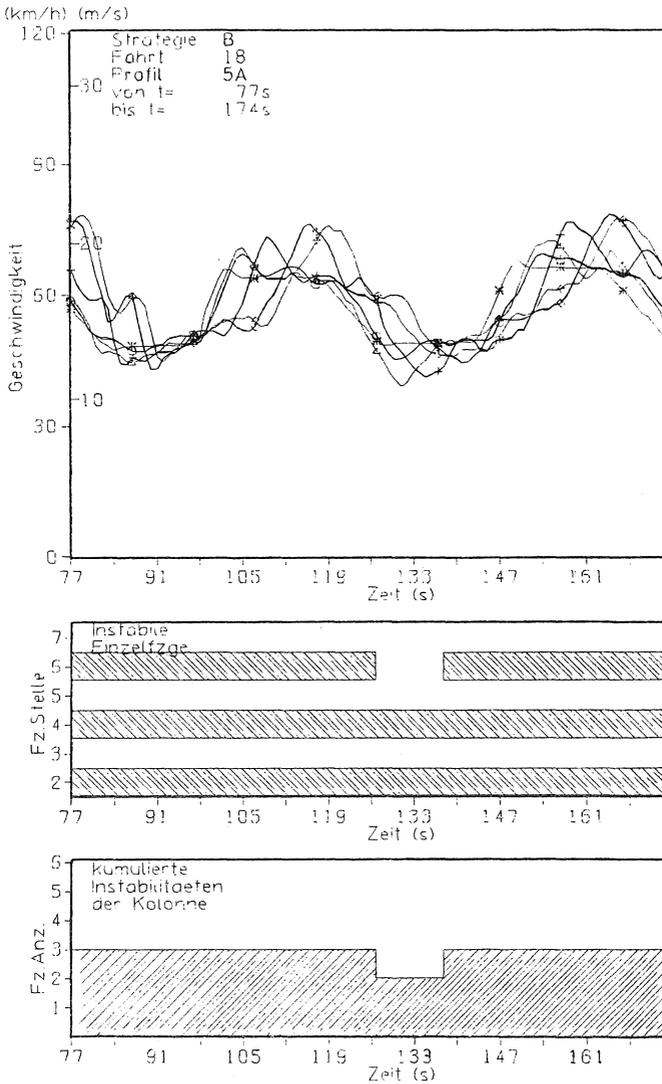


Abb. 4.47: Geschwindigkeits- und Stabilitäts-
ganglinien
Fahrt 18 - Strategie B - Profil 5A

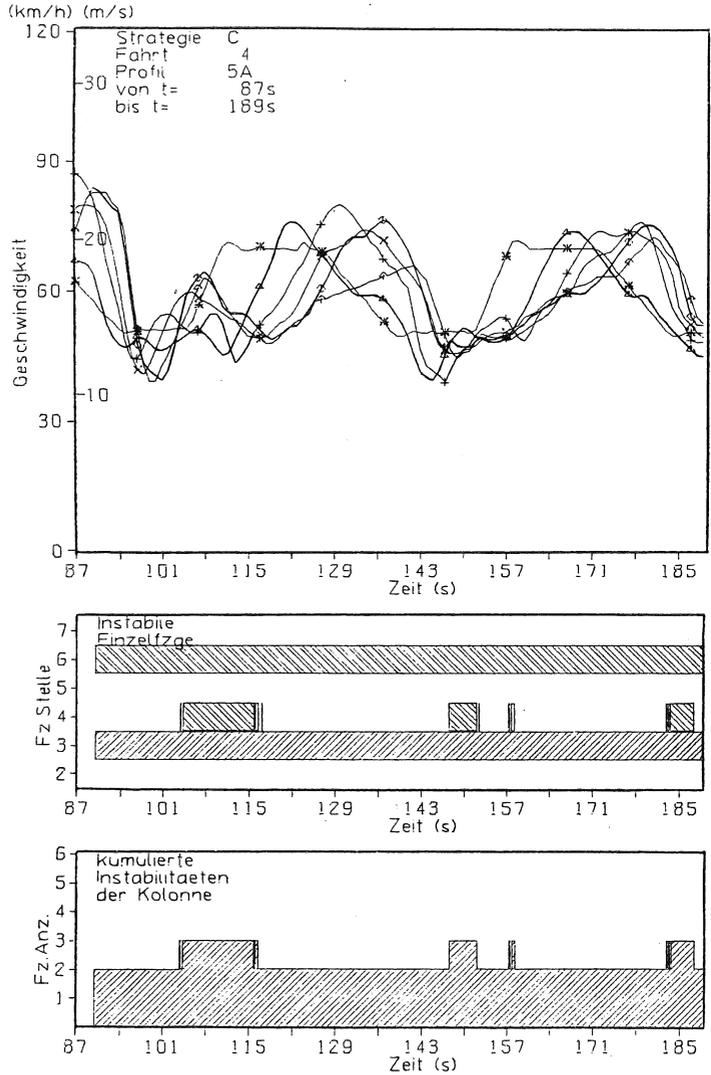


Abb. 4.48: Geschwindigkeits- und Stabilitäts-
 ganglinien
 Fahrt 4 - Strategie C - Profil 5A

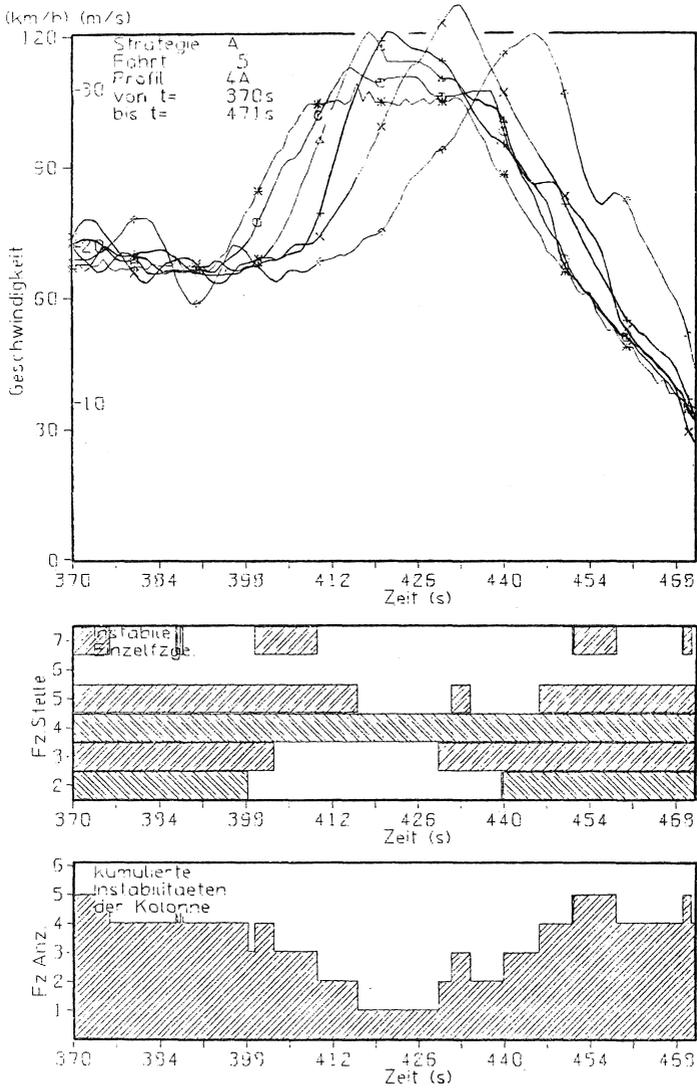


Abb. 4.49: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
 Fahrt 5 - Strategie A - Profil 4A

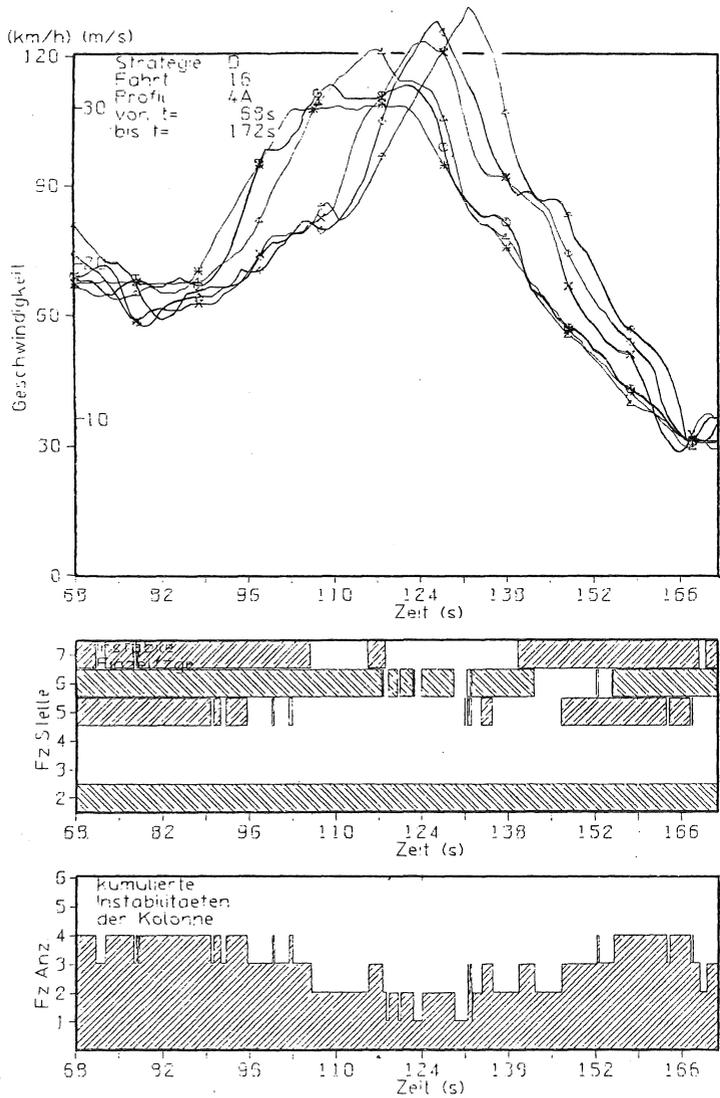


Abb. 4.50: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
 Fahrt 16 - Strategie D - Profil 4A

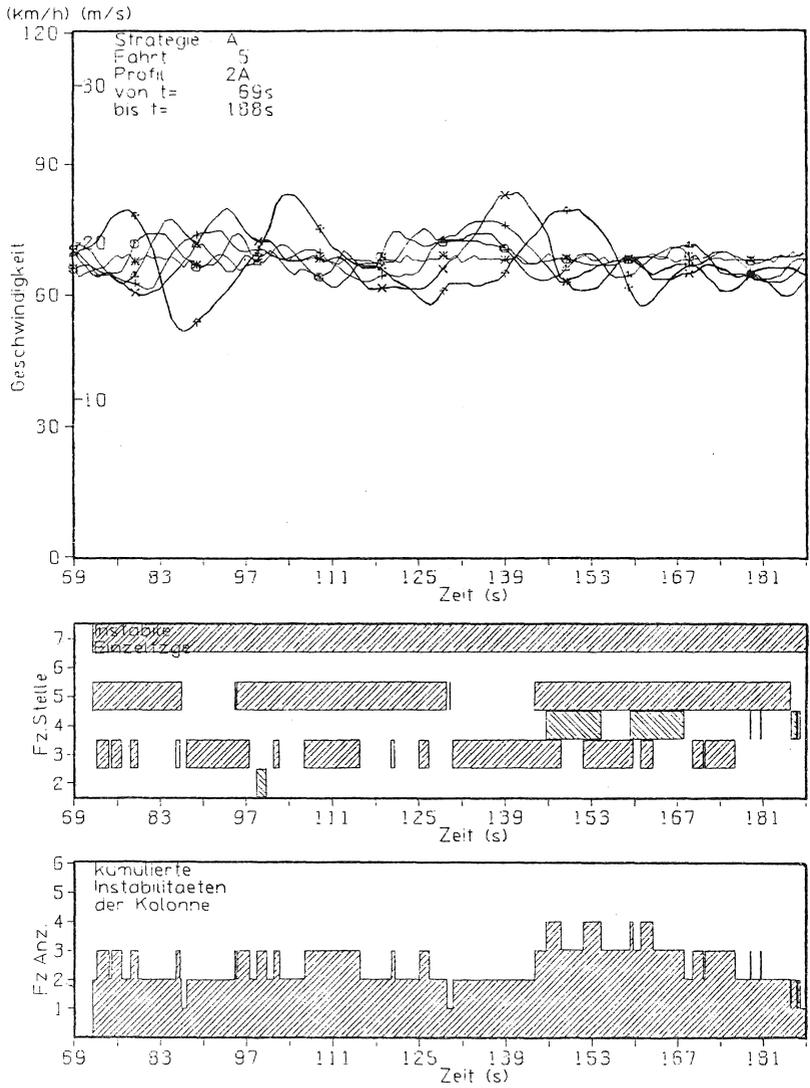


Abb. 4.51: Geschwindigkeits- und Stabilitätsganglinien
Fahrt 5 - Strategie A - Profil 2A

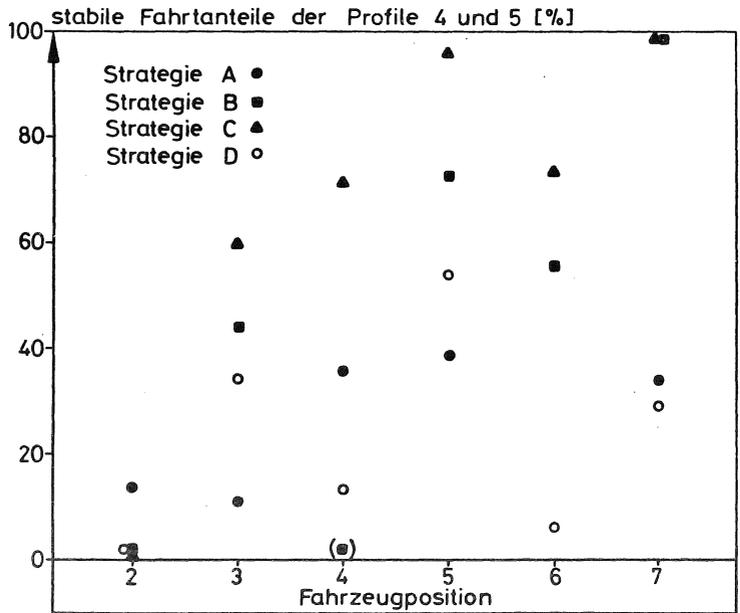
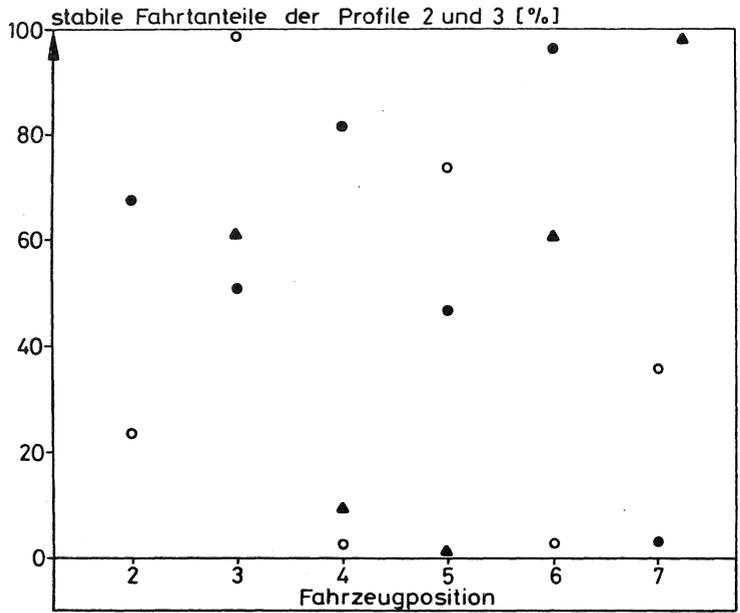


Abb. 4.52: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile

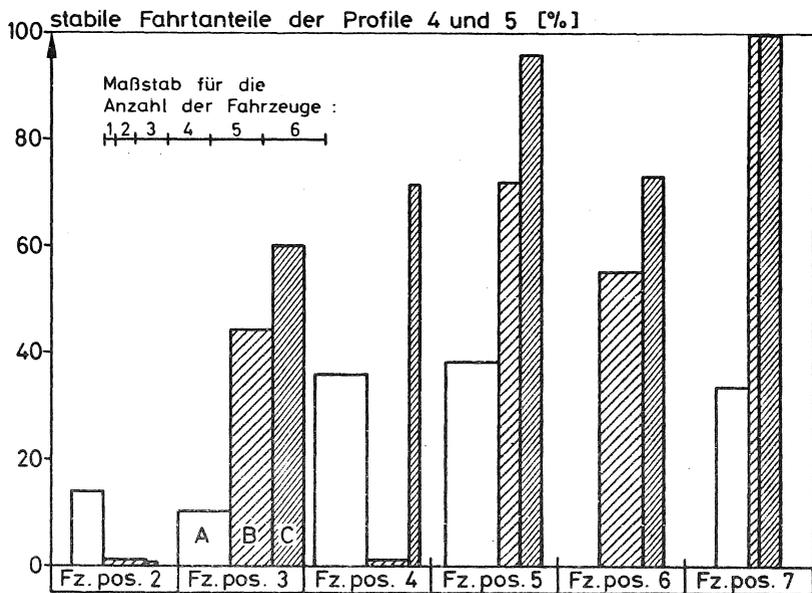
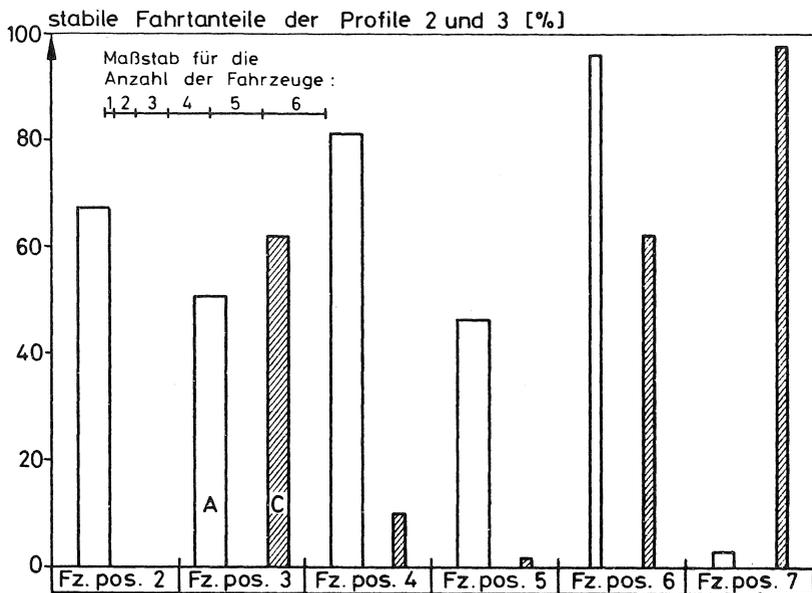


Abb. 4.53: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile der Einstellungen A, B und C

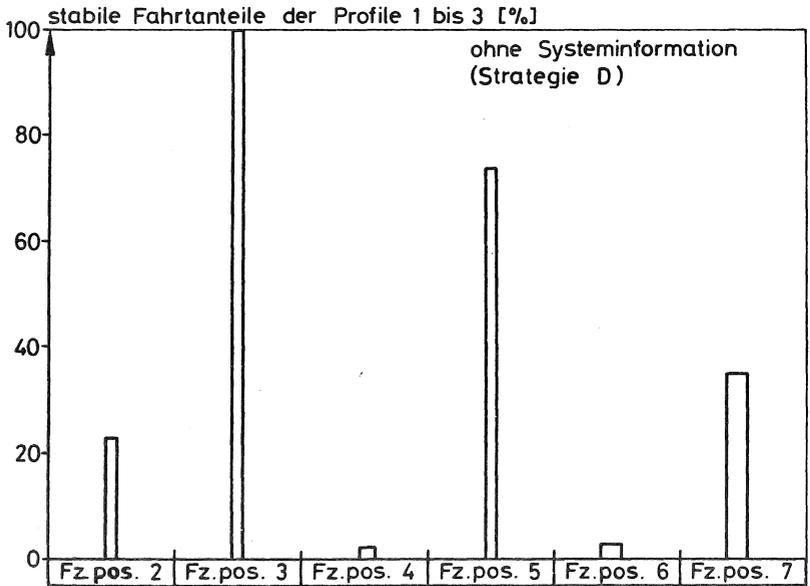
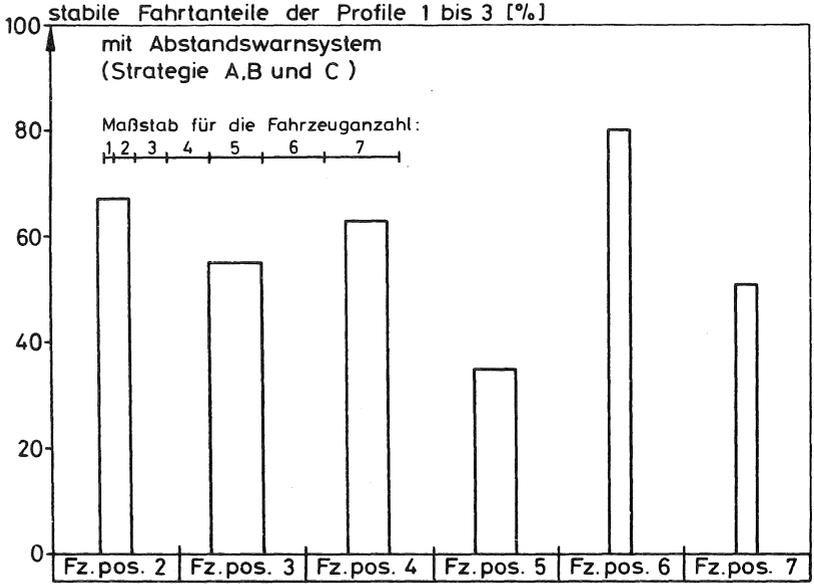


Abb. 4.54: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile der Profile 1 bis 3 mit und ohne Systeminformation

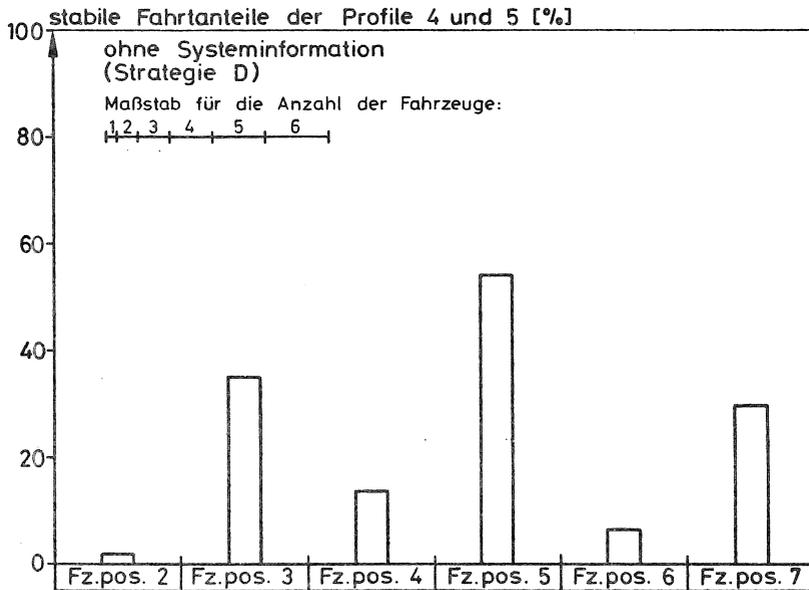
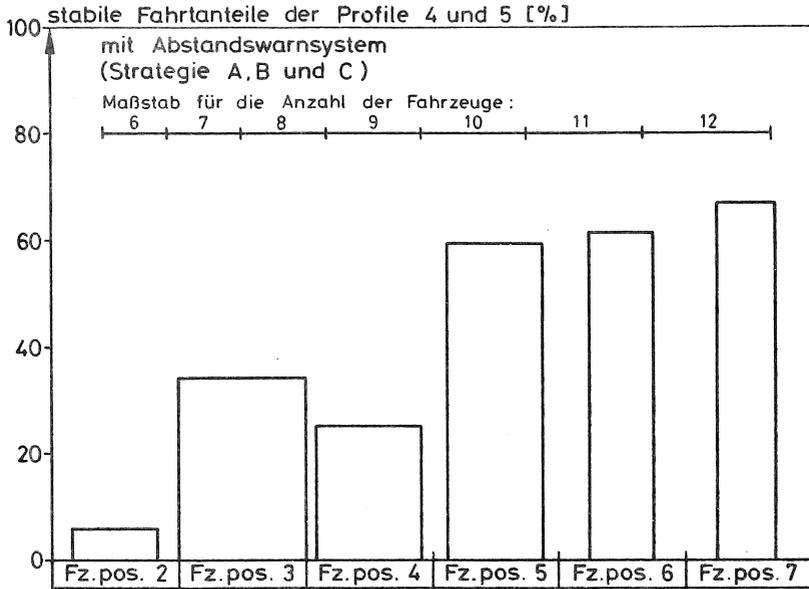


Abb. 4.55: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile der Profile 4 und 5 mit und ohne Systeminformation

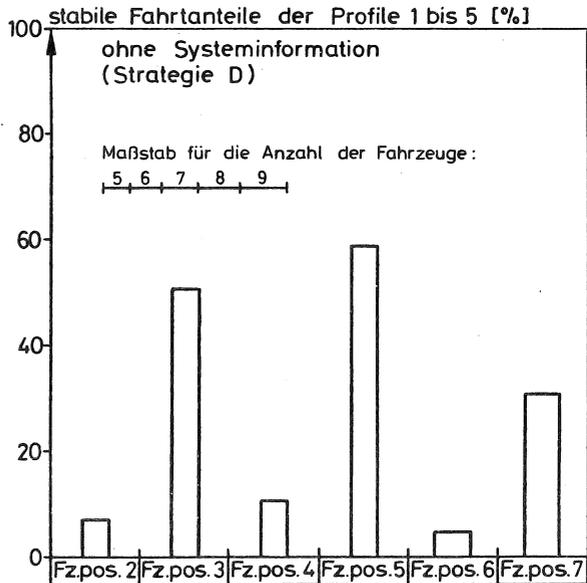
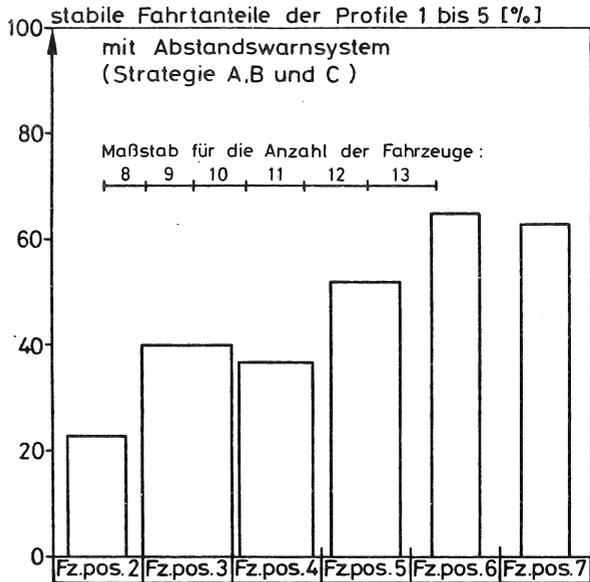


Abb. 4.56: Positionsabhängige stabile Fahrtanteile aller Fahrten mit und ohne Systeminformation

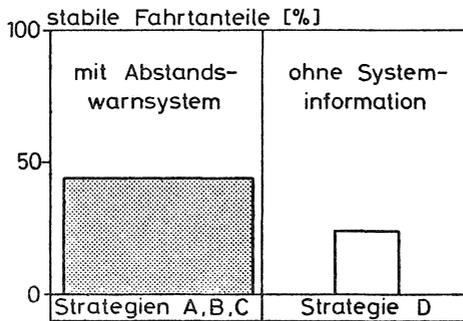
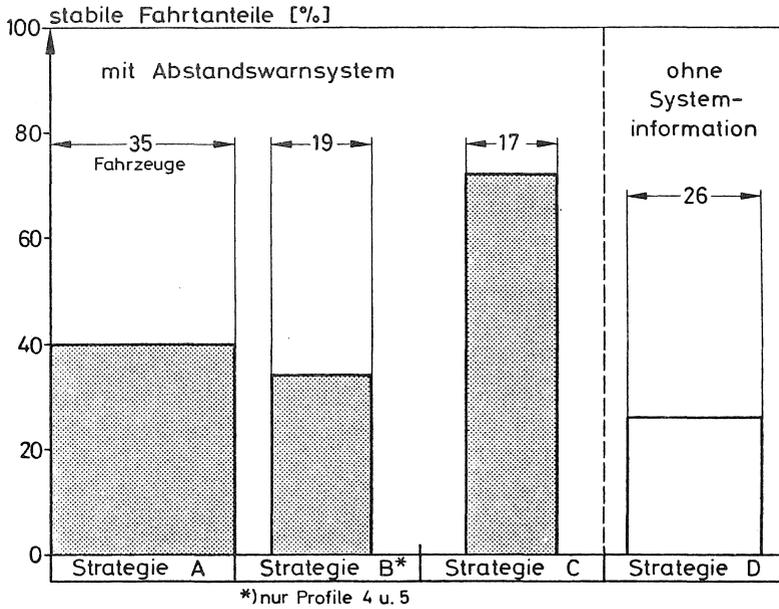


Abb. 4.57: Stabile Fahrtanteile mit und ohne Abstandsinformation

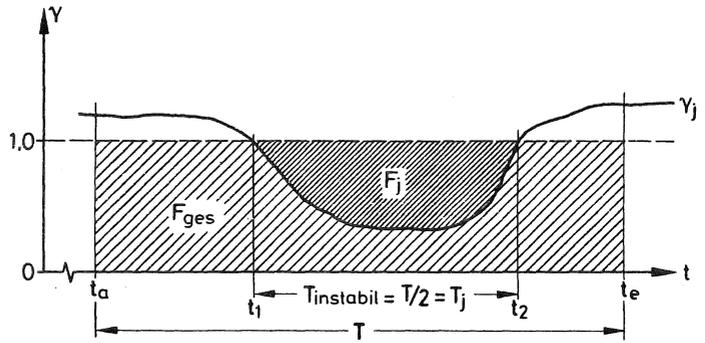
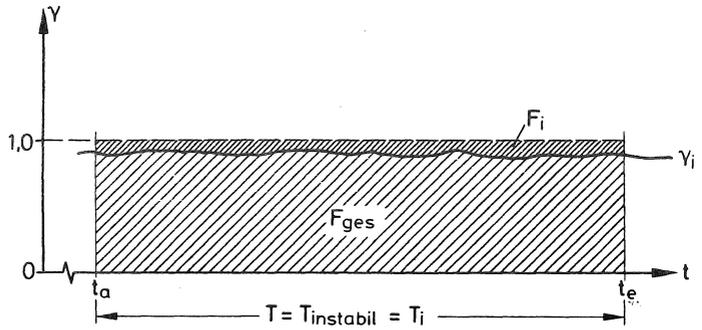


Abb. 4.58: Prinzipskizze zur Erläuterung der instabilen Fläche

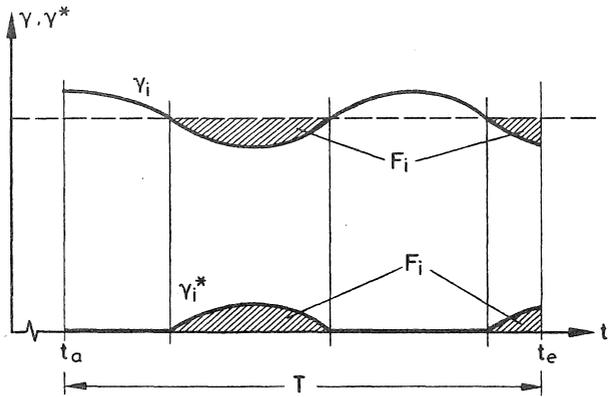


Abb. 4.59: Funktionale Herleitung der instabilen Fläche über die Zeit

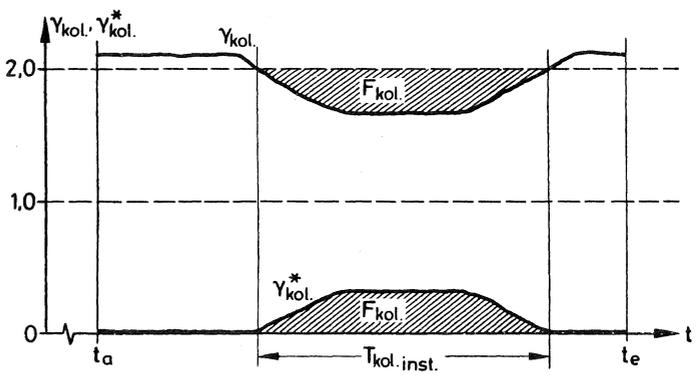
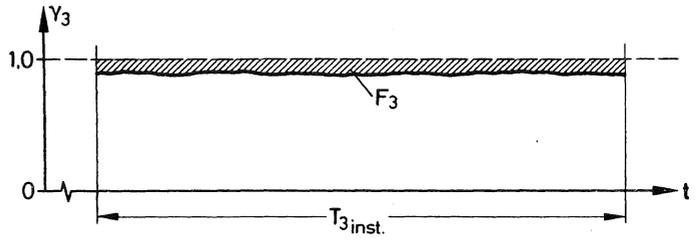
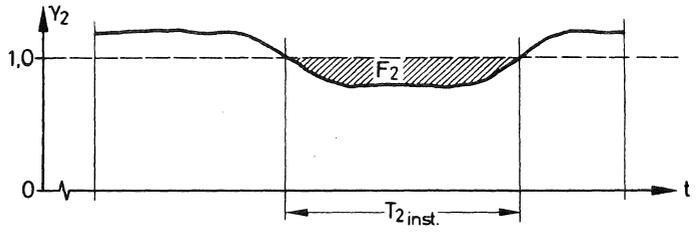


Abb. 4.60: Grafische Darstellung der Ermittlung der instabilen Kolonnenfläche

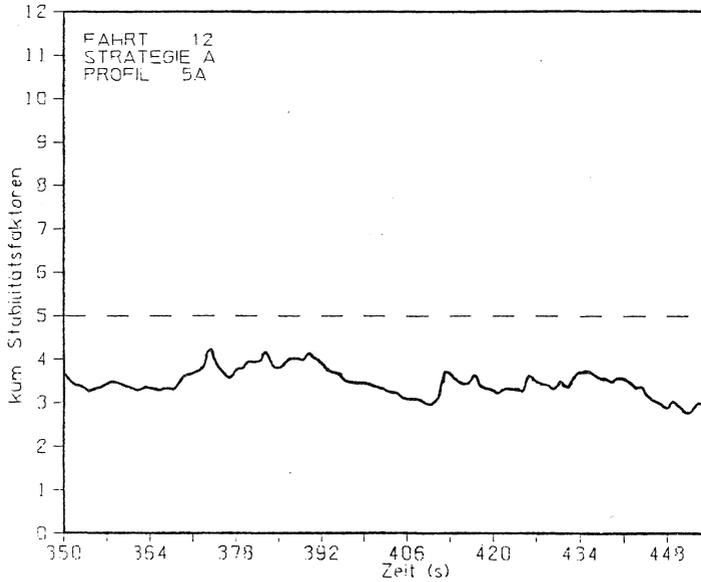
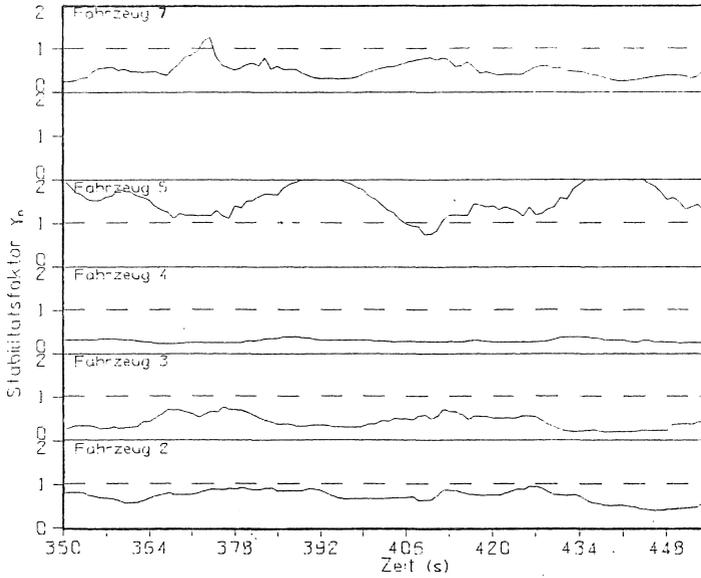


Abb. 4.61: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
 Fahrt 12 - Strategie A - Profil 5A

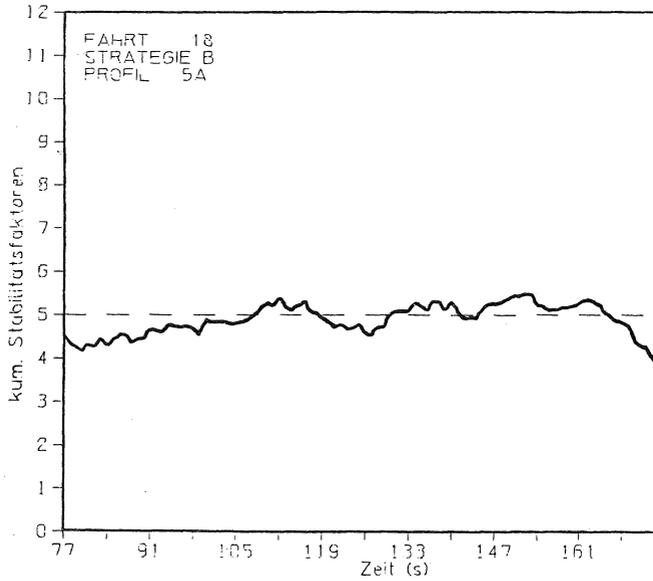
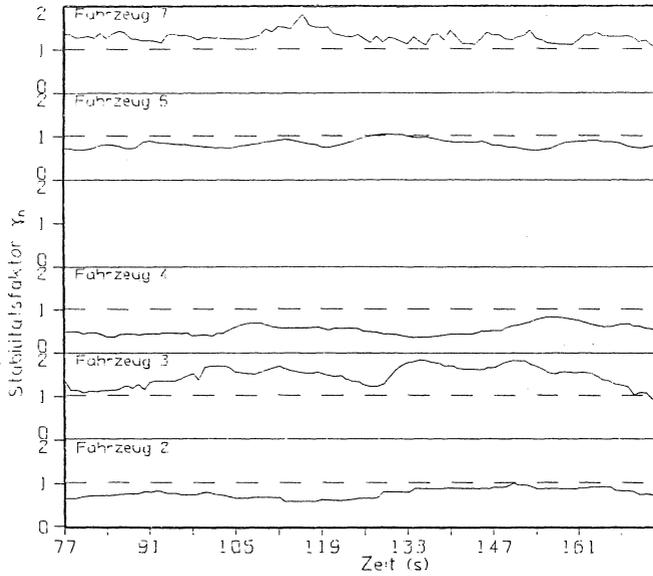


Abb. 4.62: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
 Fahrt 18 - Strategie B - Profil 5A

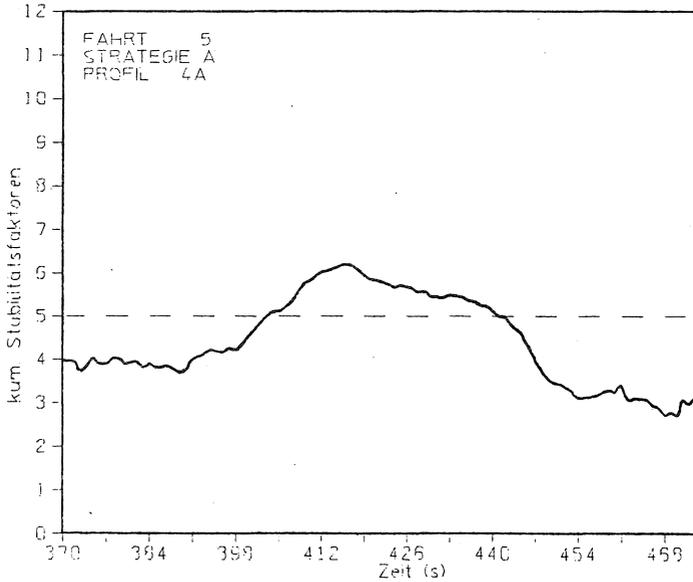
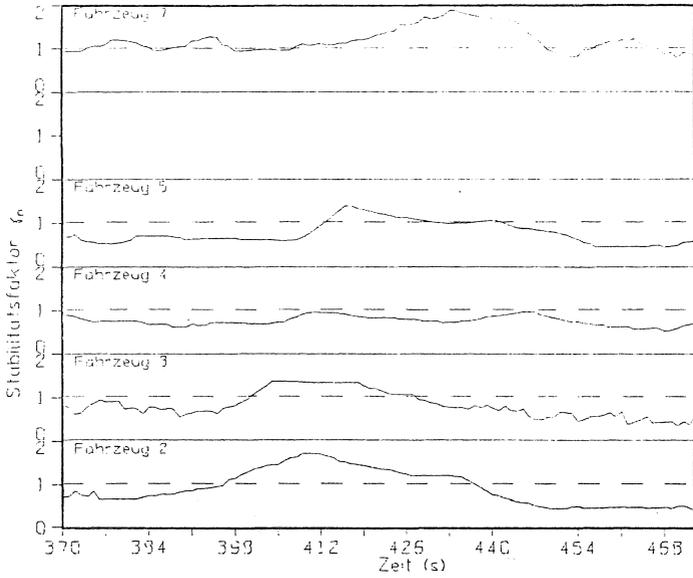


Abb. 4.63: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
 Fahrt 5 - Strategie A - Profil 4A

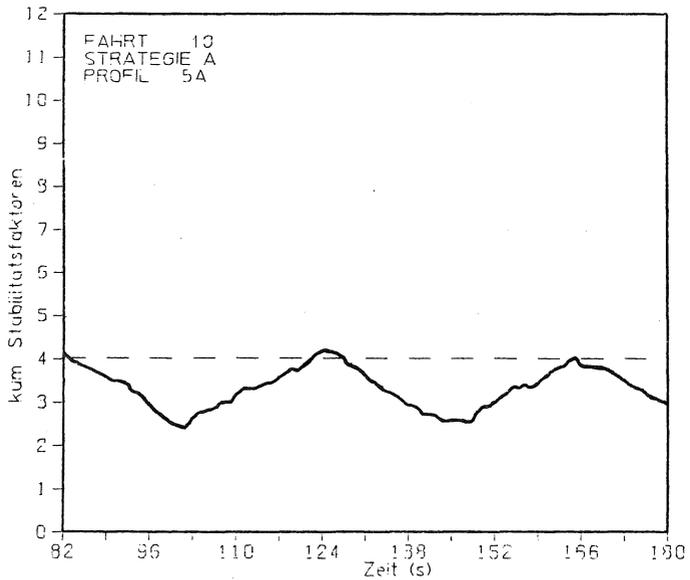
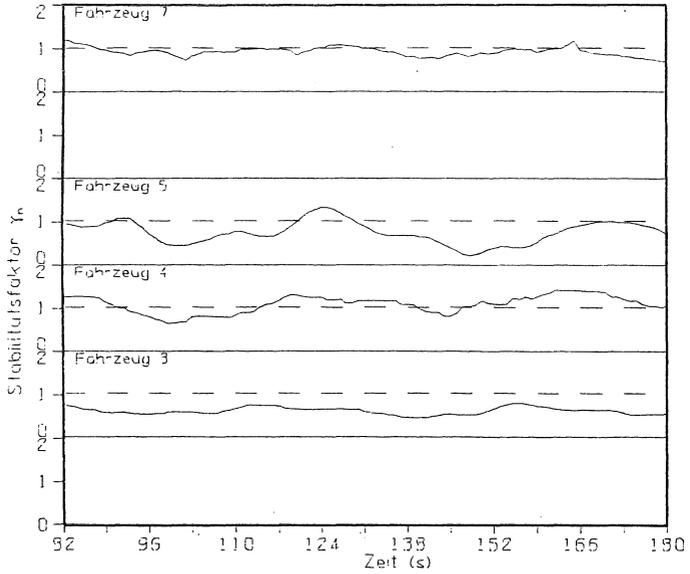


Abb. 4.64: Einzelne und kumulierte Stabilitätsfaktoren
 Fahrt 10 - Strategie A - Profil 5A

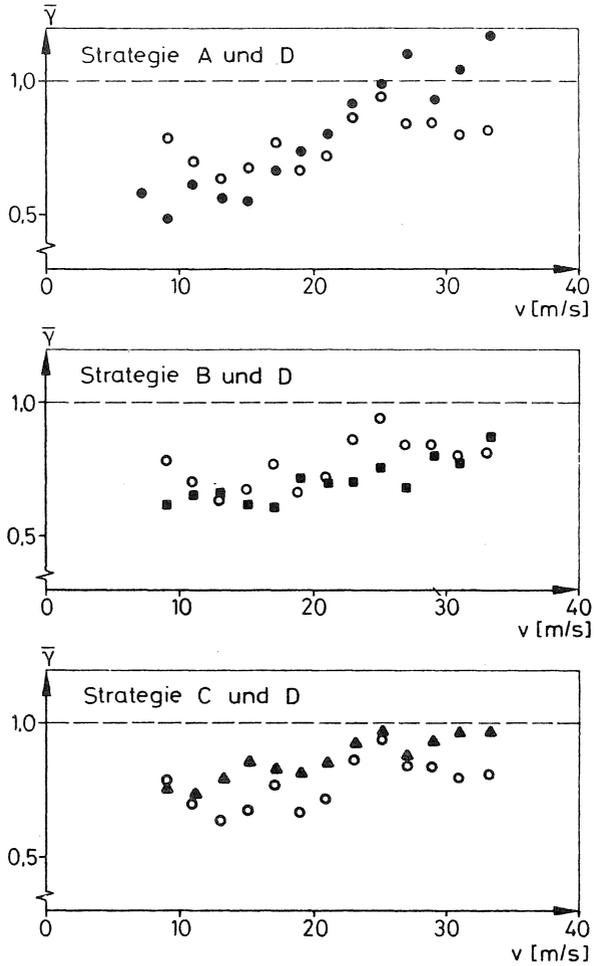


Abb. 4.65: Stabilitätsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

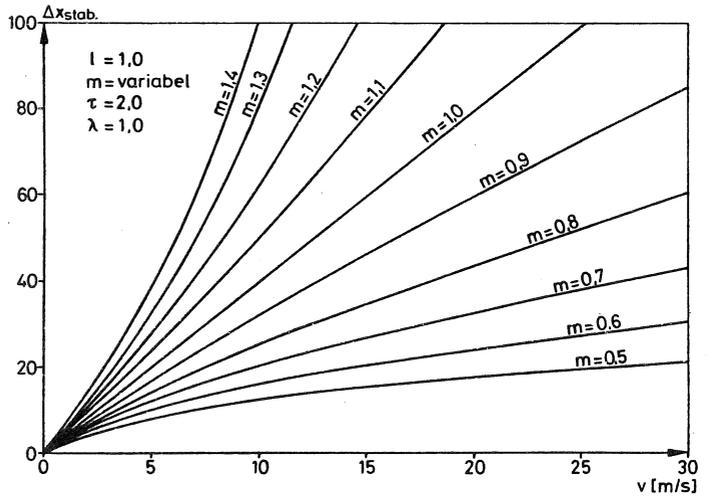
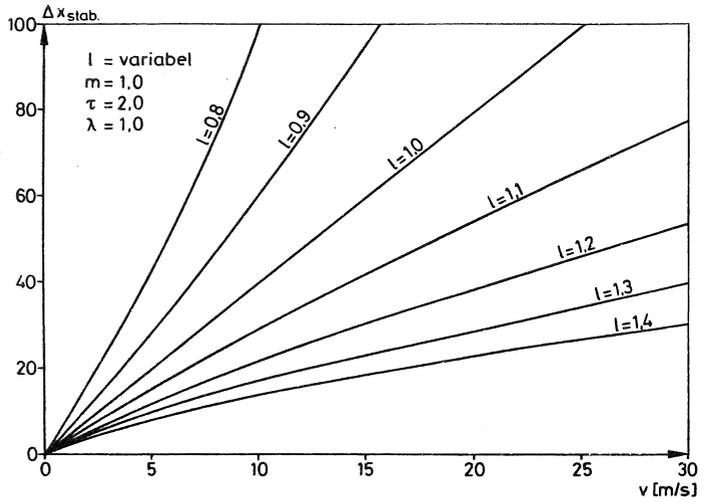


Abb. 4.66: Abstandsänderungen durch Parameter-
 variation von l und m

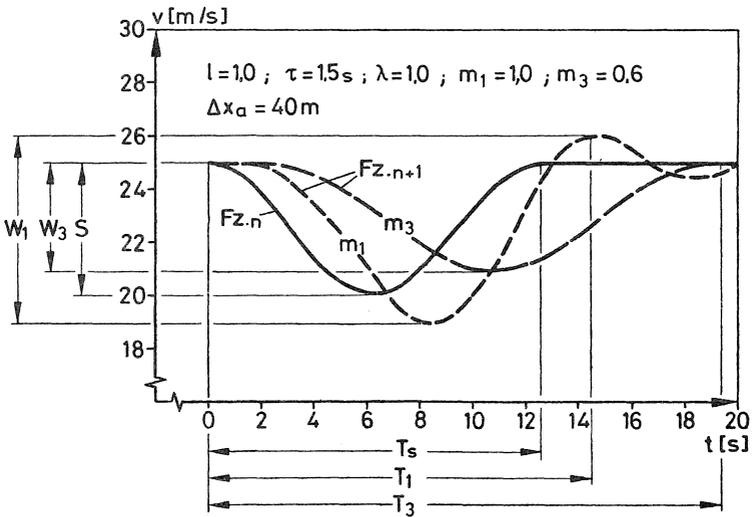
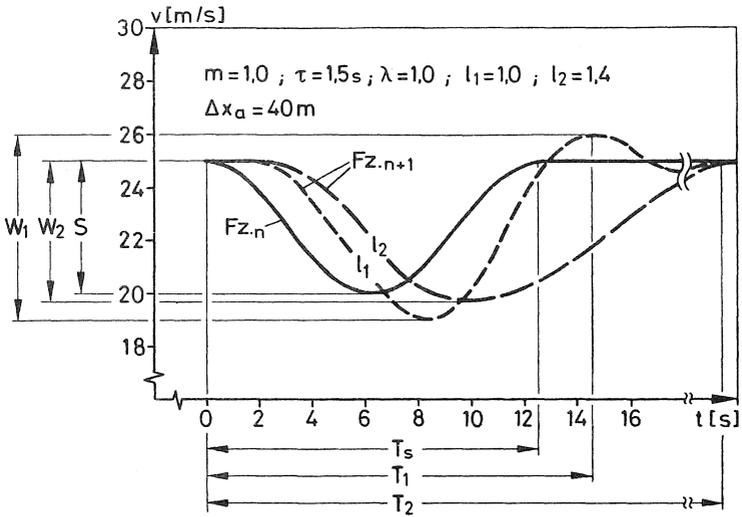


Abb. 4.67: Stör- und Wirkgrößenänderungen bei Parametervariationen von l und m

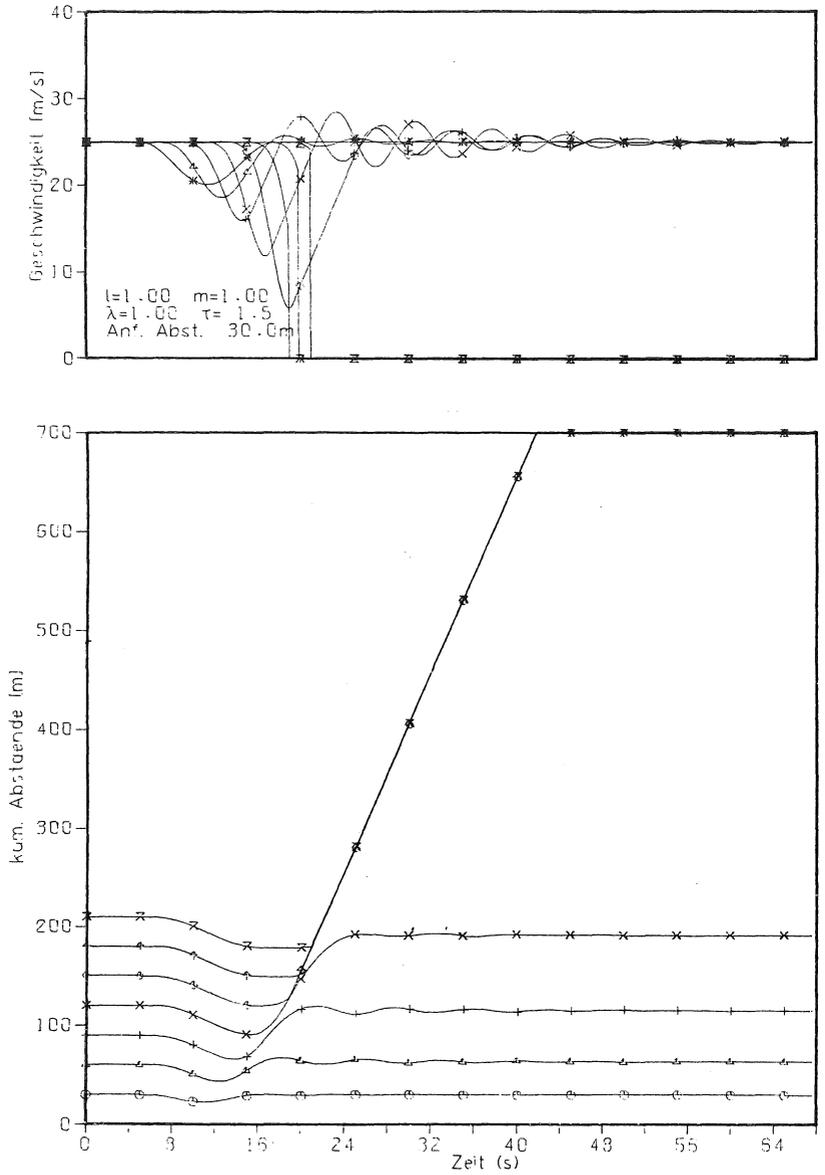


Abb. 4.68: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe - Anfangsabstand = 30 m

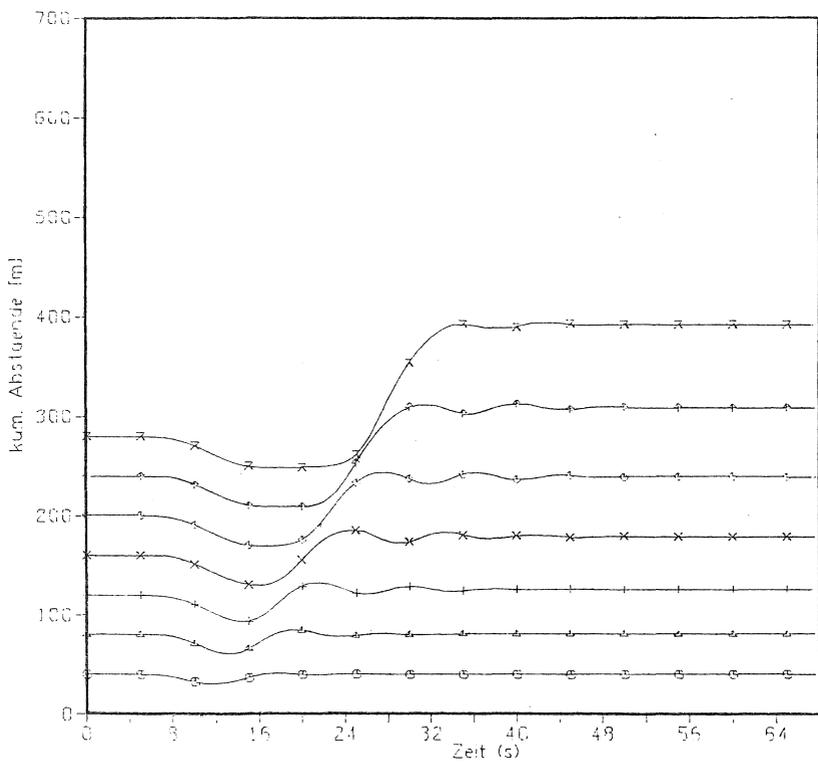
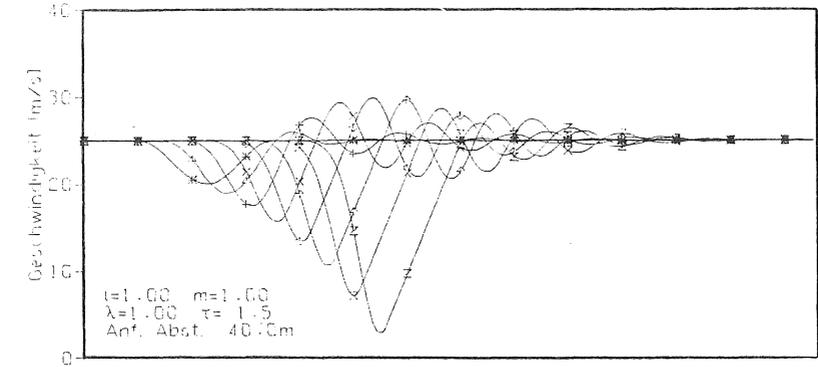


Abb. 4.69: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe - Anfangsabstand = 40 m

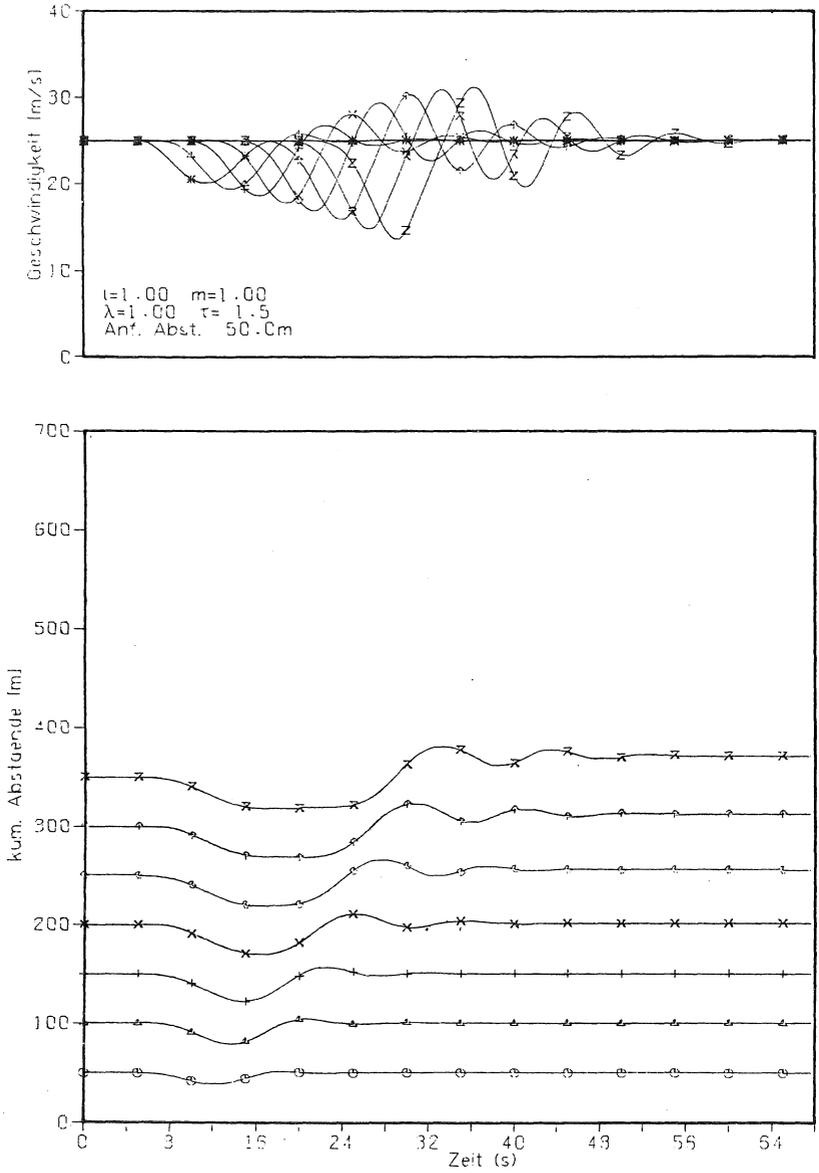


Abb. 4.70: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe - Anfangsabstand = 50 m

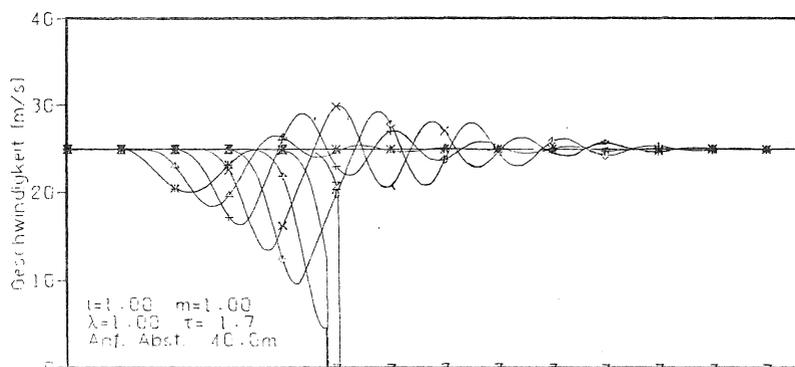
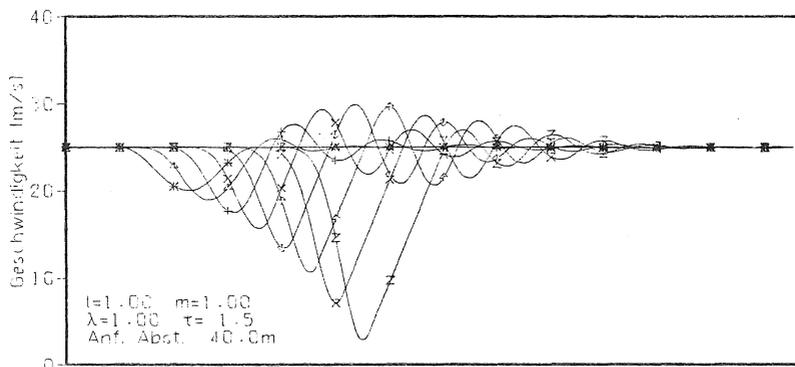
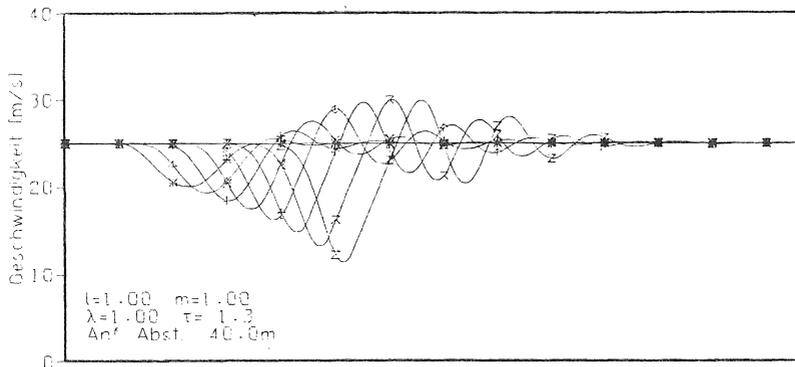


Abb. 4.71: Simulierte Geschwindigkeitsverläufe bei Variation des Reaktionszeitparameters τ

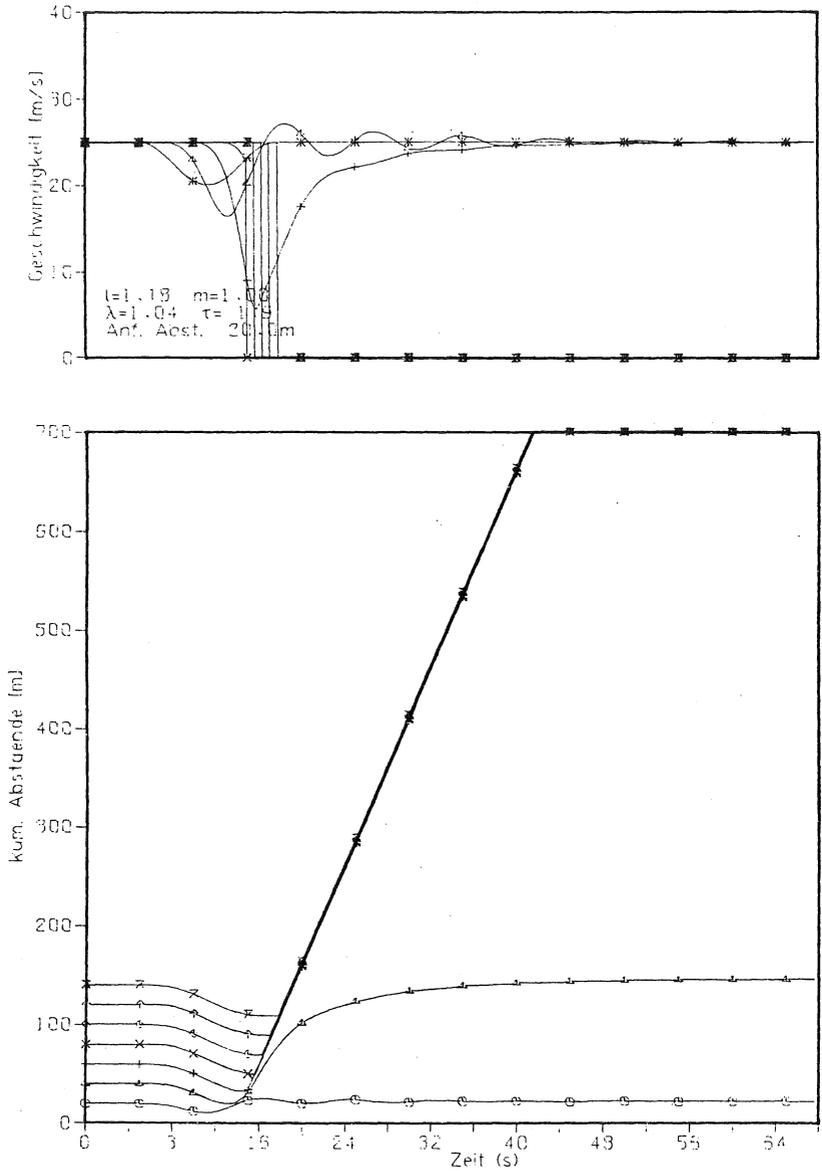


Abb. 4.72: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination A; (Anfangsbestand = strategieabh. Sollabstand)

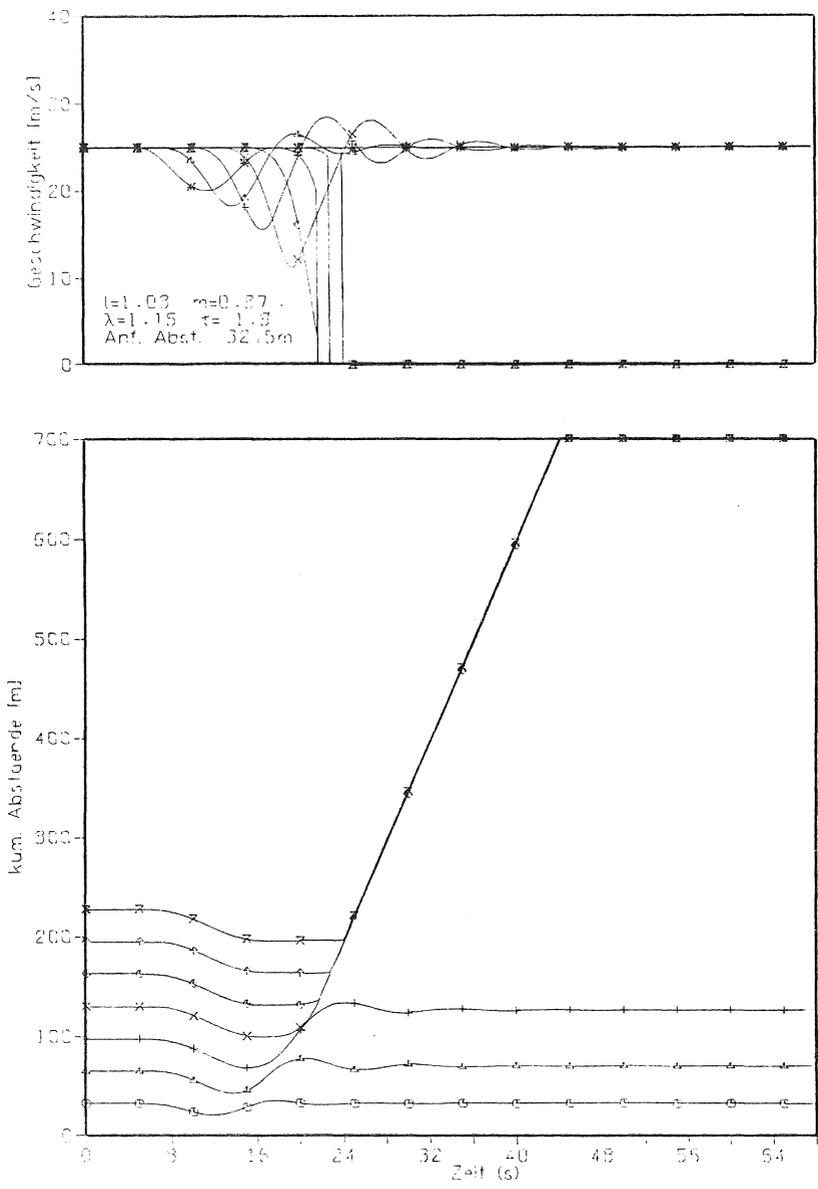


Abb. 4.73: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination B; (Anfangsabstand = strategieabh. Sollabstand)

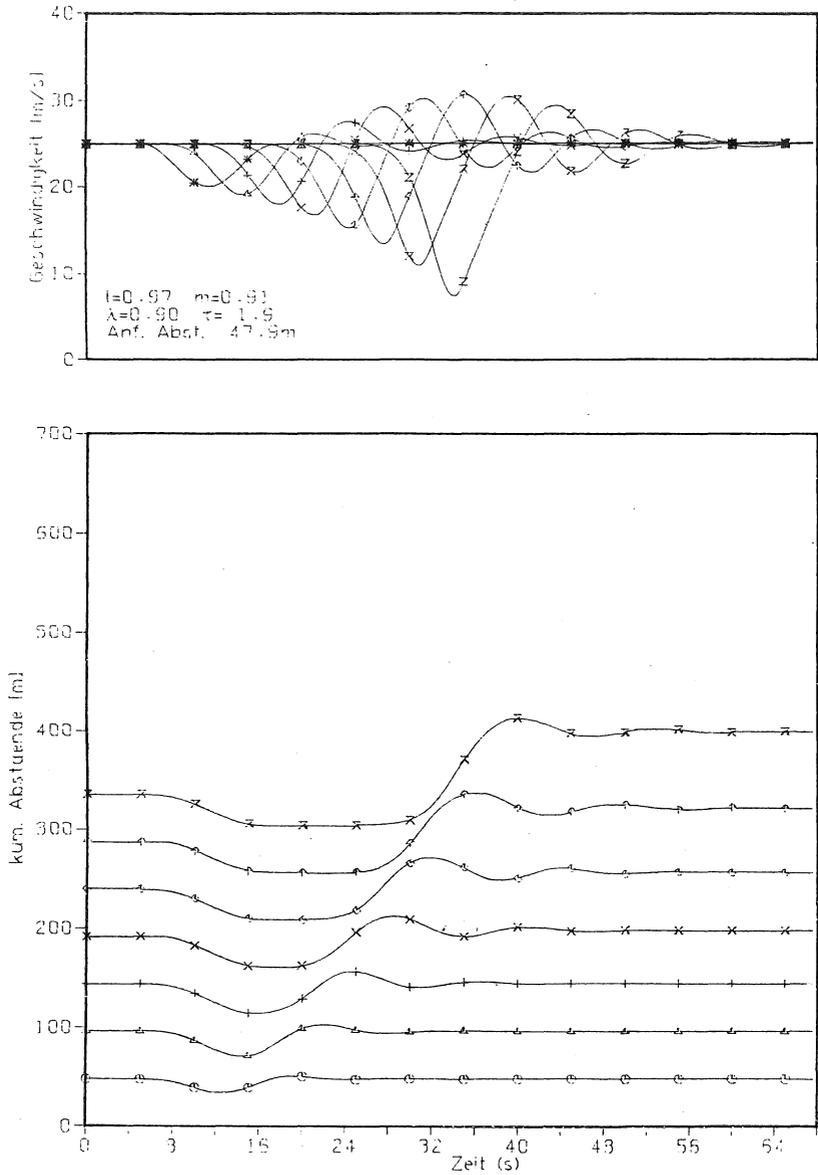


Abb. 4.74: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination C; (Anfangsbestand = strategieabh. Sollabstand)

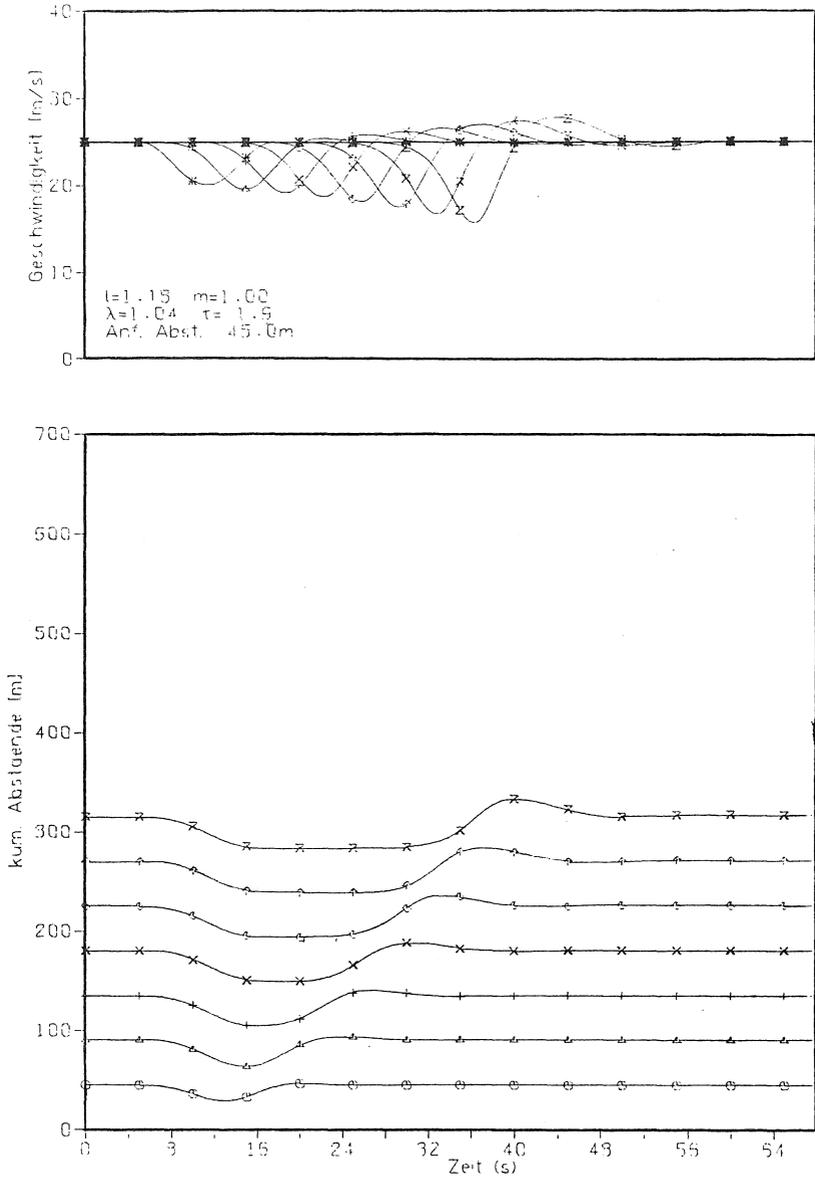


Abb. 4.75: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination A; (Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)

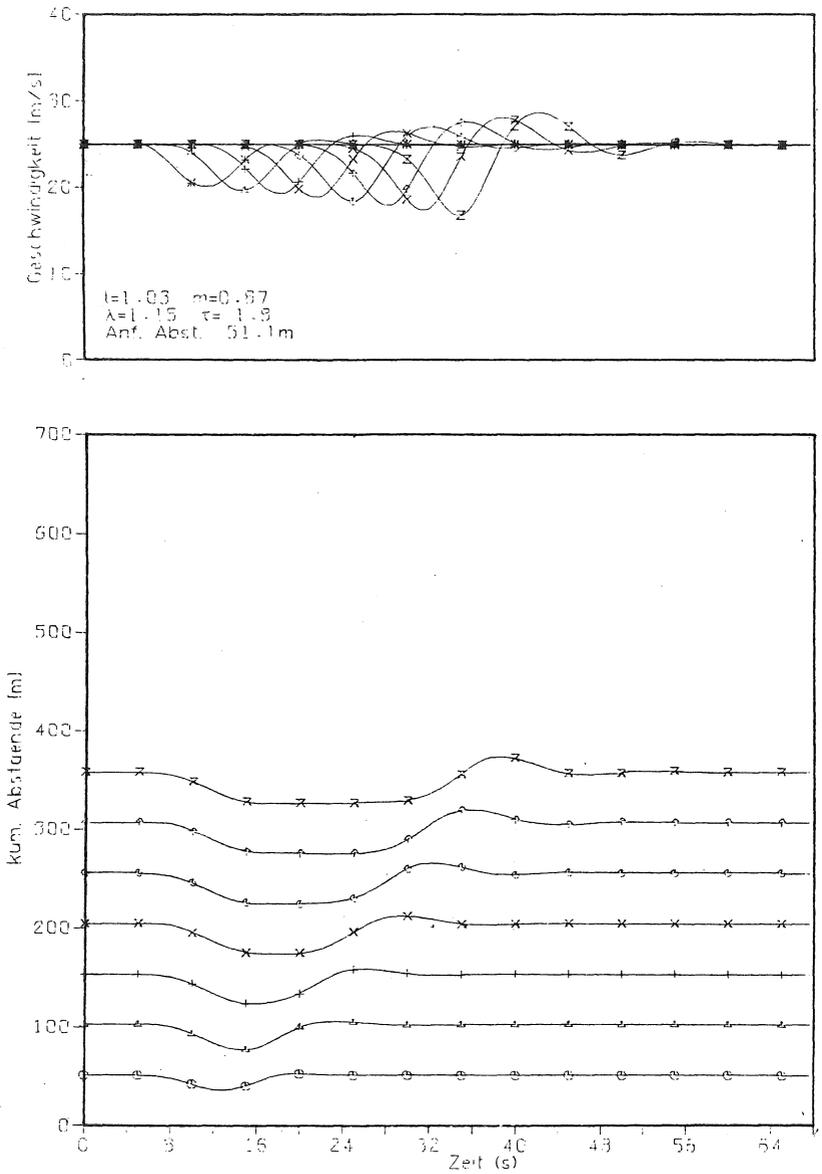


Abb. 4.76: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination B; (Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)

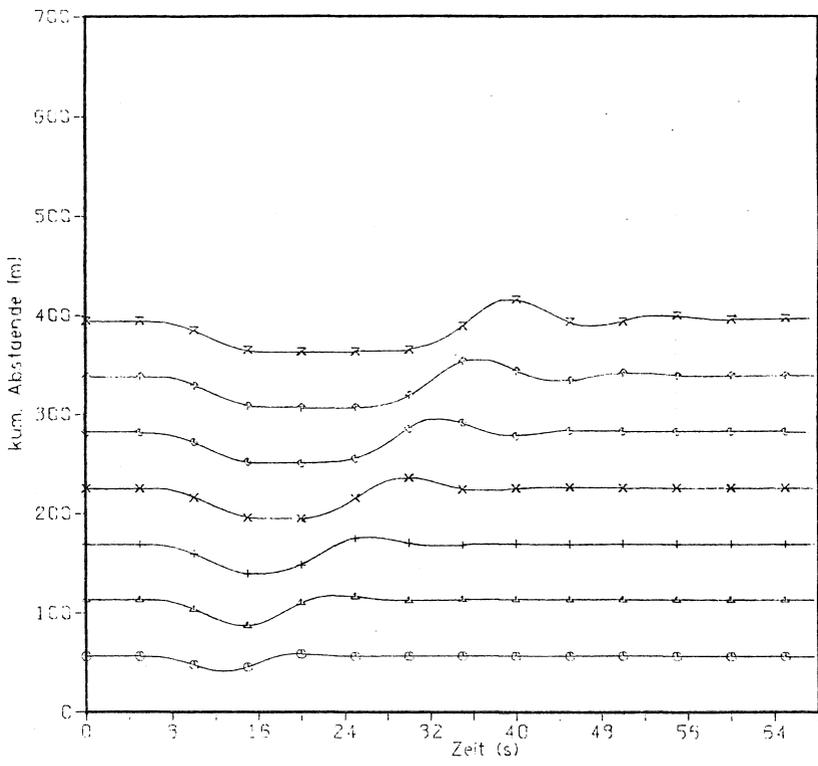
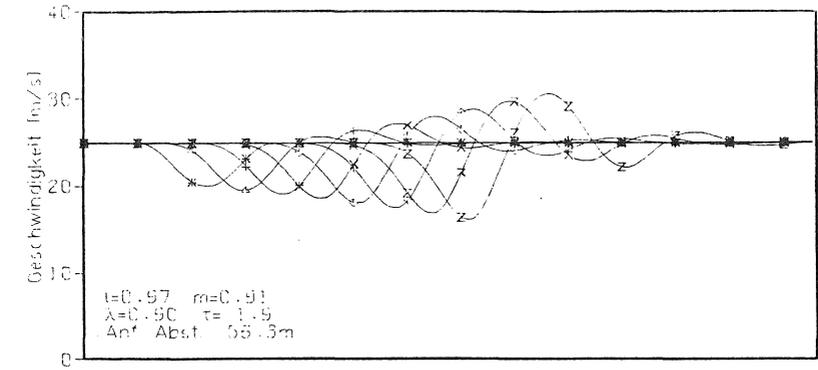


Abb. 4.77: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination C; (Anfangsabstand = mittl. gefahrener Abstand)

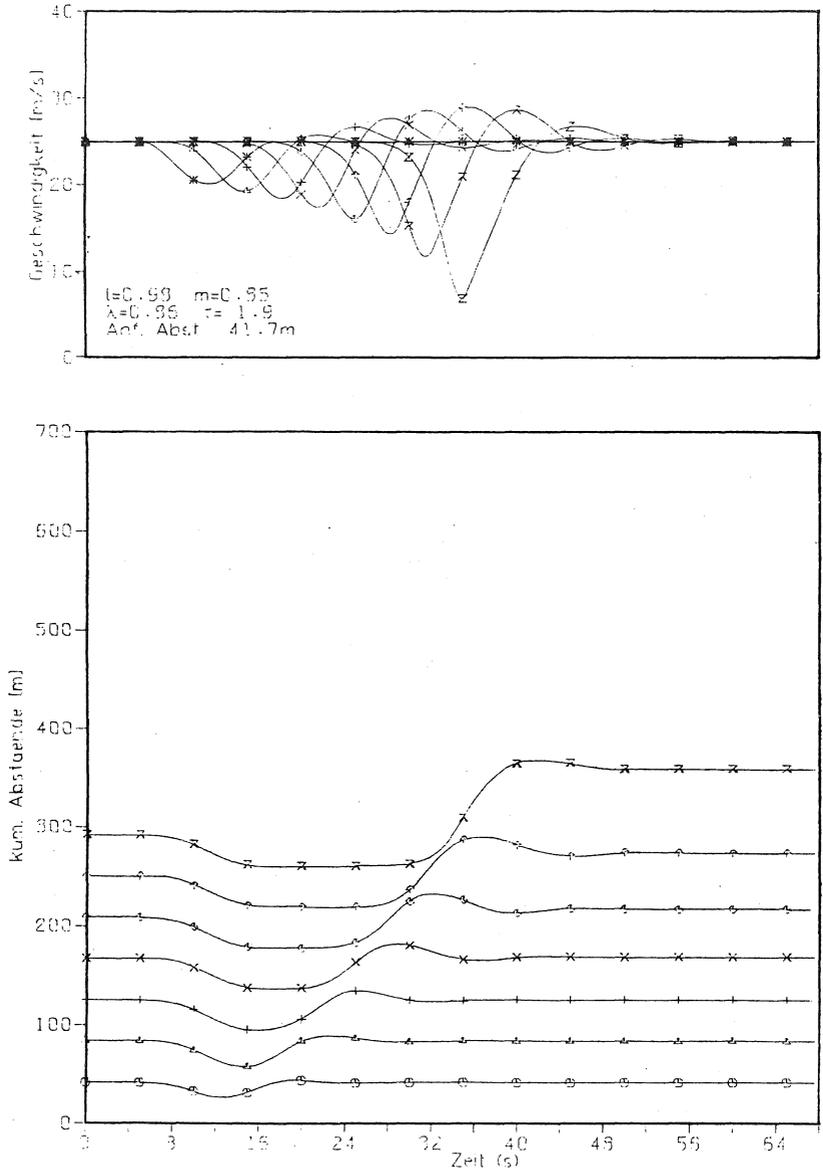


Abb. 4.78: Simulierte Geschwindigkeits- und Abstandsverläufe der Parameterkombination D; (Anfangsbestand = mittl. gefahrener Abstand)

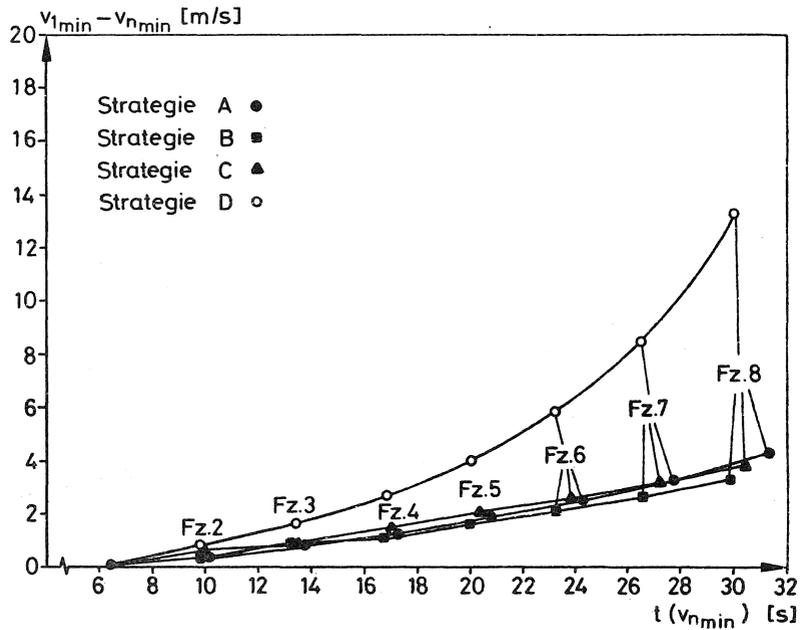


Abb. 4.79: Wirkungsdauern und Wirkgrößenzunahmen der Strategien A bis D

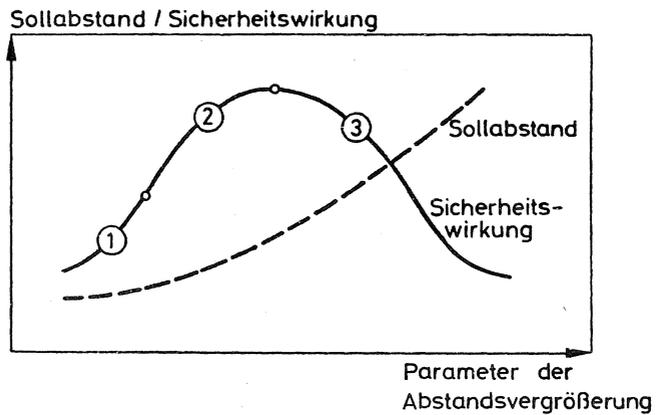
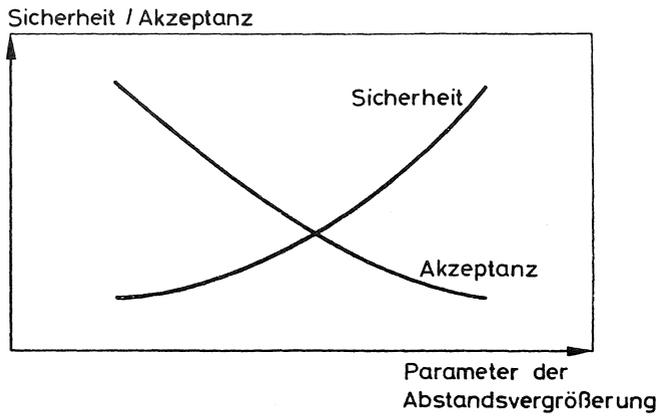


Abb. 5.1: Qualitative Darstellung der Akzeptanz- und Sicherheitsproblematik

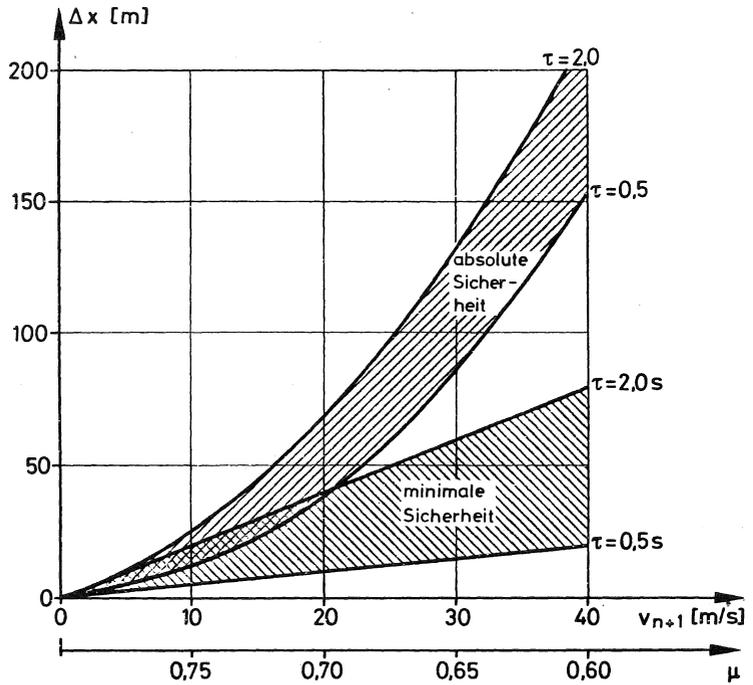


Abb. 5.2: Mindestabstände bei minimaler und absoluter Sicherheit

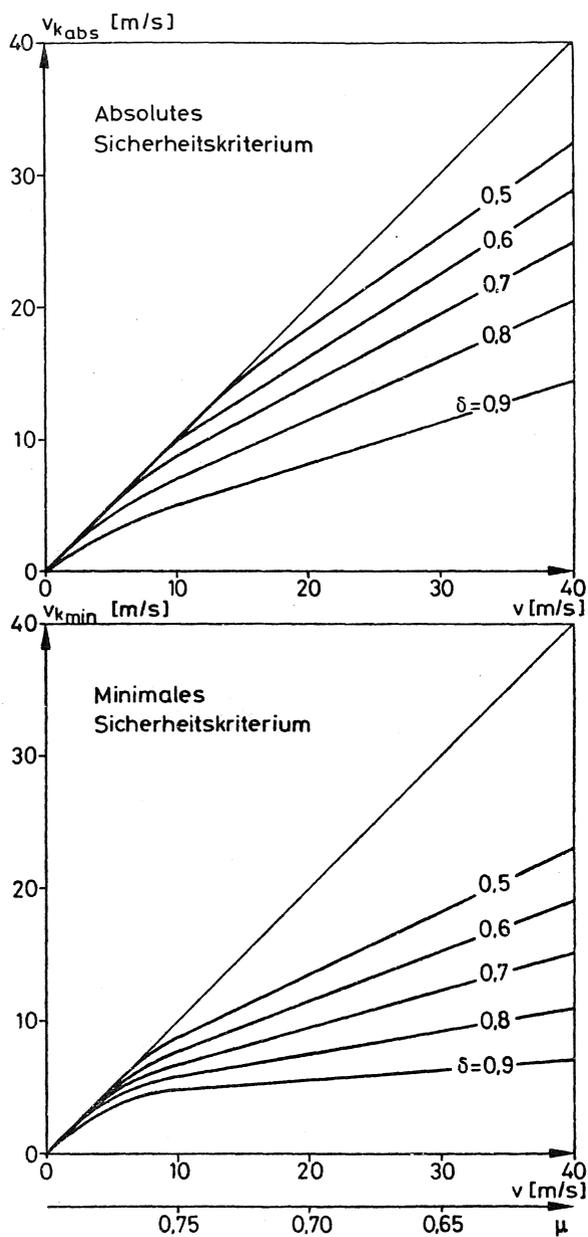


Abb.: 5.3: Kollisionsgeschwindigkeiten für verschiedene Sicherheitsfaktoren kleiner 1.0 ($t_R = 1$ s)

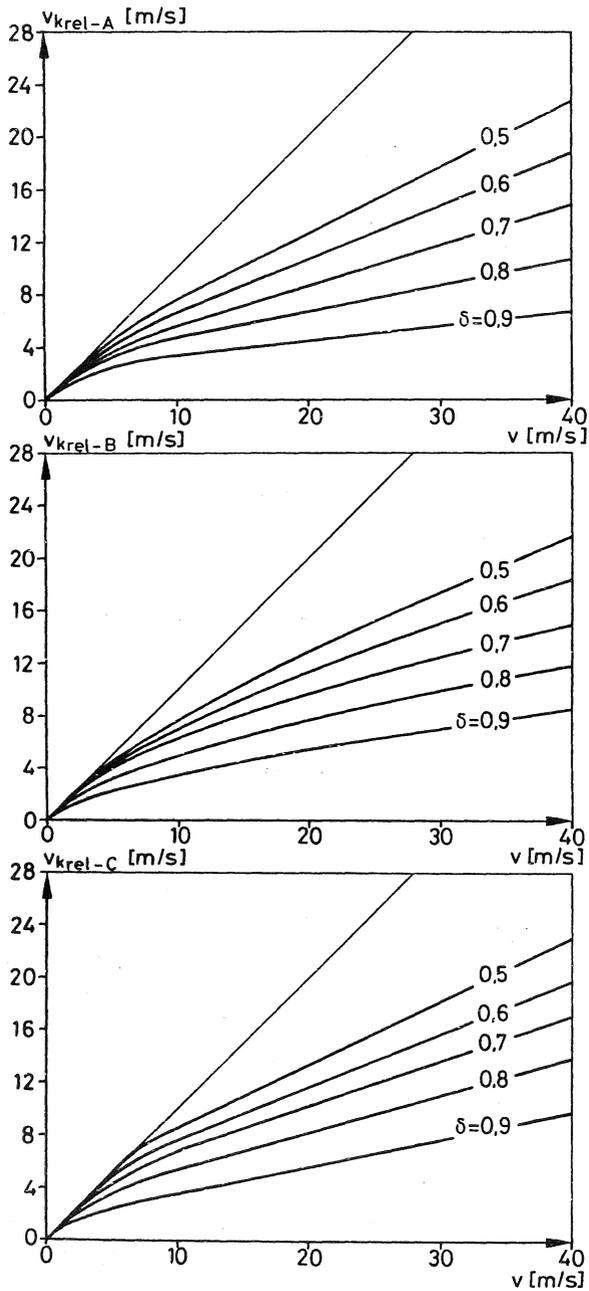


Abb. 5.4: Kollisionsgeschwindigkeiten der Strategieeinstellungen A, B und C bei verschiedenen Sicherheitsfaktoren < 1 .

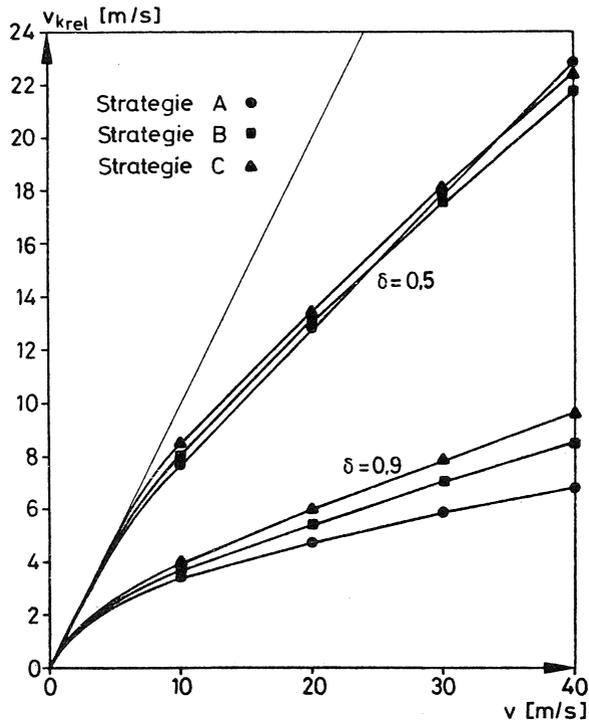


Abb. 5.5: Kollisionsgeschwindigkeiten der Strategieeinstellungen A, B und C für die Sicherheitsfaktoren $\delta = 0.5$ und $\delta = 0.9$

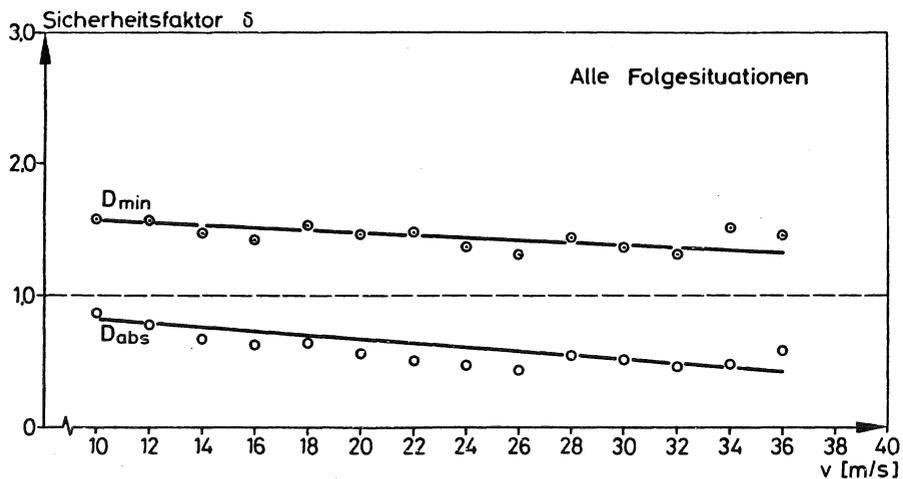
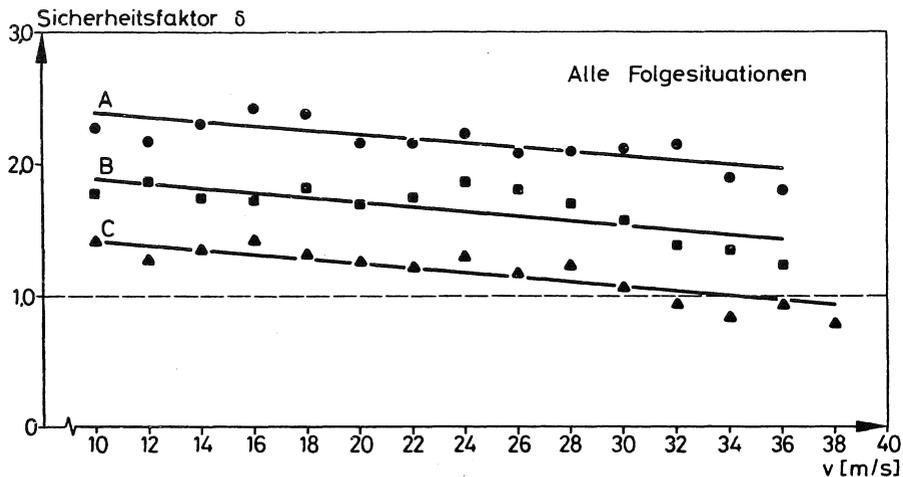


Abb. 5.6: Mittlere Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - Alle Folgesituationen

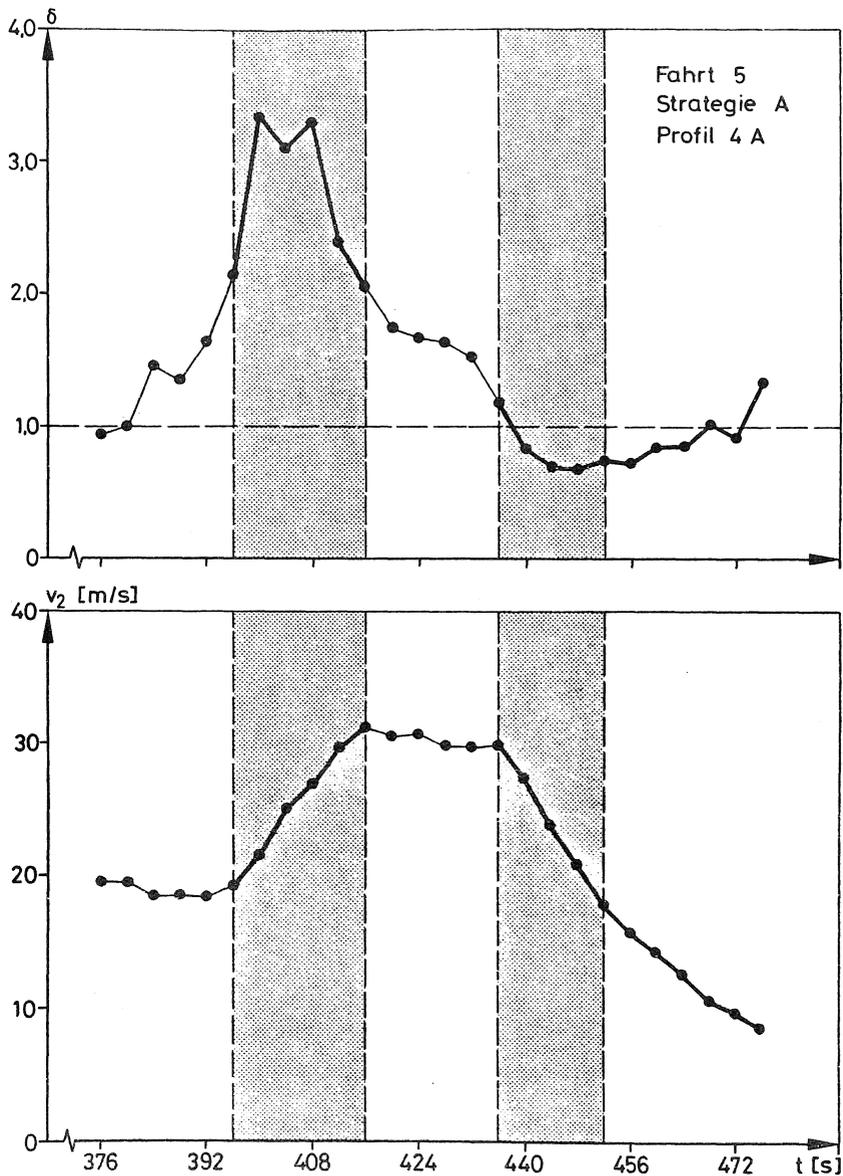


Abb. 5.7: Beispielhafter Verlauf des Sicherheitsfaktors δ und der Geschwindigkeit v_2 des Folgefahrzeugs

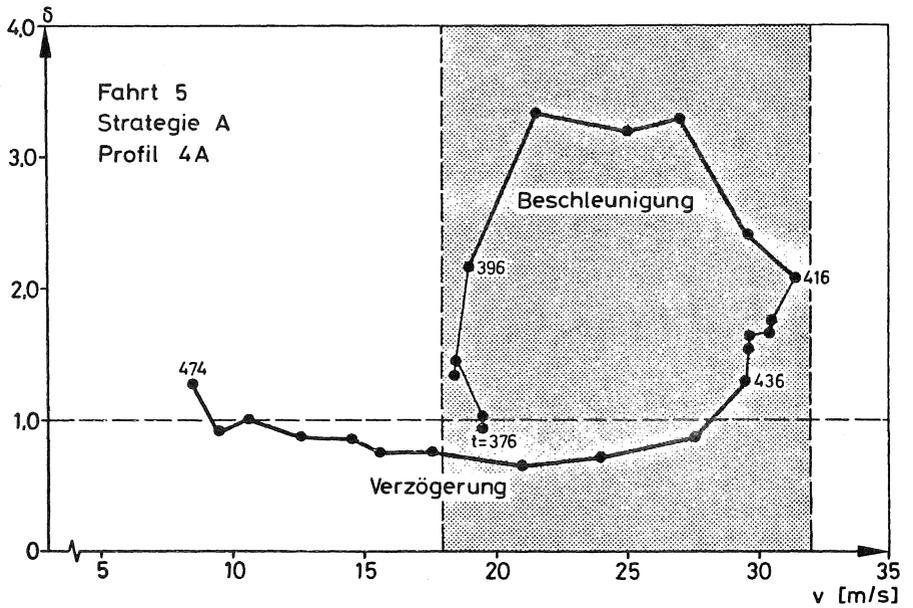


Abb. 5.8: Beispielhafter Verlauf des Sicherheitsfaktors δ während der Beschleunigungs- und Verzögerungsabschnitte von Profil 4A

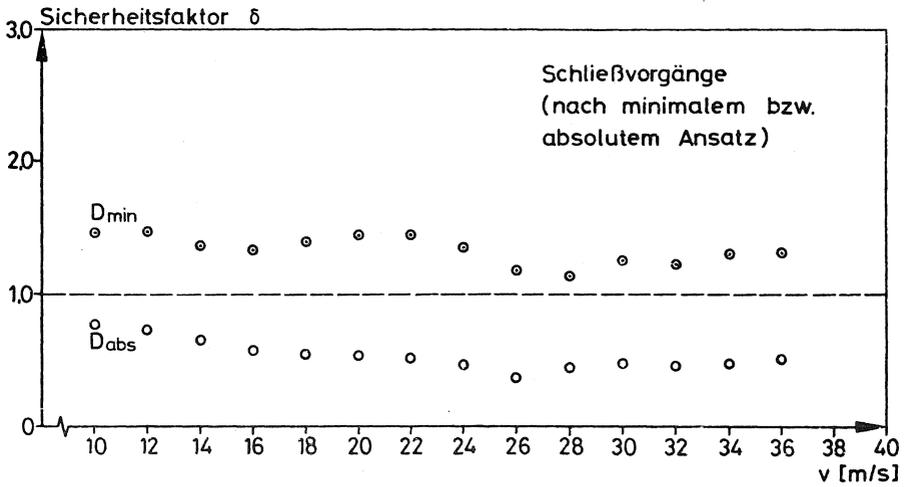
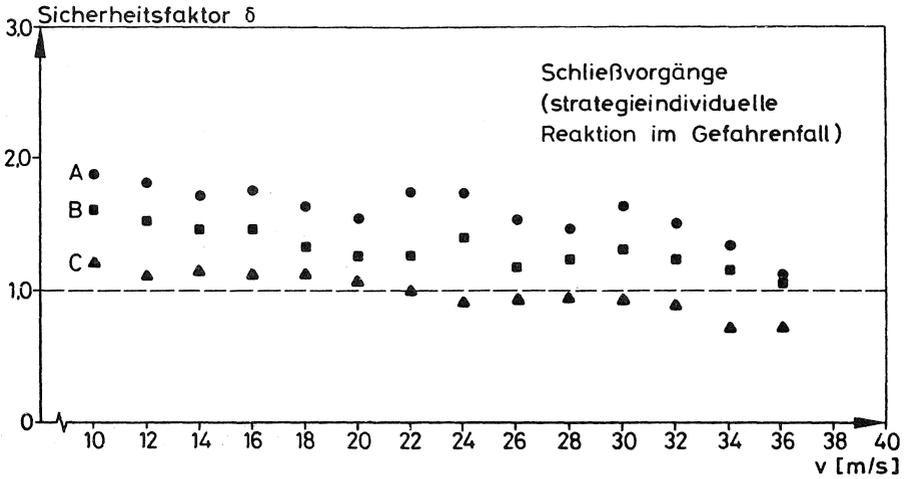


Abb. 5.9: Mittlere Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - Schließvorgänge

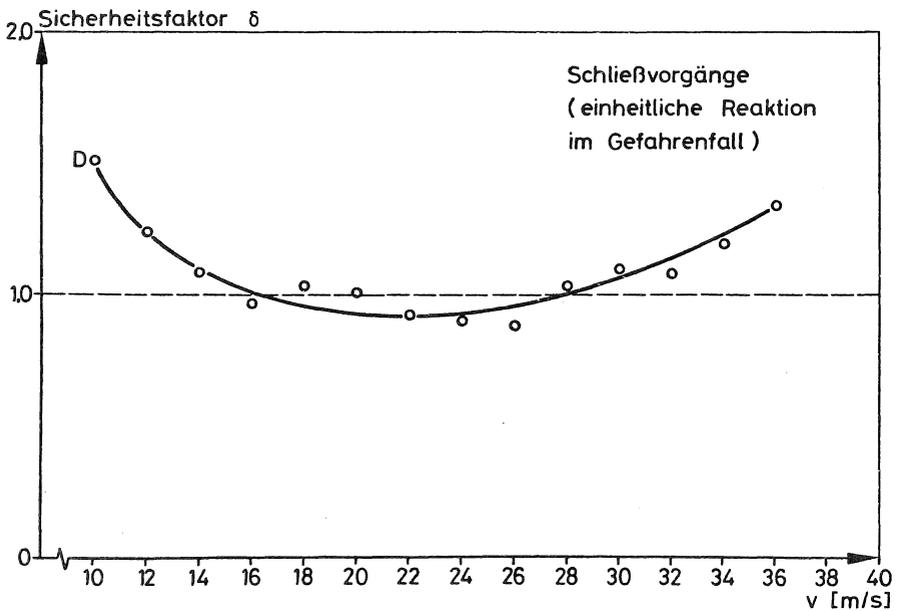
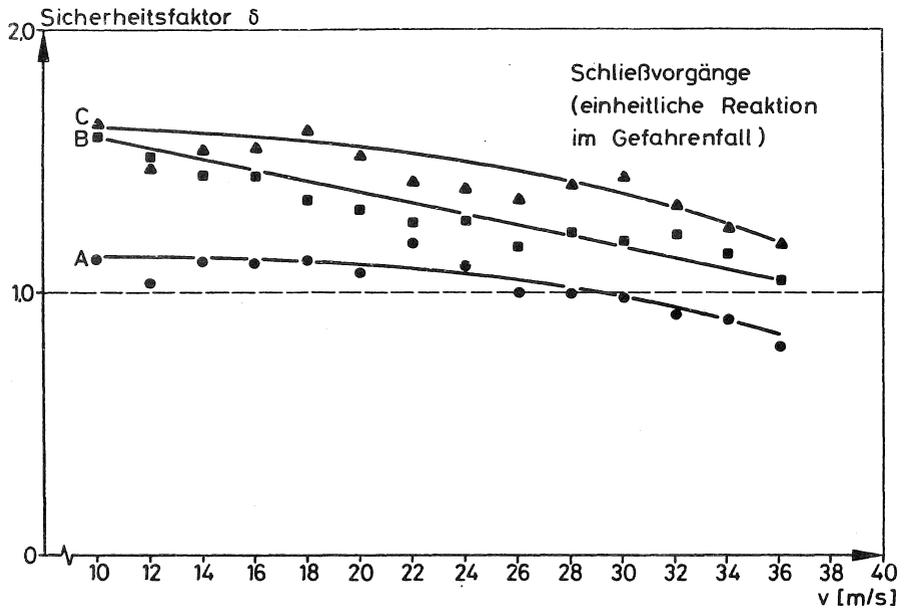


Abb. 5.10: Mittlere Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - Schließvorgänge - bei einheitlicher Reaktion im Gefahrenfall

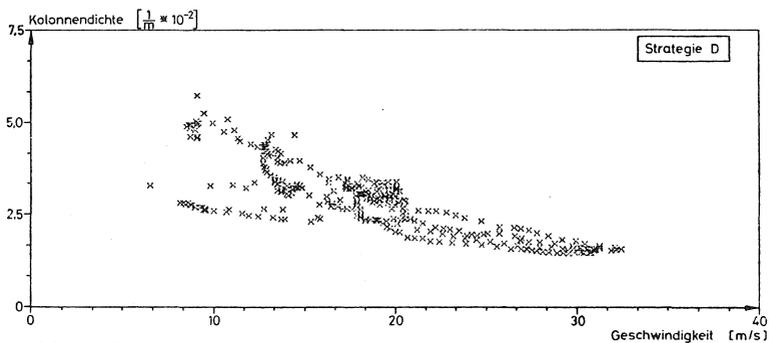
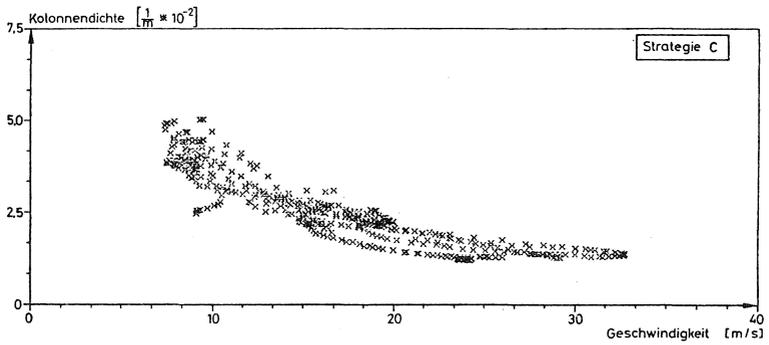
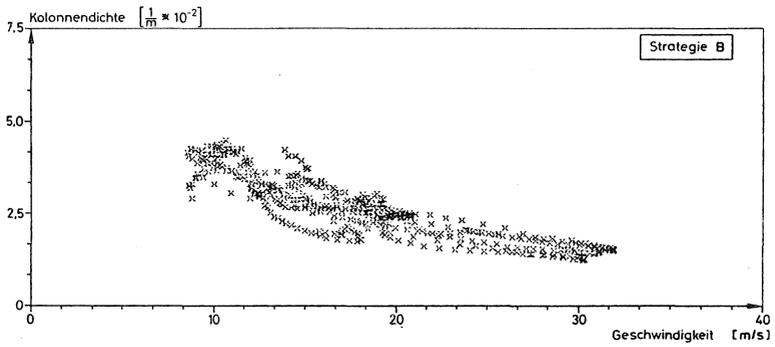
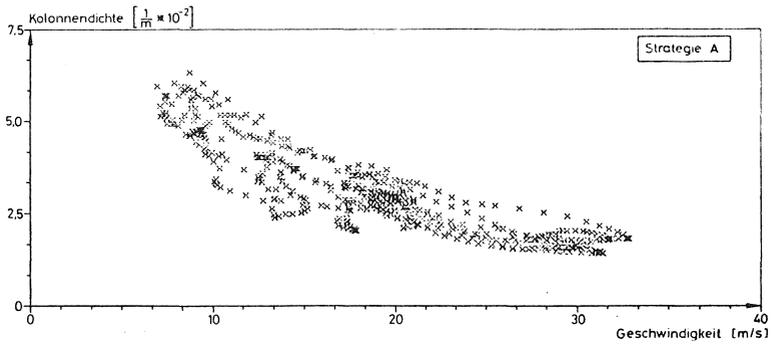


Abb. 6.1: Kolonnendichten der Strategien A, B, C und D in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Kolonne

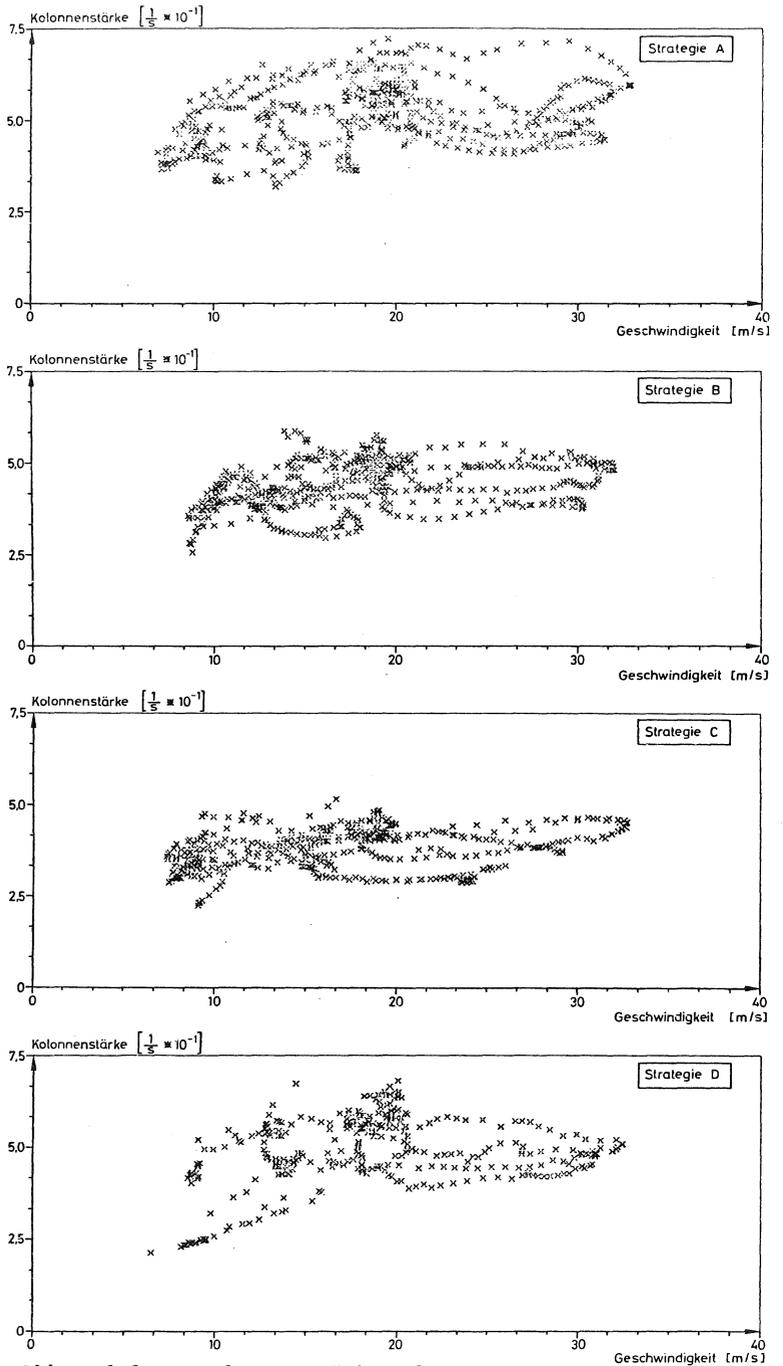


Abb. 6.2: Kolonnenstärken der Strategien A, B, C und D in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Kolonne

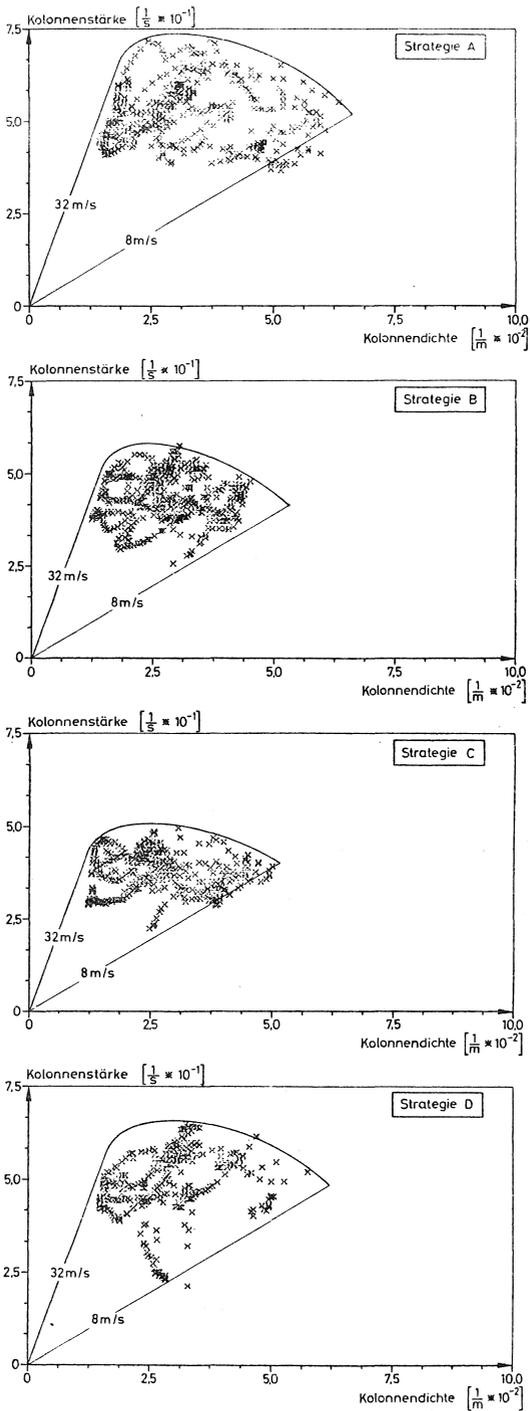
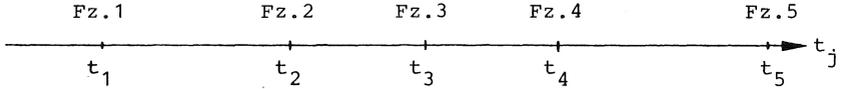


Abb. 6.3: Kolonnenstärke in Abhängigkeit von der Kolonnendichte

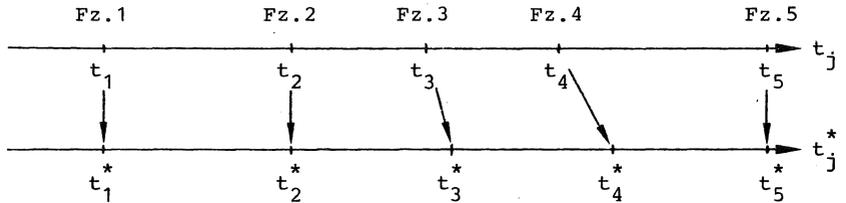
Meß- und Rechenergebnisse:



u.a.:

- Einfahrzeitpunkt t_j in die Meßstelle
- Geschwindigkeit von Fahrzeug n zum Zeitpunkt t_j
- Fahrzeuglänge L_n von Fahrzeug n
- Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen $\Delta t_{n,n-1} = t_{j_n} - t_{j_{n-1}}$
- Weglücken zwischen den Fahrzeugen $\Delta x_{n,n-1} = (t_{j_n} - t_{j_{n-1}}) v_{n-1}$

Zeitversetzungen für Fahrten mit AWS:



$$\Delta x_{n,n-1}^{\text{netto}} = (t_{j_n} - t_{j_{n-1}}^*) v_{n-1} - L_n$$

$$\Delta x_{n,n-1}^{\text{netto}} < \Delta x_{n,n-1}^{\text{soll}} \quad \text{nein} \rightarrow t_{j_n}^* = t_{j_n}$$

$$t_{j_n}^* = t_{j_{n,n-1}}^* + (\Delta x_{n,n-1}^{\text{soll}} / v_n) + (L_n / v_n)$$



geänderte Stärke-Dichte-Beziehungen

Abb. 6.4: Veranschaulichung der strategieabhängigen Versetzung der Einfahrzeitpunkte an einer Meßstelle

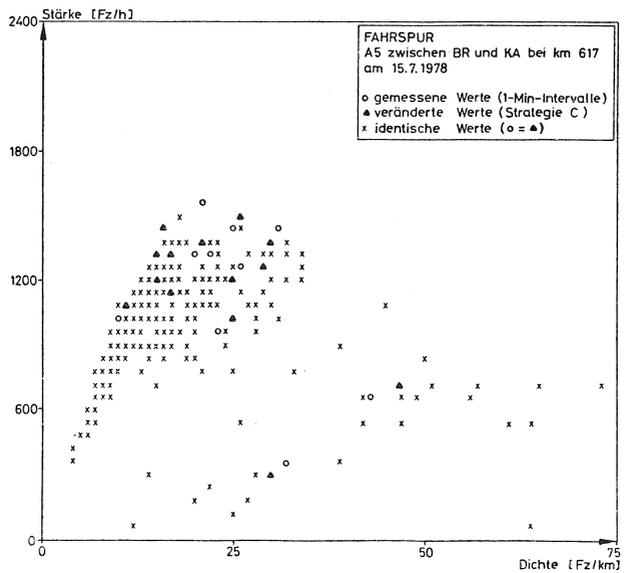
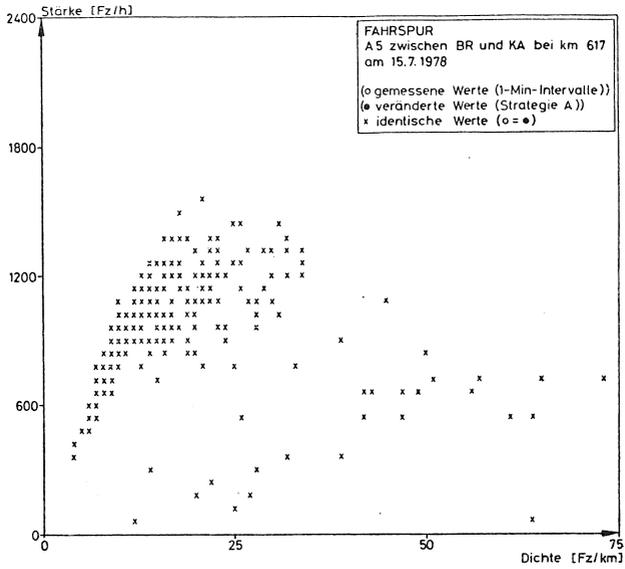


Abb. 6.5: Fundamentaldiagramme der Fahrspur

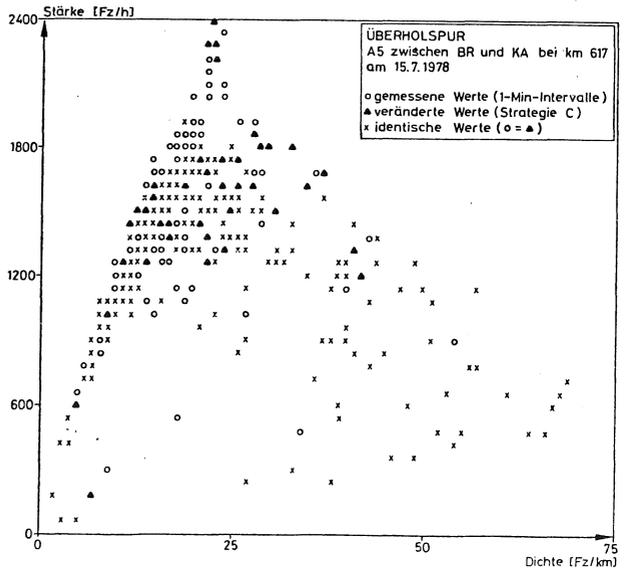
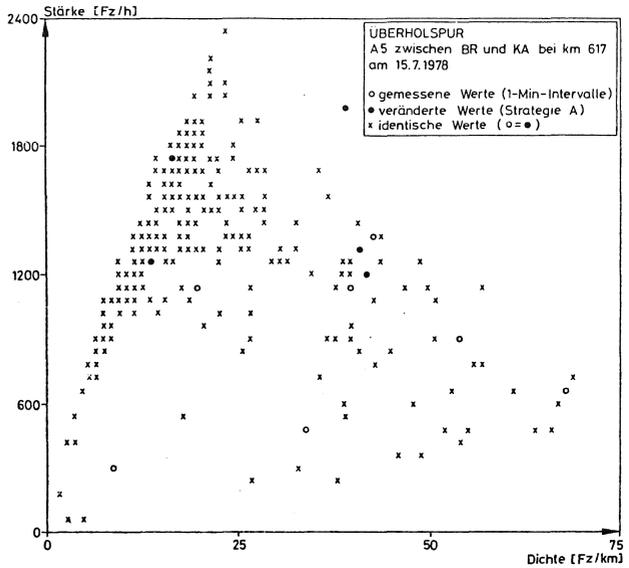


Abb. 6.6: Fundamentaldiagramme der überholspur

Verzeichnis der Anhänge

- Anhang 1: Herleitung von Stabilitätskriterien für $m=0$ und $l=0$
- Anhang 2: Ausgleich direkter Messungen gleicher Präzision
- Anhang 3: Herleitung für den Wert des Beschleunigungsrauschens ACN /28/
- Anhang 4: Überprüfung der Kongruenz der Führungsprofile
- Anhang 5: Unterprogramm FOBE
- Anhang 6: Berechnung von Kollisionsgeschwindigkeiten

Herleitung von Stabilitätskriterien für $m=0$ und $l=0$

/17/, /26/

$$b_{n+1}(t+\tau) = \lambda_{0,0} \cdot (v_n(t) - v_{n+1}(t))$$

entspricht

$$b_{n+1}(t) = \lambda_{0,0} (v_n(t - \tau) - v_{n+1}(t - \tau))$$

und kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{d^2 x_{n+1}(t)}{dt^2} = \lambda_{0,0} \cdot \left(\frac{dx_n(t-\tau)}{dt} - \frac{dx_{n+1}(t-\tau)}{dt} \right).$$

Mit $z = \frac{t}{\tau}$ ergibt sich

$$\frac{1}{\tau^2} \frac{d^2 x_{n+1}(z)}{dz^2} = \lambda_{0,0} \left(\frac{1}{\tau} \frac{dx_n(z-1)}{dz} - \frac{1}{\tau} \frac{dx_{n+1}(z-1)}{dz} \right)$$

bzw. nach Multiplizierung mit τ^2

$$\frac{d^2 x_{n+1}(z)}{dz^2} = \lambda_{0,0} \cdot \tau \cdot \left(\frac{dx_n(z-1)}{dz} - \frac{dx_{n+1}(z-1)}{dz} \right)$$

und mit $\lambda_{0,0} \cdot \tau = c$

$$b_{n+1}(z) = c(v_n(z-1) - v_{n+1}(z-1)).$$

Daraus erhält man mit den Anfangsbedingungen

$x_n = v_n = 0$ die Laplace Transformierte

$$sV_{n+1}(s) = c ((V_n(s) - V_{n+1}(s)) \cdot e^{-s}),$$

und es folgt mit

$$V_{n+1}(s) = \frac{c}{c + se^s} V_n(s)$$

die charakteristische Gleichung

$$c + se^s = 0.$$

Mit $s = \alpha + i\beta$ folgt daraus

$$c = (\alpha + i\beta) e^\alpha \cdot e^{i\beta} = 0$$

und mit $e^{i\beta} = \cos\beta + i \sin\beta$ ergibt sich

$$c + (\alpha + i\beta)e^\alpha (\cos\beta + i\sin\beta) = 0$$

bzw.

$$(c + e^\beta \cdot (\alpha \cos\beta - \beta \sin\beta)) + ie^\alpha (\alpha \sin\beta + \beta \cos\beta) = 0.$$

Durch Gleichsetzen der Summanden erhält man:

$$c + e^\alpha (\alpha \cos\beta - \beta \sin\beta) = 0$$

und

$$\alpha \sin\beta + \beta \cos\beta = 0.$$

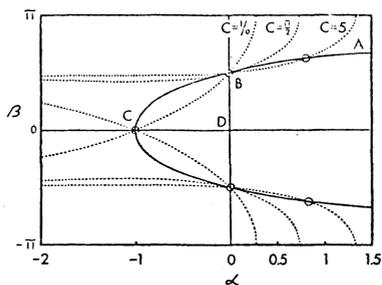
Die Umformung ergibt:

$$c \cos \beta + e^{\alpha} (\alpha \cos^2 \beta + \alpha \sin^2 \beta) = 0$$

und mit $\cos^2 \beta + \sin^2 \beta = 1$

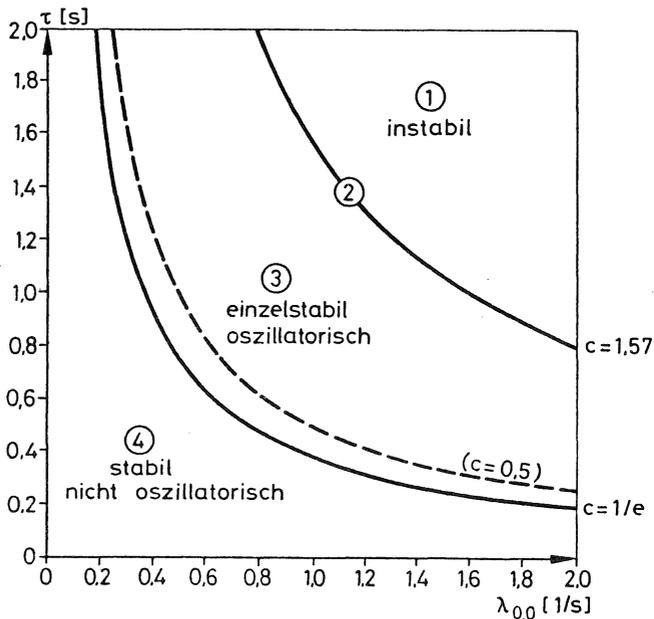
$$c \cos \beta + \alpha \cdot e^{\alpha} = 0$$

Ergebnisse:



Lösungen der charakteristischen Gleichung:

1. für $c = \lambda_{0,0} \cdot \tau > \pi/2$ in der rechten Hälfte des Koordinatensystems (Bereich AB) Instabilität
2. für $c = \pi/2$ im Punkt B \rightarrow Grenzfall zwischen Instabilität und Einzelstabilität
3. für $1/e < c < \pi/2$ im Bereich BC \rightarrow oszillatorisch und einzelstabil
4. für $c \leq 1/e$ im Bereich CD \rightarrow nicht oszillatorisch und stabil



Ausgleich direkter Messungen gleicher Präzision *)

Eine Größe y wird direkt n -mal mit gleicher Präzision gemessen. Die Meßwerte seien a_1, a_2, \dots, a_n . Die einzige Unbekannte ist die wahre Meßgröße y . Bei gleicher Präzision der Einzelmessungen haben die Meßwerte jeweils das gleiche Gewicht $p_1, p_2, \dots, p_n = 1$. Die Summe der Fehlerquadrate und ihre Ableitung nach y lauten:

$$S = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i - y)^2$$

$$\frac{ds}{dy} = - \frac{2}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (a_i - y)$$

Setzt man die Ableitung gleich Null, so erhält man die Normalgleichung

$$\sum_{i=1}^n (a_i - y) = 0$$

deren Auflösung nach y den Schätzwert \hat{y} liefert. Der Mittelwert aus den Einzelmessungen dient dabei als Schätzwert für die zu messende Größe

$$\hat{y} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \bar{a}$$

Der Näherungswert für die zu messende Größe y wird in der Form

$$y \approx \hat{y} \left(\pm m_{\hat{y}} \right) \quad \text{oder} \quad y = \hat{y} \pm m_{\hat{y}}$$

Dabei wird der mittlere Fehler

$$m_{\hat{y}} = \frac{m}{\sqrt{n}}$$

aus dem mittlerem Fehler m der Einzelmessung berechnet.

*) zu dem hier dargestellten Verfahren siehe /32/

mittlerer Fehler der Einzelmessung, m :

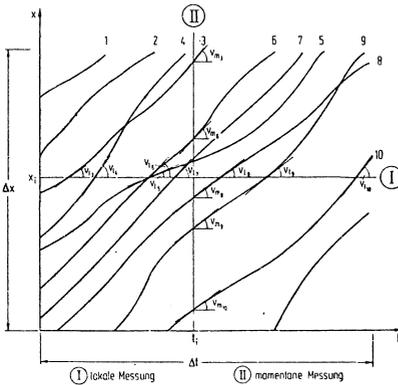
$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}}$$

und mittlerer Fehler des Schätzwertes m_Y^{\wedge}

$$m_Y^{\wedge} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n(n-1)}}$$

Herleitung für den Wert des Beschleunigungsrauschens
ACN /28/

Ausgehend von den Bewegungslinien einzelner Fahrzeuge im Weg-Zeit-Diagramm wird das ACN für ein Fahrzeug wie folgt hergeleitet:



Bewegungslinien einzelner Fahrzeuge in einem Fahrzeugkollektiv /33/

Geschwindigkeit $v(t) = \frac{dx}{dt}$

Beschleunigung

$$b(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv(t)}{dt}$$

Ist T die gesamte Fahrzeit eines Fahrzeugs, so ist die mittlere Beschleunigung

$$\bar{b} = \frac{1}{T} \int_0^T b(t) dt = \frac{1}{T} (v(T) - v(0)).$$

Die Standardabweichung der Beschleunigungen ist dann:

$$ACN = \left(\frac{1}{T} \int_0^T (b(t) - \bar{b})^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Daraus folgt

$$ACN^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (b(t))^2 dt - \frac{1}{T} \int_0^T 2b(t)\bar{b} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \bar{b}^2 dt$$

und mit

$$\frac{1}{T} \int_0^T dt = 1$$

ergibt sich

$$ACN^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (b(t))^2 dt - 2\bar{b}(t) \frac{1}{T} \int_0^T b(t) dt + \bar{b}(t)^2.$$

$$\text{Da } \frac{1}{T} \int_0^T b(t) dt = \bar{b}(t) \text{ folgt}$$

$$ACN^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (b(t))^2 dt - 2\bar{b}(t)^2 + \bar{b}(t)^2$$

$$\rightarrow ACN = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T (b(t))^2 dt - \bar{b}(t)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Unter der Annahme konstanter Zeitschritte Δt , in denen die Meßwerte Δv ermittelt werden können, ergibt sich die vorstehende Formel zu

$$ACN = \left\{ \frac{1}{T} \sum_{i=0}^m \left(\frac{\Delta v_i}{\Delta t} \right)^2 \Delta t - \left(\frac{v_T - v_0}{T} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

v_0 und v_T seien die Anfangs- bzw. Endgeschwindigkeiten der gesamten Fahrzeit T (für geringe Unterschiede zwischen v_0 und v_T und/oder lange Fahrtzeiten T wird das Absolutglied vernachlässigbar klein).

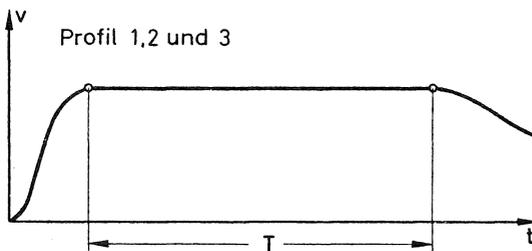
Durch Umformung erhält man den Ausdruck:

$$ACN = \left\{ \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=0}^m \left(\frac{\Delta v_i}{\Delta t} \right)^2 - \left(\frac{v_E - v_A}{T} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

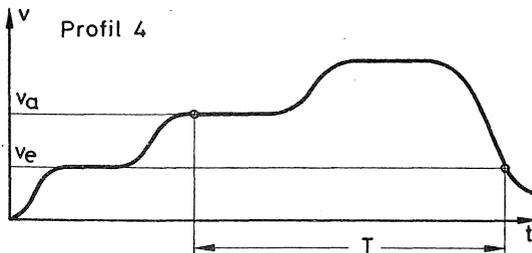
Überprüfung der Kongruenz der Führungsprofile

Vorgehensweise:

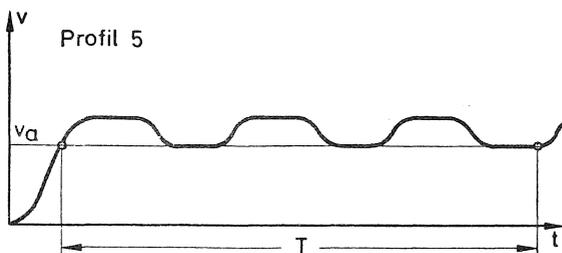
- Die jeweils zuerst gefahrenen Profile (der fünf unterschiedlichen) wurden als Bezugsprofile ausgewählt;
- die Dauer T des jeweiligen Bezugsprofils wurde wie folgt festgesetzt:



T entspricht der Zeit, während der mit konstanter Geschwindigkeit gefahren wird.
 ($T = 270\text{s-Pr.1,2}$)
 ($T = 190\text{s-Pr.3}$)



T entspricht der Zeit zwischen dem erstmaligen Erreichen von v_a und dem erstmaligen Erreichen von v_e
 ($T = 116\text{s}$)



T entspricht der Zeit des dreimaligen Durchfahrens des 'Sägezahnprofils' beginnend mit v_a
 ($T = 141\text{s}$)

- Aus Rechenzeitgründen wurde zuerst manuell/visuell eine möglichst gute Übereinstimmung der Profile gesucht, bevor mit dem Rechner noch zusätzlich um das manuelle Optimum in kleinen, visuell nicht mehr unterscheidbaren Schritten variiert wurde.

Manuell/visuell:

Die geplotteten Geschwindigkeitsganglinien der zu vergleichenden Profile wurden auf einem Lichttisch so übereinander gelegt und gegeneinander verschoben, bis optisch der Eindruck einer möglichst großen Übereinstimmung entstanden war.

Rechner:

Die Geschwindigkeitsganglinie des zu vergleichenden Profils wurde über der des Bezugsprofils so lange verschoben (in 1-s-Intervallen i), bis die Abweichung, die Summe der kleinsten Quadrate, zwischen Bezugs- und Vergleichsprofil ein Minimum erreichte.

$$\text{Abs. Fehler } F_A = \text{MIN} \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{t=0}^n (v_B(t) - v_V(t+i))^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$i = t - 10/t + 10/1$$

$$\text{Rel. Fehler } F_R = \left(\frac{F_A}{v_V} \right) \cdot 100 \text{ \%}$$

Ergebnisse der verglichenen Profile:

Profil Nr.	Fahrt-Nr. des Bezugsprofils	Fahrt-Nr. des Vergleichsprof.	F_A /m/s/	F_B /%/
1	4	16	0.78	6.99
2	5	7	0.60	3.16
3	6	12 14	0.57 0.61	2.34 2.54
4A	5	8 9 10 13a 13b 14 15a 15b 16 17 18	0.53 0.72 0.45 0.70 0.56 0.43 0.47 0.54 0.64 0.37 0.68	2.52 3.44 2.15 3.31 2.64 2.05 2.21 2.58 3.05 1.76 3.24
5A	4	6 7 10 12 17 18	0.85 0.89 0.92 0.71 0.69 1.00	5.12 5.34 5.54 4.28 4.12 6.02

```

097          *FOBE
098          C *****
099          C SUBROUTINE ZUR BERECHNUNG VON Vmax DER FOLGEFAHRZEUGE
100          C NACH DER FAHRZEUGFOLGEBESTIMMUNG
101          C *****
102          SUBROUTINE F0BE(Vmax,FUE,DX,V,I,J,LAM,TAU,AF,AFM,LFUE)
103          INTEGER AF,AFM,I,J,L,FUE,FZ,AF,I,TAU(LAM),DX2
104          REAL V(L,FZ),AF(I),B(I,FZ),X(I,FZ),AFM(I),V(I,FZ),V(I,AF),
105          SL(AM),V(L,FZ),LAM(AM),ZL(AM),X(5),VFE(11*Z),DELTX(16)
106          REAL AZEIT,OX,VZIN
107          LOGICAL UF(5),SST(5)
108
109          C
110          1) FORMAT(
111          V*IN=,C
112          AF=AF*1
113          X*(AF)=,I
114          LFUE=LFUE*1
115          ZL=,I
116          ASSUME,
117          DO 10 I=1,AF
118          ASUM=ASUM+DX(I)
119          X*(AF-I)=ASUM
120          1) CONTINUE
121          DO 15 I=1,AF
122          UF(I)=.FALSE.
123          SST(I)=.FALSE.
124          15) CONTINUE
125          X(1,1)=X(1)
126          V(1,1)=VFE(1)
127          DO 20 I=2,LFUE
128          V(I,1)=VFE(I-1)
129          DO 30 I=2,LFUE
130          Z(I,1)=(V(I,1)-V(I-1,1))/ZI
131          X(I,1)=X(I-1,1)+V(I-1,1)*ZI+B(I-1,1)*ZI*ZI*.5
132          3) CONTINUE
133          C
134          DO 100 FZ=2,AF
135          ITAU=TAU(FZ-1)
136          X(I,FZ)=X(I,FZ)
137          V(I,FZ)=V(FZ-1)
138          B(I,FZ)=B
139          DO 40 T=2,LFUE
140          IF(UF(FZ).OR.SST(FZ)) GOTO 90
141          AZEIT=C
142          DO 60 I=2,FZ
143          AZEIT=AZEIT+TAU(FZ-1)
144          IF(T.LE.AZEIT) GOTO 50
145          V(I,FZ)=V(T-1,FZ)+B(T-1,FZ)*ZI
146          X(I,FZ)=X(T-1,FZ)+V(T-1,FZ)*ZI+B(T-1,FZ)*ZI*ZI*.5
147          DX=X(I,FZ-1)-X(T,FZ)
148          IF(DX.LE.0) GOTO 70
149          IF(V(T,FZ).LT.VZIN) GOTO 80
150          B(T,FZ)=LAM(FZ-1)*(V(T,FZ)-V(FZ-1))/(X(T-ITAU,FZ-1)-X(T-ITAU,
151          FZ))+*(FZ-1))**(V(T-ITAU,FZ-1)-V(T-ITAU,FZ))
152          IF(B(T,FZ).GT.3.0) B(T,FZ)=3.0
153          IF(B(T,FZ).LT.-9.0) B(T,FZ)=-9.0
154          GOTO 40
155          50 V(T,FZ)=V(FZ-1)
156          X(T,FZ)=X(T-1,FZ)+V(T-1,FZ)*ZI
157          DX=X(T,FZ-1)-X(T,FZ)
158          IF(DX.LE.0) GOTO 70
159          IF(V(T,FZ).LT.VZIN) GOTO 80
160          B(T,FZ)=B
161          GOTO 40
162          70 UF(FZ)=.TRUE.
163          AZEIT=(4+1.6) T,FZ
164          GOTO 90
165          80 SST(FZ)=.TRUE.
166          UPITE(6,1,7) T,FZ
167          90 V(T,FZ)=C
168          X(T,FZ)=X(T-2,FZ)
169          Z(T,FZ)=C
170          1)6) FORMAT(/' UNFALL T=',I6,' FAHRZEUG:',I2)
171          1)7) FORMAT(/' STILLSTAND T=',I9,' FAHRZEUG:',I2)
172          C
173          8) CONTINUE
174          1) CONTINUE
175          2) FORMAT(' BERECHNETE WEGE:')
176          1)1) FORMAT(/' GESCHWINDIGKEIT FAHRZEUG:',I2)
177          1)2) FORMAT(/' BESCHLEUNIGUNG FAHRZEUG:',I2)
178          1)3) FORMAT(/' WEG FAHRZEUG:',I2)
179          1)4) FORMAT(5C(IX,FZ,2))
180          1)5) FORMAT(16(IX,FZ,1))
181          1)6) FORMAT(/' ABSTAND FAHRZEUG',I2)
182          GOTO 300
183          AZEIT(6,2)=C
184          DO 200 J=1,AF
185          WRITE(6,1) J
186          WRITE(6,1)4) (V(J,I),J=1,LFUE)
187          WRITE(6,1)2) J
188          WRITE(6,1)4) (B(J,I),J=1,LFUE)
189          WRITE(6,1)3) J
190          WRITE(6,2)4) (X(J,I),J=1,LFUE)
191          IF(1,1,1) GOTO 200
192          UPITE(6,1,8) J
193          DX2=1
194          DO 210 J=1,LFUE
195          DELTX(IX2)=X(J,I-1)-X(J,I)
196          IF(DX2.LT.16) GOTO 220
197          DX2=C
198          WRITE(6,1)5) (DELTX(K),K=1,16)
199          22) DX2=DX2+1
200          2) CONTINUE
201          2) CONTINUE
202          3) RETURN
203          END

```

Berechnung von Kollisionsgeschwindigkeiten1. Kriterium der absoluten Sicherheit:

$$\Delta x_{\text{soll}} = v_{n+1} t_R + \frac{v_{n+1}^2}{2g\mu} \quad (1)$$

$$\Delta x_{\text{ist}} = \delta(\Delta x_{\text{soll}}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{ist}} &= v_{n+1} t_R + \frac{v_{n+1} + v_k}{2} t_k \\ &= v_{n+1} t_R + \frac{v_{n+1} + v_k}{2} \left(\frac{v_{n+1} - v_k}{2g\mu} \right) \\ &= v_{n+1} t_R + \frac{v_{n+1}^2 - v_k^2}{2g\mu} \quad (3) \end{aligned}$$

(1) und (3) in (2):

$$\begin{aligned} \left(v_{n+1} t_R + \frac{v_{n+1}^2}{2g\mu} \right) \delta &= v_{n+1} t_R + \frac{v_{n+1}^2 - v_k^2}{2g\mu} \\ &\vdots \\ &\vdots \\ v_k &= \underline{\underline{\sqrt{(v_{n+1}^2 + 2g\mu v_{n+1} t_R)(1-\delta)}}}} \end{aligned}$$

2. Kriterium der minimalen bzw. relativen Sicherheit

Fall 1: Kollisionspunkt im Parabelbereich ($t_{\text{koll}} < t$)

$$x_n = v_n t - \frac{1}{2} b_n t^2$$

$$x_{n+1} = v_{n+1} (t-t_R) - \frac{1}{2} b_{n+1} (t-t_R)^2 + x_0$$

$$\text{mit } x_0 = v_{n+1} t_R - \Delta x_{\text{soll}} \delta$$

Im Kollisionsfall ist $x_n = x_{n+1}$ und $t = t_{\text{koll}-1}$; d.h.:

$$v_n t - \frac{1}{2} b_n t^2 = v_{n+1} (t-t_R) - \frac{1}{2} b_{n+1} (t-t_R)^2 + x_0$$

und daraus folgt für $b_n = b_{n+1}$ (minimale Sicherheit):

$$t = \frac{0,5 b_{n+1} t_R^2 + v_{n+1} t_R - x_0}{b_{n+1} t_R}$$

bzw. für $b_n \neq b_{n+1}$ (relative Sicherheit):

$$t = - \frac{b_{n+1} t_R}{b_n - b_{n+1}} \pm \sqrt{\left(\frac{b_{n+1} t_R}{b_n - b_{n+1}}\right)^2 + \frac{2v_{n+1} t_R + b_{n+1} t_R^2 - 2x_0}{b_n - b_{n+1}}}$$

Die Kollisionsgeschwindigkeit entspricht der Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs zum Zeitpunkt $t = t_{\text{koll}-1}$; d.h.:

$$v_k = v_{n+1} (t = t_{\text{koll}-1})$$

$$= v_{n+1} - b_{n+1} (t_{\text{koll}-1} - t_R)$$

.

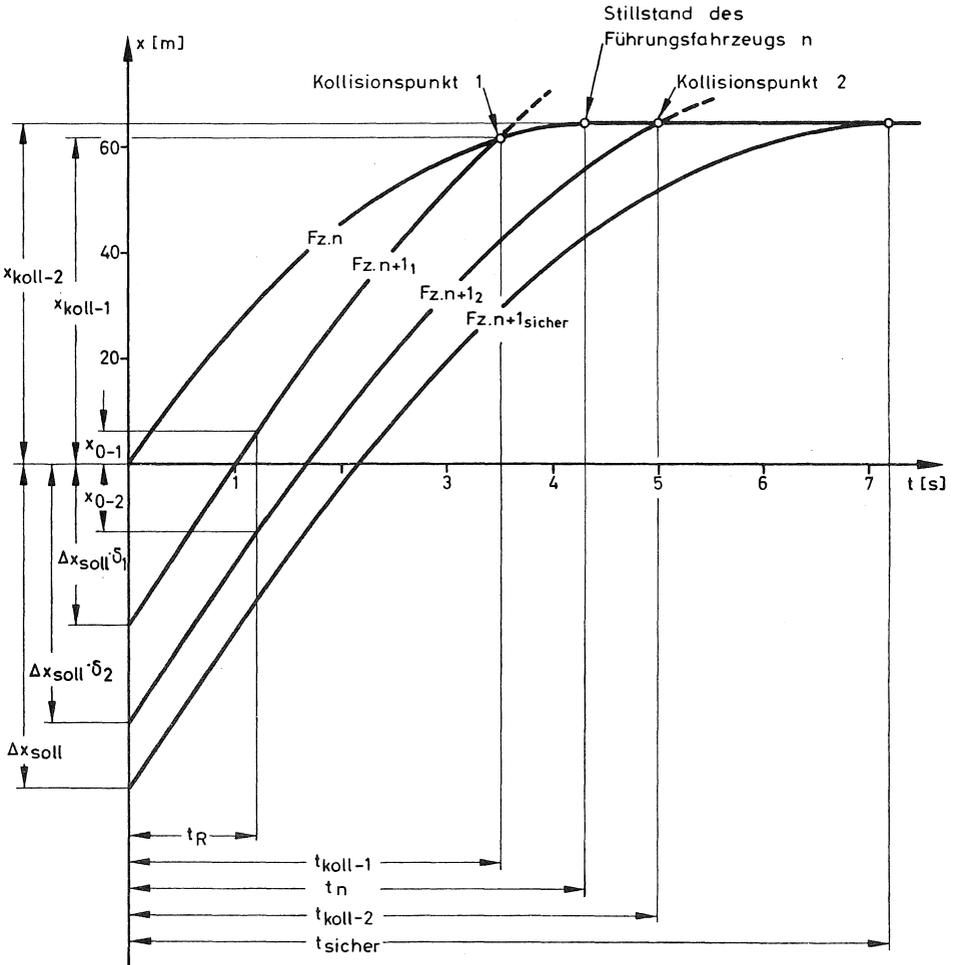
.

$$= v_{n+1} - b_{n+1} \left(\frac{0,5 b_{n+1} t_R^2 + v_{n+1} t_R - x_0}{b_{n+1} t_R} - t_R \right) = \underline{\underline{v_{k_{\text{min}}}}}$$

bzw.:

$$= v_{n+1} + b_{n+1} \left(\frac{b_{n+1} t_R}{b_n - b_{n+1}} \pm \sqrt{\left(\frac{b_{n+1} t_R}{b_n - b_{n+1}}\right)^2 + \frac{2v_{n+1} t_R + b_{n+1} t_R^2 - 2x_0}{b_n - b_{n+1}}} + t_R \right)$$

$$= \underline{\underline{v_{k_{\text{rel}-1}}}}$$



Wege und Zeiten zur Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeiten

Fall 2: Kollisionspunkt im Geradenbereich ($t_{\text{koll-2}} > t$)

$$x_n = \frac{v_n^2}{2b_n}$$

$$x_{n+1} = v_{n+1}(t-t_R) - \frac{1}{2} b_{n+1}(t-t_R)^2 + x_0$$

Im Kollisionsfall ist $x_n = x_{n+1}$ und $t = t_{\text{koll-2}}$; d.h.:

$$\frac{v_n^2}{2b_n} = v_{n+1}(t-t_R) - \frac{1}{2} b_{n+1}(t-t_R)^2 + x_0$$

und daraus folgt für $b_n \neq b_{n+1}$ (relative Sicherheit)

$$t = \frac{v_{n+1} + b_{n+1} t_R}{b_{n+1}} \pm \sqrt{\left(\frac{v_{n+1} + b_{n+1} t_R}{b_{n+1}}\right)^2 - \frac{2v_{n+1} t_R}{b_{n+1}} - t_R^2 + \frac{2x_0}{b_{n+1}} - \frac{v_{n+1}^2}{b_n b_{n+1}}}$$

Mit

$$\begin{aligned} v_k &= v_{n+1}(t = t_{\text{koll-2}}) \\ &= v_{n+1} - b_{n+1}(t_{\text{koll-2}} - t_R) \end{aligned}$$

ergibt sich

$$\begin{aligned} v_k &= b_{n+1} \sqrt{\left(\frac{v_{n+1} + b_{n+1} t_R}{b_{n+1}}\right)^2 - \frac{2v_{n+1} t_R}{b_{n+1}} - t_R^2 + \frac{2x_0}{b_{n+1}} - \frac{v_{n+1}^2}{b_n b_{n+1}}} \\ &= \underline{\underline{v_{k_{\text{rel-2}}}}} \end{aligned}$$

Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

Schriftenreihe des Instituts

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

- Heft 15: Laubert, Wolf: Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen; 1977.
- Heft 16: Sahling, B.-M.: Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren -; 1977. +)
- Heft 17: Zahn, E. M.: Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze; 1978.
- Heft 18: Handschmann, W.: Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers; 1978.
- Heft 19: Willmann, G.: Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen; 1978. +)
- Heft 20: Sparmann, U.: ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose; 1980. +)
- Heft 21: Allsop, R. E.: Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen; 1980. +)
- Heft 22: Adolph, U.-M.: Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen; 1981.
- Heft 23: Jahnke, C.-D.: Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen; 1982.

Vorläufige Berichte des Instituts

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

- Nr. 16: Coblentz, H.S.: Transportation Planning and Social Issues: Function and Dysfunction; 1971. +)
- Nr. 17: Köhler, U.: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsganglinie bzw. Geschwindigkeitsprofil und Häufigkeitsdichte der Geschwindigkeiten; 1971. +)
- Nr. 18: Brilon, W.: Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern; 1973. +)
- Nr. 19: Vásárhelyi, B.: Stochastische Simulation an Straßenkreuzungen nach dem "rechts-vor-links-Prinzip"; 1975.
- Nr. 20: Bahm, G., Laubert, W.: Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personennahverkehrssystemen; 1977.
- Nr. 21: Wiedemann, R, Brilon, W., Brannolte, U.: Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; 1977.
- Nr. 22: Brannolte, U., Vásárhelyi, B.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf kurvigen Landstraßen; 1977. +)
- Nr. 23: Sparmann, U.: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Vorbeifahrtenhäufigkeit auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen; 1979.
- Nr. 24: Stucke, G.: Ermittlung der Teilströme aus Querschnittsmessungen; 1979.
- Nr. 25: Leutzbach, W.: Zur Problematik der Messungen und Beobachtungen aus einem fahrenden Fahrzeug; 1981.

Institutsnotizen

- Nr. 1: Bisbee, E.F.: Beispiele zur Transportanalyse; 1967 +)
(Übersetzt von W. Siegener)
- Nr. 2: Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- und Verteilungsmodelle; Seminarbericht SS 1968 +)
- Nr. 3: Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpässen; Seminarbericht WS 1968/69
- Nr. 4: Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und der Kapazität des Parkraums; Seminarbericht SS 1969 +)
- Nr. 5: Brilon, W.: Erzeugung von Zufallszahlen; 1970
- Nr. 6: Dilling, J.: Charakteristik des Verkehrsablaufs auf einem Autobahnabschnitt; 1970
- Nr. 7: Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Ausbauvarianten einer Straßenkreuzung; Seminarbericht WS 1969/70
- Nr. 8: Untersuchung der Verkehrssicherheit einer Straßenkreuzung; Seminarbericht SS 1970
- Nr. 9: Einsatz eines Kabinen-Taxi-Systems (CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe; Seminarbericht SS 1971
- Nr. 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau - ein Optimierungsbeispiel; Seminarbericht WS 1971/72
- Nr. 11: Möglichkeiten der Steuerung von Lichtsignalanlagen in städtischen Netzen; Seminarbericht SS 1972
- Nr. 12: Exkursionsbericht SS 1973
- Nr. 13: Unfalluntersuchung und Stauberechnung auf einem Abschnitt der Bundesautobahn; Seminarbericht SS 1973 +)
- Nr. 14: Wochenendverkehr im nördlichen Schwarzwald; Seminarbericht WS 1973/74 +)
- Nr. 15: Geschwindigkeitsbeschränkungen; Seminarbericht SS 1974
- Nr. 16: Autohöfe - ihre Bedeutung für den Güterverkehr; Seminarbericht WS 74/75
- Nr. 17: Die Karlsruher Häfen; Seminarbericht SS 1975
- Nr. 18: Lärmschutz an Straßen; Seminarbericht WS 75/76 +)

- Nr. 19: Der Einfluß des Fluglärms auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen; Seminarbericht SS 1976
- Nr. 20: Kombiniertes Verkehr; Seminarbericht WS 76/77
- Nr. 21: Koordinierung eines Straßenzuges mit Lichtsignalanlagen; Seminarbericht SS 1977
- Nr. 22: Die Sicherheit von Verkehrssystemen; Seminarbericht WS 77/78
- Nr. 23: Verkehrsablauf als Warteschlangenproblem; Seminarbericht SS 1978
- Nr. 24: Bordsteinparken; Seminarbericht WS 78/79 +)
- Nr. 25: Verkehrssteuerungssysteme; Seminarbericht SS 1979
- Nr. 26: Das Planspielmodell PLUS; Seminarbericht WS 79/80 noch nicht erschienen
- Nr. 27: Stauwarnanlagen auf Bundesautobahnen; Seminarbericht SS 1980

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

- Leutzbach, W., Bexelius, S.: Probleme der Kolonnenfahrt; Heft 44 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1966.
- Lenz, K.-H.: Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie der Warteschlangen; Heft 66 der Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Kirschbaum Verlag, Bad Godesberg, 1966.
- Ernst, R.: Verkehrsablauf an Straßenknoten; Heft 60 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1967.
- Wiedemann, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen - Untersuchungen über die Ausbreitung von Fahrzeugpuls; Heft 74 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1968.
- Ziegler, M.: Wegewahl als Regelkreis - Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wegewahl, Reisezeiten und Verkehrsmengen; Heft 99 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1970.
- Hoefs, D. H.: Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen; Heft 140 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1972.
- Dilling, J.: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken; Heft 151 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1973.
- Leutzbach, W., Wetterling, K.: Kurzfassungen ausgewählter Arbeiten aus der Bundesrepublik Deutschland, Techn. Untersuchungen; Heft 3 der Schriftenreihe "Forschung Stadtverkehr - Sonderreihe", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1974.
- Findeisen, H.-G.: Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen; Heft 178 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1975.
- Brilon, W.: a) Unfallgeschehen und Verkehrsablauf.
b) Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen; Heft 201 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1976.

- Brilon, W., Brannolte, U.: Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Straßen mit Gegenverkehr; Heft 239 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1977.
- Handschmann, W., Voss, M.: Der Mensch als Fahrzeugführer; Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Menschen; Heft 8 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1978.
- Leutzbach, W. et al.: Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell; Heft 9 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1978.
- Sparmann, U.: Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen; Heft 263 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1978.
- Mohamed Ibrahim, M. Y.: Modell zur Anpassung eines städtischen Erschließungsnetzes an die wachsende Motorisierung in Entwicklungsländern unter besonderer Berücksichtigung des Radverkehrs. Dissertation Universität Karlsruhe, 1979.
- Koffler, Th., Metzger, W.: Untersuchung über zweckmäßige Zeit- und Wegeabschnitte zur Erfassung des Verkehrsablaufs; Heft 283 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.
- Wetterling, K.: Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften; Heft 292 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.
- Martin, W.: Verkehrsablauf auf Stadtstraßen mit Lichtsignalanlagen; Heft 268 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1979.
- Winzer, Th.: Messung von Beschleunigungsverteilungen; Heft 319 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.
- Leutzbach, W. et al.: Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell, 2. Teil; Heft 16 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.)-Schriftenreihe, Frankfurt 1980.
- Brannolte, U.: Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen; Heft 318 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980.

Im Buchhandel erhältlich:

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

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

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

Die mit +) versehenen Veröffentlichungen sind vergriffen!