

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

Dr.-Ing. Uwe Köhler

**Stabilität  
von Fahrzeugkolonnen**

---

Heft 9



1974

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe. Sie baut auf Ergebnissen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützten Forschungsauftrags auf.

Herrn Professor Dr.-Ing. W. Leutzbach danke ich sehr für die wertvollen Diskussionen, Herrn Professor Dr.-Ing. E. Plate für seine Anregungen.

Herrn Dr.-Ing. D. H. Hoefs danke ich für die Überlassung seiner Rechenprogramme und Daten.

Alle Programme wurden auf der Electrologica X8 bzw. der Univac 1108 des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe gerechnet.

Karlsruhe, im Januar 1974

Uwe Köhler

## Inhaltsverzeichnis

### Aufgabenstellung

- I. Die Fahrzeugfolgegleichung von HERMAN et al.
  1. Einführung
  2. Die Fahrzeugfolgegleichung für  $l = 0$  und  $m = 0$ 
    - 2.1 Berechnungsmethode
    - 2.2 Stabilitätsbetrachtungen
      - 2.2.1 Definitionen
      - 2.2.2 Einzelstabilität
      - 2.2.3 Kolonnenstabilität
    - 2.3 Schlußfolgerungen
    - 2.4 Abstandskriterien
  3. Die Fahrzeugfolgegleichung für beliebige  $l$ - $m$ -Kombinationen
    - 3.1 Berechnungsmethode
    - 3.2 Stabilitätsbetrachtungen
      - 3.2.1 Grundlagen
      - 3.2.2 Algol-Programm
      - 3.2.3 Auswertung der Programmläufe
      - 3.2.4 Der Einfluß der einzelnen Größen auf das Stabilitätsverhalten
    - 3.3 Abstandskriterien
    - 3.4 Kalibrierung der Fahrzeugfolgegleichung
    - 3.5 Vergleich des Folgeverhaltens
  4. Mathematischer Zusammenhang zwischen den mikroskopischen und makroskopischen Größen
  
- II. Konzeption eines Abstandswarngeräts
  1. Vorbemerkung
  2. Kolonnenverkehr ohne Hilfseinrichtungen in den Fahrzeugen
    - 2.1 Prozedur FZ1
    - 2.2 Prozedur FF
      - 2.2.1 Zufallsgrößen  $\tau$  und  $\lambda_{1,m}$
      - 2.2.2 Anfangswerte und Fallzuweisung
      - 2.2.3 Berechnung der kinematischen Größen
      - 2.2.4 Stabilitätsbetrachtung
      - 2.2.5 Genereller Aufbau des Programms

- 3.           Kolonnenverkehr mit Abstandswarngeräten
- 3.1          Grundkonzeption
- 3.2          Kriterien für die Auswahl der Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven
- 3.3          Wirkungsweise des Abstandswarngeräts
- 3.4          Rechenprogramm
- 3.4.1        Verringerung der Reaktionszeit
- 3.4.2        Veränderung der Beschleunigung
- 4.           Ergebnisse
- 5.           Ausblick auf die Möglichkeiten autotomatischer Folgesysteme

### III.           Zusammenfassung

### IV.           Anhang

- A1           Weitere Berechnungsmethoden für die Fahrzeugfolge-  
gleichung mit  $l = m = 0$
- A1.1         Fahrzeugfolgevorgang als Regelkreis
- A1.2         Lösung mit Laplace-Transformation
- A1.3         Lösung mit Analogrechner
- A1.4         Lösung mit Z-Transformation
- A1.5         Graphische Lösung nach TAYLOR
- A2           Algol-Programm zur Berechnung der Fahrzeugfolgegleichung  
mit  $l = m = 0$
- A3           Algol-Programm zur Berechnung der Fahrzeugfolgegleichung  
mit beliebigen Exponenten
- A4           Algol-Programm zur Berechnung der Grenzkurven
- A5           Ergebnis Ausdruck
- A6           Vergleich der maximalen Verkehrsstärken
- A7           Algol-Programm zur Berechnung der Bewegung  
von Fahrzeugkolonnen

### V.           Literaturverzeichnis

## Aufgabenstellung

Beobachtet man den Verkehrsablauf auf Straßen, so kann dies nach zwei verschiedenen Methoden geschehen: Will man Aufschluß über die kinematischen Größen der einzelnen Fahrzeuge erhalten, z. B. über Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und zurückgelegte Wege, werden die Bewegungsabläufe dieser einzelnen Elemente, aus denen sich der Verkehr zusammensetzt, untersucht. Man spricht von einer mikroskopischen Betrachtungsweise. Betrachtet man dagegen ein Kollektiv von Fahrzeugen und mißt dabei solche Größen, die dieses Kollektiv insgesamt beschreiben (z. B. Verkehrsstärke, -dichte), nennt man dies eine makroskopische Beobachtung.

Unabhängig von der Beobachtungsweise unterscheidet man verschiedene Formen des Verkehrsablaufs, nämlich

freien Verkehr  
teilgebundenen Verkehr und  
gebundenen Verkehr.

Bei freiem Verkehr kann jeder Fahrer auf einer Strecke jede für ihn realistische Geschwindigkeit wählen, ohne durch andere Fahrzeuge in dieser Wahl beeinflusst zu werden.

Werden dagegen einige Fahrzeuge durch andere behindert, d.h. können nicht mehr alle Fahrzeuge frei fahren, herrscht teilgebundener Verkehr. Innerhalb dieses Zustandes bilden sich Fahrzeugkolonnen, bei denen die Geschwindigkeiten der Folgefahrzeuge von der Geschwindigkeit des ersten Fahrzeugs der Kolonne (des Führungsfahrzeugs) abhängen. Teilgebundener Verkehr besteht also aus Fahrzeugen, die frei fahren (das sind alle Fahrzeuge, die unbeeinflusst sind, also allein auf der Strecke befindliche Fahrzeuge und die Führungsfahrzeuge) und solchen, die ihre Geschwindigkeiten nicht mehr frei wählen können. Wenn der Anteil derjenigen Fahrzeuge, die ihre Geschwindigkeit noch frei wählen können, sehr klein wird und keine Überholungen mehr möglich sind, geht der teilgebundene Verkehr in gebundenen Verkehr über.

Innerhalb von Kolonnen treten Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen dergestalt auf, daß die Geschwindigkeit bzw. die Beschleunigung eines Fahr-

zeugs in irgendeiner Form von den Geschwindigkeiten anderer Fahrzeuge in der Kolonne abhängt. Diese Wechselwirkungen lassen sich durch ein mikroskopisches mathematisches Modell beschreiben, wobei allerdings Vereinfachungen getroffen werden müssen. Dadurch ist es aber möglich, gewisse Phänomene des Kolonnenverkehrs zu untersuchen, vor allem die Stabilität. Bei stabilem Verhalten einer Fahrzeugkolonne ist die Gefahr eines Staus, der nicht durch äußere Einflüsse wie z. B. eine Engstelle entsteht, sondern nur durch das instabile Verhalten der Fahrzeuge, geringer oder ganz ausgeschlossen.

In dieser Arbeit soll deshalb zunächst versucht werden, auf der Grundlage eines solchen mathematischen Modells die Stabilitätseigenschaften von Fahrzeugkolonnen zu untersuchen und Stabilitätskriterien anzugeben. Dabei wird von einfachen Modellvorstellungen ausgegangen, weil die Lösungsmöglichkeiten für die erweiterten Modelle auf diesen Fall zurückgeführt werden können.

Sind die Vereinfachungen nicht zu grob und liegen Meßdaten vor, die die Kalibrierung des Modells gestatten, kann ein solcher mathematischer Ansatz das Fahrverhalten von Kolonnen in Übereinstimmung mit der Wirklichkeit beschreiben. In Kombination mit den Ergebnissen der Stabilitätsuntersuchung lassen sich damit die Auswirkungen der Verbesserung des Stabilitätsverhaltens nachprüfen. Eine Verbesserung kann dadurch erreicht werden, daß den Fahrzeugführern eine Information über die Güte ihres augenblicklichen Abstandes angegeben wird. Als Kriterium für die Güte des Abstandes wird dabei eine Beziehung zwischen Abstand und Geschwindigkeit zugrundegelegt, die stabiles Verhalten gewährleistet.

I. Die Fahrzeugfolgegleichung von HERMAN et al.

1. Einführung

Mathematische Ansätze, die die Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen einer Kolonne beschreiben, sind in zwei Gruppen unterteilbar:

1. Deterministische Fahrzeugfolgegleichungen
2. Stochastische Fahrzeugfolgemodelle.

Während bei Modellen der zweiten Art mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen z. B. verschiedene Eigenschaften der Fahrer oder unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften beschrieben werden können, werden bei deterministischen Gleichungen, mit denen sich die folgenden Abschnitte befassen, nur Mittelwerte oder andere Parameter der Verteilung verwendet.

Erste Ansätze zur Beschreibung der Wechselwirkungen stammen von REUSCHEL (1) und PIPES (2). Sie stellten einen Ansatz auf, bei dem die Geschwindigkeit eines nachfolgenden Fahrzeugs  $n+1$  proportional ist zum Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen  $n$  und  $n+1$ :

$$a \dot{x}_{n+1}(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) + c$$

In einem ähnlichen Ansatz von CHANDLER, HERMAN, MONTROLL (3) wurde zusätzlich berücksichtigt, daß bei einem Fahrer-Fahrzeug-System Reaktionen auf Bewegungsänderungen erst nach einem Zeitintervall  $\tau$ , der Reaktionszeit, erfolgen.

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \lambda (\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau))$$

Eine Erweiterung dieses Ansatzes ging von einem abstandsabhängigen  $\lambda = f(x_n - x_{n+1})$  aus (4), bis schließlich von GAZIS, HERMAN, ROTHERY (5) der folgende allgemeine Ansatz für eine ganze Familie von Fahrzeugfolgegleichungen aufgestellt wurde:

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{1,m} \cdot [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^1} \cdot [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)] \quad (1.1)$$

Dabei bedeuten die einzelnen Größen:

$n$	= Nr. des betrachteten Fahrzeugs in der Kolonne
$x_n(t)$	= Position des Fahrzeugs $n$
$\dot{x}_n(t)$	= Geschwindigkeit des Fahrzeugs $n$
$\ddot{x}_n(t)$	= Beschleunigung des Fahrzeugs $n$
$\tau$	= Reaktionszeit des Fahrer-Fahrzeug-Systems
$\lambda_{1,m}$	= Proportionalitätsfaktor
$m, l$	= Parameter

Die Beschleunigung eines Fahrzeugs  $n+1$  zum Zeitpunkt  $t$  ist nach Gl. (1.1) sowohl von der Relativgeschwindigkeit zwischen ihm und dem sich vor ihm befindlichen Fahrzeug  $n$  zum Zeitpunkt  $t-\tau$ , als auch vom Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen zum Zeitpunkt  $t-\tau$ , als auch von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs  $n+1$  zum Zeitpunkt  $t$  abhängig. Der Quotient

$$\lambda_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{1,m} \cdot [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^l}$$

wurde von HERMAN et al. mit "Sensitivität" bezeichnet und als eine psychologische Größe interpretiert. Hier wird dieser Quotient nur als eine mathematische Größe angesehen.

Daß in Gl. (1.1) außer dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit auch die Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs auftritt, kann folgendermaßen begründet werden: Abstand und Relativgeschwindigkeit zur Zeit  $(t-\tau)$  veranlassen den Fahrer des betrachteten Fahrzeugs, nach einer Zeit  $\tau$  durch die Beschleunigung  $\ddot{x}_{n+1}(t)$  darauf zu reagieren. Die Beschleunigung ist aber auch von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs  $n+1$  abhängig, denn ein Fahrer muß z. B. bei kleinem Abstand und großer Eigengeschwindigkeit bei einem Schließvorgang ( $\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) < 0$ ) mit einer höheren Verzögerung reagieren als bei geringerer Eigengeschwindigkeit unter sonst gleichen Bedingungen, um einen Auffahrunfall zu vermeiden.



Abstand und Relativgeschwindigkeit spiegeln also in erster Näherung das Verkehrsgeschehen wider, auf das ein Fahrer reagiert. Allerdings wird hierbei nur das direkt vorausfahrende Fahrzeug berücksichtigt. HERMAN et al.

(4) betrachten in einer Erweiterung von Gl. (1.1) auch noch den Einfluß von zwei vorausfahrenden Fahrzeugen, während BEXELIUS (6) diese Gleichung so verallgemeinert, daß beliebig viele Fahrzeuge zur Beschreibung des Verhaltens von Fahrzeug  $n+1$  herangezogen werden können.

## 2. Die Fahrzeugfolgegleichung für $l = 0$ und $m = 0$

Aus Gl. (1.1) läßt sich mit  $m = 0$  und  $l = 0$  die einfachste Gleichung des allgemeinen Typs finden zu

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \lambda_{0,0} [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)] \quad (2.1)$$

für  $n = 1, 2, 3, \dots, k$

Hierbei ist  $\lambda_{n+1}(t)$  gleich  $\lambda_{0,0}$ , also weder von der Geschwindigkeit noch vom Abstand zwischen den Fahrzeugen abhängig. Wie in Kap. I.4 noch gezeigt wird, kann diese Fahrzeugfolgegleichung das Verhalten von Kolonnen nicht so realistisch beschreiben wie Fahrzeugfolgegleichungen mit anderen Exponenten  $l$  und  $m$ . Dagegen sind die für diese Gleichung ermittelten Lösungsmethoden und Stabilitätskriterien auch für alle anderen Kombinationen von  $l$  und  $m$  von großer Bedeutung. Aus diesem Grunde wird sie näher untersucht.

### 2.1 Berechnungsmethode

Die Fahrzeugfolgegleichung (2.1) läßt sich nach mehreren Methoden berechnen. Hier wird die Lösung mit Hilfe eines Digitalrechners beschrieben, weil diese Methode auch für alle anderen  $l$ - $m$ -Kombinationen zweckmäßig ist. Weitere Lösungsmöglichkeiten sind in Anhang 1 angegeben.

Das Algol-Rechenprogramm beruht darauf, daß für sehr kleine Zeitintervalle

$A = t_{i+1} - t_i^+)$ , in denen die Beschleunigungen der Folgefahrzeuge als konstant angesehen werden, aufgrund einer beliebigen vorgegebenen Geschwindigkeitsganglinie (= Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit) des Führungsfahrzeuges die Geschwindigkeiten und daraus über Gl. (2.1) die Beschleunigungen der Folgefahrzeuge berechnet werden:

$$\dot{x}_n(t_{i+1}) = A \cdot \ddot{x}_n(t_i) + \dot{x}_n(t_i) \quad (2.2)$$

bzw.

$$\dot{x}_{n, i+1} = A \cdot \ddot{x}_{n, i} + \dot{x}_{n, i}$$

Um also die Geschwindigkeit  $\dot{x}_n$  zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  zu erhalten, wird die in einem Schritt zuvor errechnete Beschleunigung  $\ddot{x}_n(t_i)$  mit diesem Zeitintervall  $A$  multipliziert und zu der ebenfalls schon errechneten Geschwindigkeit  $\dot{x}_n(t_i)$  addiert. Die Berechnung der ersten Zeitschritte ist deshalb einfach, weil während der Reaktionszeit  $\tau$  die Folgefahrzeuge ihre Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  beibehalten und erst nach Verstreichen von  $\tau$  auf Bewegungsänderungen des vorderen Fahrzeugs reagieren.

Das grobe Strukturdiagramm zur Berechnung der Fahrzeugfolgegleichung hat die in Abb. 1 dargestellte Form.

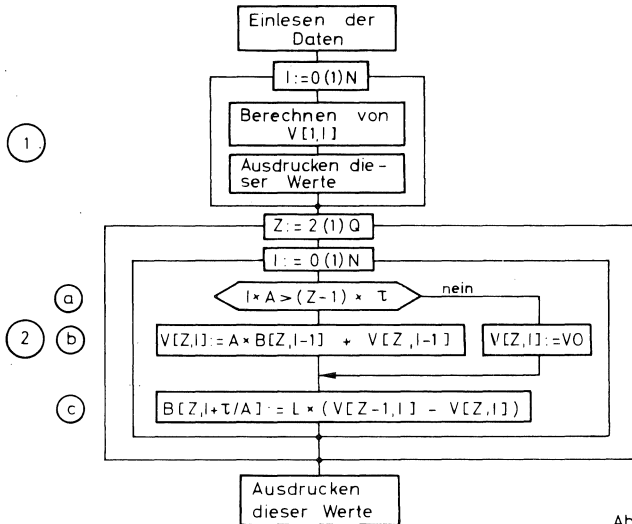


Abb. 1

+) Dabei besteht der folgende Zusammenhang:  $\tau = k \cdot A$  (mit  $k =$  ganze Zahl). Die Fahrzeugfolgegleichung läßt sich dann in der diskretisierten Form

$$\ddot{x}_{n+1, i} = \lambda_{0,0} \cdot [\dot{x}_{n, i-k} - \dot{x}_{n+1, i-k}]$$

schreiben. Mit  $t = i \cdot A$  wird daraus die übliche Schreibweise.

Erläuterungen zu Abb. 1:

- (1) Es werden die Geschwindigkeiten des ersten Fahrzeugs für jeden Zeitschritt I errechnet.
- (2) Es werden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Folgefahrzeuge Z für jeden Zeitabschnitt I errechnet.
  - a) Diese Abfrage bewirkt, daß während der Reaktionszeit  $\tau$  die Folgefahrzeuge mit konstanter Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  fahren.
  - b) Es werden nach Gl. (2.2) die Geschwindigkeiten errechnet.
  - c) Es werden nach Gl. (2.1) in der abgeänderten Form

$$\ddot{x}_{n+1,i+k} = \lambda_{0,0} \cdot [\dot{x}_{n,i} - \dot{x}_{n+1,i}] \quad (L \stackrel{\Delta}{=} \lambda_{0,c})$$

die Beschleunigungen errechnet.

Das dazugehörige Algol-Programm ist in Anhang 2 beigelegt. Durch die Größe des Zeitintervalls A wird die Genauigkeit der Rechnung beeinflusst. Je größer A gewählt wird, umso länger wird die Beschleunigung eines Fahrzeuges konstant gehalten, d.h. umso ungenauer wird die Berechnung. Bei kleiner werdendem A steigt dagegen die benötigte Rechenzeit schnell an. Deshalb ist es zweckmäßig, eine Fehlerbetrachtung anzustellen, in der die Abweichungen der errechneten Zahlenwerte von den exakten Werten für verschiedene Intervallgrößen A miteinander verglichen werden.

Zur Berechnung exakter Zahlenwerte scheiden aber die in Anhang 1 angegebenen Methoden aus. Deshalb wurde für die Fehlerbetrachtung eine Methode entwickelt, die über eine analytische Berechnung exakte Zahlenwerte liefert.

Es wird angenommen,  $\ddot{x}_{n=1}(t)$  sei eine stetige und differenzierbare Funktion

$$\ddot{x}_1(t) = f(t)$$

Dann ist wegen

$$\dot{x}_1(t) = \dot{x}(0) + \int_0^t \ddot{x}_1(t) dt$$

auch  $\dot{x}_1(t)$  stetig und differenzierbar. Für das Zeitintervall  $(t_0, t_0+\tau)$ , in dem Fahrzeug 2 noch mit konstanter Geschwindigkeit fährt, gilt dann (Abb.2)

$$\ddot{x}_{2, t_0 t_1} = \lambda_{0,0} \cdot [\dot{x}_{1, t_1 t_0} - \dot{x}_{2, t_1 t_0}] = 0$$

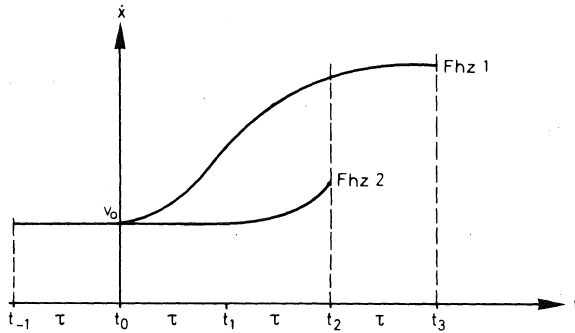


Abb. 2

Für das Zeitintervall  $(t_1, t_2)$  erhält man

$$\ddot{x}_{2,t_1 t_2} = \lambda_{0,0} \cdot [\dot{x}_{1,t_0 t_1} - \dot{x}_{2,t_0 t_1}]$$

als Differenz zweier stetiger Funktionen, also selbst als stetige Funktion. Dieses Verfahren kann für die folgenden Zeitintervalle entsprechend weitergeführt werden, wobei sich die Beschleunigung und daraus durch Integration über das betrachtete Intervall auch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs 2 als stetige Funktion ergibt.

Für das Beispiel

$$\dot{x}_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ 5 \sin 0,4t & \text{für } 0 \leq t \leq 10 \text{ [sec]} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \lambda_{0,0} &= 1 \text{ [1/sec]} \\ \tau &= 2 \text{ [sec]} \end{aligned}$$

wurden analytisch und numerisch mit verschiedenen A-Werten folgende Zahlenwerte errechnet:

t [sec]	$\dot{x}_2(t)$ [m/sec]				Abweichungen in % vom analytischen Wert		
	analytisch	Numerisch mit $\Delta =$			0,1	0,02	0,01
		0,1	0,02	0,01			
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0
3	0,99	0,89	0,97	0,98	-10,0	-2,0	-1,0
4	3,79	3,61	3,76	3,77	- 4,7	-0,8	-0,5
5	7,64	7,50	7,61	7,63	- 1,8	-0,25	-0,2
6	10,28	10,40	10,31	10,30	+ 1,2	+0,4	+0,1
7	9,41	9,92	9,51	9,46	+ 5,3	+1,1	+0,5
8	4,26	5,01	4,41	4,33	+17,6	+3,2	+1,6
9	-3,39	-2,89	-3,30	-3,44	-14,7	-2,6	-1,5
10	-9,84	-10,15	-9,92	-9,88	+ 3,2	+0,8	+0,4

Die Tabelle zeigt: eine Erhöhung der Genauigkeit um den Faktor 10 wird durch eine Verkleinerung der Schrittweite A um den Faktor 10 erreicht. Natürlich muß beachtet werden, daß die Ungenauigkeiten von Fahrzeug zu Fahrzeug zunehmen, da ja die Grundlage der Geschwindigkeitsberechnung für Fahrzeug n+1 die errechneten Geschwindigkeiten des Fahrzeugs n sind.

Günstig macht sich - besonders im Hinblick auf die Stabilitätsberechnungen - das Abnehmen der Fehler bei Erreichen der maximalen bzw. minimalen Geschwindigkeiten der Folgefahrzeuge bemerkbar.

Um die Genauigkeit möglichst groß zu halten und dennoch Rechenzeit zu sparen, wurde in den meisten Programmen  $A = 0,02$  gewählt.<sup>+) )</sup>

In Absch. I.2.2.3 sind mehrere Beispiele angeführt, in denen die Geschwindigkeitsganglinien von Folgefahrzeugen nach dem in diesem Abschnitt erläuterten Rechenprogramm ermittelt wurden.

+) Unter Beachtung der Fußnote am Beginn dieses Abschnitts folgt daraus, daß wegen  $\tau = k \cdot A$  die Reaktionszeit nur solche Werte annehmen kann, die in der zweiten Dezimalstelle geradzahlig sind.

## 2.2 Stabilitätsbetrachtungen

### 2.2.1 Definitionen

Die Stabilitätseigenschaften von Gl. (2.1) werden deshalb untersucht, weil die im folgenden aufgestellten Definitionen und Ergebnisse die Grundlage für die Untersuchung der allgemeinen Fahrzeugfolgegleichung (1.1) sind.

Folgen sich zwei Fahrzeuge, so wird bei Bewegungsänderungen des Führungsfahrzeugs der Fahrer des Folgefahrzeugs nach einer Zeit  $\tau$  diese Bewegungsänderungen nachzuahmen versuchen, falls er nicht überholen kann oder will. Gelingt es ihm, die dabei auftretenden Schwingungen seiner Geschwindigkeiten, die z. B. durch eine periodische Bewegungsänderung des Führungsfahrzeugs entstehen, beschränkt zu halten (so daß die Amplituden also mit zunehmender Zeit nicht immer weiter anwachsen), liegt Einzelstabilität<sup>+) vor.</sup>

Pflanzt sich eine solche Störung, die durch das Führungsfahrzeug in eine Kolonne aus mehr als zwei Fahrzeugen gebracht wird, innerhalb dieser Kolonne fort, aber derart, daß die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge nicht größer werden als die Amplitude des Führungsfahrzeugs, liegt Kolonnenstabilität<sup>+) vor.</sup>

Da natürlich Schwankungen in den Geschwindigkeiten auch Schwankungen in den Abständen hervorrufen, kann instabiles Verhalten innerhalb einer Kolonne je nach dem Grad der Instabilität und je nach dem anfänglichen Abstand der Fahrzeuge zu Kollisionen führen. Wenn also Fahrhilfen entwickelt werden, die entweder halbautomatisch arbeiten (z. B. Abstandswarngeräte in den Fahrzeugen) oder sogar ein völlig automatisiertes Fahren ermöglichen (keine Eingriffe des "Fahrers" mehr), dann müssen diese Fahrhilfen ein stabiles Fahrverhalten gewährleisten.

---

+) Bisher waren die aus der amerikanischen Literatur übernommenen Begriffe "lokale Stabilität" für "Einzelstabilität" und "asymptotische Stabilität" für "Kolonnenstabilität" gebräuchlich. Da diese Begriffe in der Schwingungslehre aber eine andere als die hier definierte Bedeutung aufweisen, werden sie nicht verwendet.

### 2.2.2 Einzelstabilität<sup>+</sup>)

Die in Gl. (2.1) auftretenden Parameter  $\lambda_{0,0}$  und  $\tau$  können zu einem Parameter zusammengefaßt werden:

Für

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \lambda_{0,0} \cdot [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)] \quad (2.1)$$

kann auch 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  $\frac{t}{\tau} = z$  wird daraus

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

bzw.

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

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

$$\dot{v}_{n+1}(z) = c \left[ v_n(z-1) - v_{n+1}(z-1) \right] \quad (2.3)$$

Mit den Anfangsbedingungen  $x_n = \dot{x}_n = 0$  erhält man aus Gl. (2.3) die Laplace-Transformierte (vgl. Anhang 1)

$$sV_{n+1}(s) = c \left[ (V_n(s) - V_{n+1}(s)) \cdot e^{-s} \right] \quad (2.4)$$

Wird Gl. (2.4) nach  $V_{n+1}(s)$  aufgelöst, ergibt sich

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

Die charakteristische Gleichung dieser Funktion lautet also

$$c + se^S = 0 \quad (2.5)$$

Das Folgeverhalten ist dann einzelstabil, wenn Gl. (2.5) keine Lösungen in der positiven Hälfte der komplexen Ebene der Abb. 3 hat.

<sup>+</sup>) Zu dem hier gezeigten Lösungsansatz siehe (11) und (16)

Mit  $s = \alpha + i\beta$  wird aus Gl. (2.5)

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

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

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

Durch Umformung wird daraus

$$(c + e^\alpha (\alpha \cos \beta - \beta \sin \beta)) + ie^\alpha (\alpha \sin \beta + \beta \cos \beta) = 0 \quad (2.6)$$

Setzt man die beiden Summanden von Gl. (2.6) gleich, erhält man Lösungen als Schnittpunkte der beiden Funktionen

$$c + e^\alpha (\alpha \cos \beta - \beta \sin \beta) = 0 \quad (2.7)$$

und

$$\alpha \sin \beta + \beta \cos \beta = 0 \quad (2.8)$$

Gl. (2.7) kann durch Multiplikation mit  $\cos \beta$  und unter Berücksichtigung von Gl. (2.8) umgeformt werden in

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

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

$$c \cos \beta + \alpha e^\alpha = 0 \quad (2.9)$$

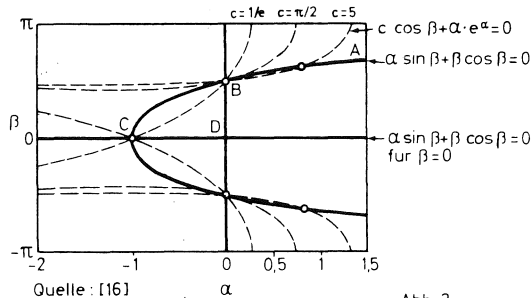


Abb. 3



In Abb. 3 sind die beiden Gleichungen (2.8) und (2.9) aufgezeichnet.

Man erkennt:

- Ist  $c = \lambda_{0,0} \cdot \tau > \frac{\pi}{2}$ , dann liegen die Lösungen der charakteristischen Gleichung (= Schnittpunkte der Gln. (2.8) und (2.9)) im Bereich AB, d.h. in der rechten Hälfte des Koordinatensystems. Ein Folgevorgang ist mit diesen Parameterkombinationen instabil (die Amplitude der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs wächst unbegrenzt an, wenn als Störfunktion (= Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs) z. B. eine harmonische Schwingung vorgegeben wird).
- Ist  $c = \lambda_{0,0} \cdot \tau = \frac{\pi}{2}$ , dann liegt die Lösung der charakteristischen Gleichung gerade im Punkt B; das ist der Grenzfall zwischen Einzelstabilität und -instabilität.
- Ist  $\frac{1}{e} < c = \lambda_{0,0} \cdot \tau < \frac{\pi}{2}$ , dann liegen die Lösungen der charakteristischen Gleichung im Bereich BC. Die Amplitude der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs kann zwar größer sein als die des Führungsfahrzeugs, wächst aber mit zunehmender Zeit nicht an (vgl. Abb.11).
- Ist  $c = \lambda_{0,0} \cdot \tau \leq 1/e = 0,368$ , dann liegen die Lösungen der charakteristischen Gleichung im Bereich CD. Die Amplitude der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahrzeugs ist kleiner als die des Führungsfahrzeugs (vgl. Abb. 9), bzw. bei einer Sprungfunktion als Störfunktion tritt kein Überschwingen auf (vgl. Abb. 7).

### 2.2.3 Kolonnenstabilität

Die Ergebnisse des vorigen Abschnitts zeigen die verschiedenen Eigenschaften der Geschwindigkeitsganglinie eines Folgefahrzeugs bei einer Bewegungsänderung des Führungsfahrzeugs in Abhängigkeit von den Parametern  $\lambda_{0,0}$  und  $\tau$ .

Von größerem Interesse ist aber die Antwort auf die Frage, welche Parameterkombination von  $\lambda_{0,0}$  und  $\tau$  nicht überschritten werden darf, damit sich bei einer Kolonne aus mehr als zwei Fahrzeugen eine in das System eingebrachte periodische Störung von Fahrzeug zu Fahrzeug nicht aufschaukelt,

da sich diese Kolonne sonst, wie in Absch. I.2.2.1 definiert wurde, kolonneninstabil verhalten würde.

Der Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität liegt also gerade dann vor, wenn bei einer periodischen Störfunktion die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien aller Folgefahrzeuge die gleiche Größe haben wie die des Führungsfahrzeugs.

Das bedeutet: Setzt man in Gl. (2.3) für  $\dot{x}_n(z)$  eine Sinusfunktion mit der Amplitude  $a$  und der Frequenz  $\omega$  ein, dann sind im Grenzfall auch die Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge periodische Funktionen mit der gleichen Frequenz  $\omega$  und der gleichen Amplitude  $a$  (vgl. dazu MAGNUS (17) ).

Durch numerische Auswertung wurden für unterschiedliche sinusförmige Störfunktionen die Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge entsprechend Gl. (2.3) mit verschiedenen Werten für  $c$  errechnet. Die Größe der Amplituden der Folgefahrzeuge wurde jeweils mit der Amplitude der Störfunktion verglichen. Waren sie gleichgroß, wurde der entsprechende  $c$ -Wert ausgedruckt (vgl. Abb. 4).

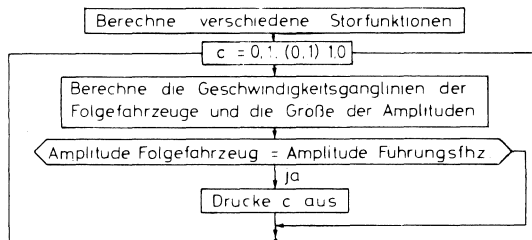


Abb 4

Das Ergebnis für den Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität lautet für alle Störfunktionen

$$c = \lambda_{0,0} \cdot \tau = 0,5$$

(wie auch in (3) und (18) auf andere Art berechnet wurde).

Ist  $\lambda_{0,0} \cdot \tau > 0,5$ , wachsen die Amplituden von Fahrzeug zu Fahrzeug an (vgl. Abb. 11); ist  $\lambda_{0,0} \cdot \tau < 0,5$ , nehmen die Amplituden ab (vgl. Abb. 9).

### 3.3 Schlußfolgerungen

Die in den beiden vorigen Abschnitten errechneten Stabilitätskriterien sind in Abb. 5 graphisch dargestellt.

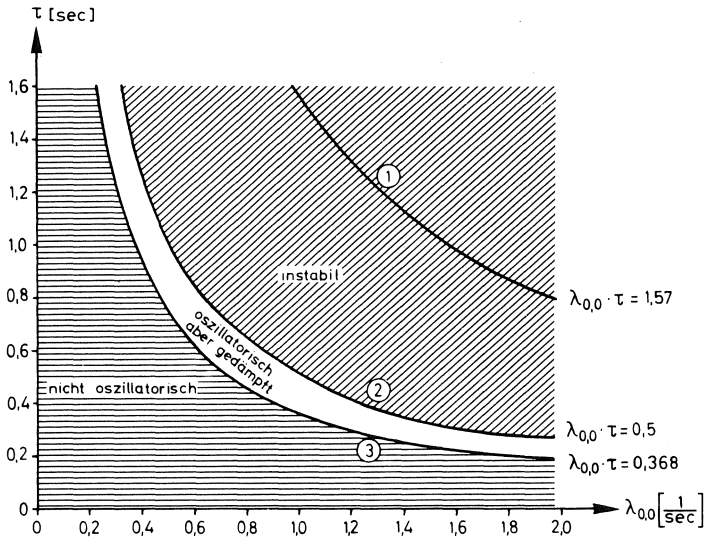


Abb 5

Die Stabilitätskriterien sind also nur von den Parametern  $\lambda_{0,0}$  und  $\tau$  abhängig, nicht von der Größe der Amplitude  $a$  (und damit nicht von der Höhe des Geschwindigkeitsniveaus, auf dem sich der Folgevorgang abspielt) und nicht von der Frequenz  $\omega$  der Störfunktion.

Wie sich in den einzelnen Bereichen von Abb. 5 die Geschwindigkeitsganglinien von Folgefahrzeugen darstellen, wird an einigen Beispielen gezeigt. Als Störfunktionen wurden dabei Sprung- und Sinusfunktionen gewählt.

Allerdings muß kein unendlich großer Bereich möglicher Störfunktionen betrachtet werden, da sowohl das Fahrzeug als auch der Fahrer gewisse Grenzen vorgeben. So ist die Sprunghöhe einer Sprungfunktion durch den Wert der Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs begrenzt. Bei einer Sinusfunktion kann die Amplitude höchstens die Größe der halben Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs annehmen, während die untere Grenze dadurch gegeben ist, daß Schwingungen mit sehr kleinen Amplituden (d.h. nur geringe Geschwindigkeitsänderungen) nicht mehr wahrgenommen werden können. Entsprechend können für die Frequenzen obere und untere Grenzwerte abgeschätzt werden: Maximale Frequenzen sind bestimmbar wegen der Zeit, die ein Fahrer benötigt, um zwischen Gas- und Bremspedal zu wechseln, sehr kleine Frequenzen werden deshalb nicht in Betracht gezogen, weil ein nachfolgender Fahrer die dadurch hervorgerufenen Geschwindigkeitsänderungen kaum wahrnehmen kann, da sie sehr langsam erfolgen. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aufgrund der Verzögerungseigenschaften der Fahrzeuge. Mit einer Störfunktion der Art

$$\dot{x}_1(t) = (v_0 - a) + a \cos \omega t \quad [\text{m/sec}]$$

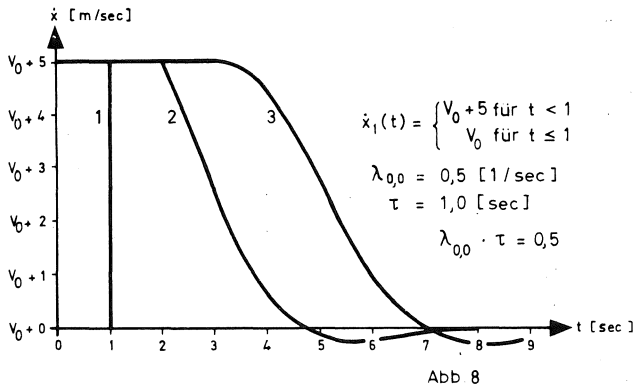
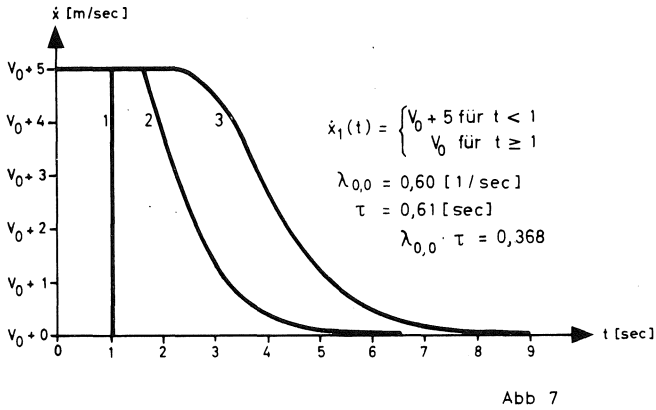
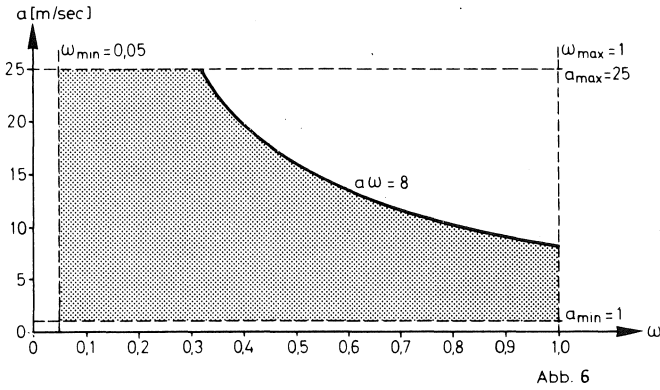
(Anfangsgeschwindigkeit bei  $t_0 = 0 : v_0$ ) errechnet sich die Beschleunigung zu

$$\ddot{x}_1(t) = -a\omega \sin \omega t \quad [\text{m/sec}^2]$$

(Anfangsbeschleunigung bei  $t_0 = 0 : 0$ ). Da die maximale Verzögerung der meisten Fahrzeuge einen Wert von  $-8 \text{ [m/sec}^2\text{]}$  nicht überschreitet, gilt somit auch:  $a\omega \leq 8 \text{ [m/sec}^2\text{]}$ .

Für die hier aufgezählten Grenzen sind in Abb. 6 Zahlenwerte angegeben, die allerdings nur als Schätzwerte zu betrachten sind.

Für das Beispiel einer Sprungfunktion zeigen die Abb. 7 und 8 folgende Eigenschaften: für  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 0,368$  treten bei den beiden Folgefahrzeugen keine Unterschwingungen auf (Abb. 7), bis  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 0,5$  wachsen die Unterschwingungen von Fahrzeug zu Fahrzeug nicht an (Abb. 8).



In Abb. 9 ist mit der erwähnten periodischen Störfunktion ein kolonnenstabiler (und damit auch einzelstabiler) Folgevorgang mit  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 0,368$  aufgezeichnet, in den Abb. 10a und b mit verschiedenen Parametern für die Störfunktion jeweils ein Folgevorgang auf der Grenze zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität ( $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 0,5$ ). Wie diese beiden Abbildungen zeigen, beeinflussen die Parameter a und  $\omega$  der Störfunktion das Stabilitätsverhalten nicht. Allerdings bestimmt die Amplitude natürlich den Schwankungsbereich der Geschwindigkeiten. Bei der hier gewählten Störfunktion

$$\dot{x}_1(t) = v_0 - a + a \cos \omega t$$

schwanken im Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität die Geschwindigkeitsganglinien aller Fahrzeuge der Kolonne gerade zwischen  $v_{\max} = v_0$  und  $v_{\min} = v_0 - 2a$ .

Auch die Schwankungsbreite der Abstände  $\Delta x_0 - \Delta x_{\min} = \Delta \Delta x$  ( $\Delta x_0 =$  maximaler Abstand) wird nicht von  $\omega$ , sondern nur von a und zusätzlich auch von  $\lambda_{0,0}$  und  $\tau$  beeinflusst, wie die folgende Tabelle zeigt<sup>+) :</sup>

$\omega$	0.1	0.4	1.0	
	8.0	8.0		a = 2.5 $\lambda_{0,0} = 0.63$ $\tau = 0.8$
$\Delta \Delta x$ [m]	5.0	5.0	5.0	a = 2.5 $\lambda_{0,0} = 1.00$ $\tau = 0.5$
	50.0	50.0		a = 2.5 $\lambda_{0,0} = 1.00$ $\tau = 0.5$

Änderungen der Frequenz haben also keine Auswirkungen auf die Schwankungsbreite, während dagegen unter sonst gleichen Bedingungen bei Änderung der Amplitude um einen Faktor f eine Änderung der Schwankungsbreite um den Faktor f erfolgt.

Die Ausgangswerte  $v_0$  und  $\Delta x_0$  selbst beeinflussen die Schwankungsbreite nicht.

<sup>+) Diese Werte stammen aus dem gleichen Rechenprogramm, mit dem auch die Geschwindigkeitsganglinien in den Abb. 9 bis 11 ermittelt wurden.</sup>

In Abb. 11 schließlich erkennt man die Auswirkungen der Kolonneninstabilität (bei  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 1,0$ ): da die Abstände zwischen den Folgefahrzeugen entsprechend wie die Geschwindigkeitsganglinien schwingen, ist ein Auf-fahrnfall unvermeidlich, wenn die Kolonne nur genügend groß ist.

Aus diesem Grund ist der in Abb. 5 oberhalb von Kurve 2 eingezeichnete Bereich als instabil bezeichnet, obwohl bis zu Kurve 1 noch Einzelstabilität herrscht. Dieser Bereich scheidet deshalb für mögliche Parameterkombinationen von  $\lambda_{0,0}$  und  $\tau$  aus.

Im weiteren wird von Einzelstabilität auch erst dann gesprochen, wenn  $\lambda_{0,0} \cdot \tau \leq 0,368$  ist.

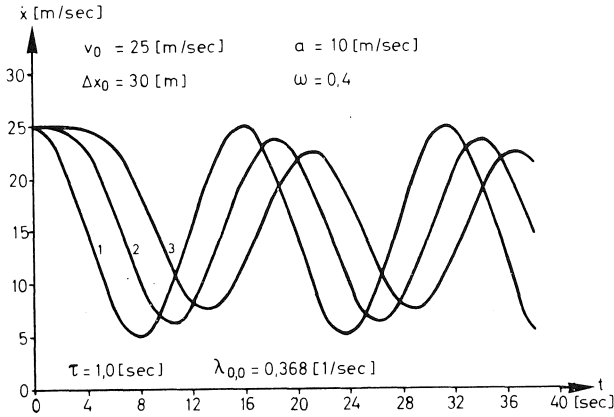


Abb. 9

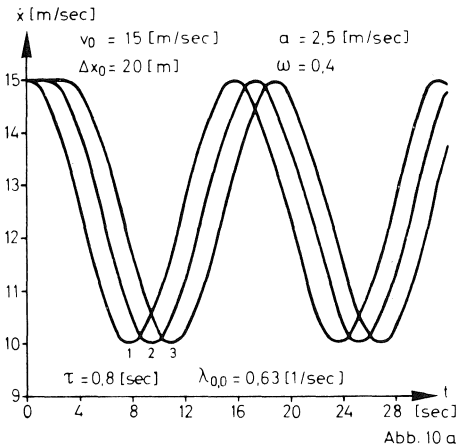


Abb. 10 a

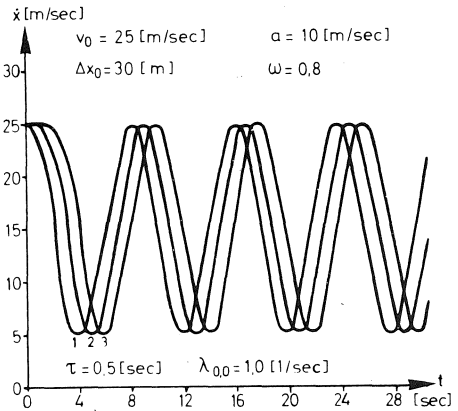
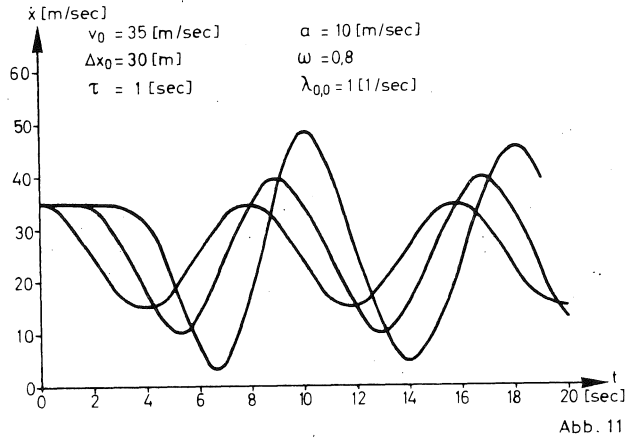


Abb 10 b



#### 2.4 Abstandskriterien

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie sich durch eine Bewegungsänderung des Führungsfahrzeugs der Abstand zwischen ihm und dem Folgefahzeug ändert und wie groß die Mindestabstände bei verschiedenen Anforderungen an die Sicherheit eines Folgevorgangs sein müssen.

Es werde angenommen, daß sich vor einer Bewegungsänderung des Führungsfahrzeugs alle Fahrzeuge mit der konstanten Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  bewegen. Nach Abklingen der Störung habe die konstante Geschwindigkeit für alle Fahrzeuge den Wert  $v_e$  (Abb. 12).

Integration von Gl. (2.1) über das Zeitintervall  $(t_0, t_1)$  liefert

$$\begin{aligned} \dot{x}_{n+1}(t_1) - \dot{x}_{n+1}(t_0) &= \lambda_{0,0} [x_n(t_1-\tau) - x_{n+1}(t_1-\tau)] \\ &\quad - \lambda_{0,0} [x_n(t_0-\tau) - x_{n+1}(t_0-\tau)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

und daraus

$$\begin{aligned} \lambda_{0,0} [(x_n(t_1-\tau) - x_{n+1}(t_1-\tau)) - (x_n(t_0-\tau) - x_{n+1}(t_0-\tau))] \\ = \dot{x}_{n+1}(t_1) - \dot{x}_{n+1}(t_0) \end{aligned} \quad (2.11)$$



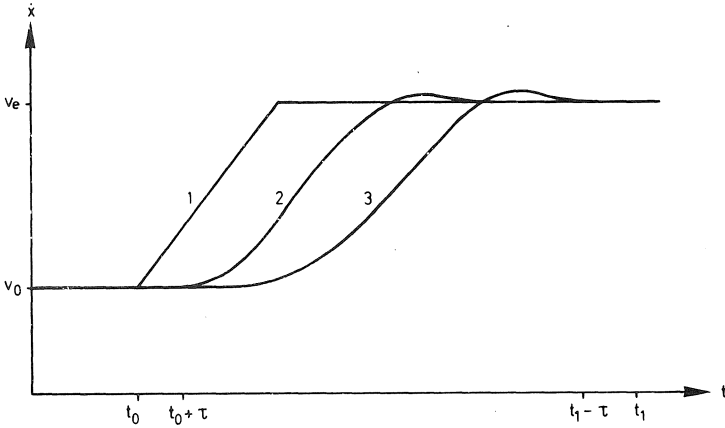


Abb 12

Der Zeitpunkt  $t_0$  muß in dem Bereich liegen, in dem alle Fahrzeuge noch mit  $v_0$  fahren,  $t_1$  in dem Bereich, in dem alle Fahrzeuge die Geschwindigkeit  $v_e$  erreicht haben.

Der Ausdruck in der eckigen Klammer der linken Seite von Gl.(2.11) gibt die Änderung des Abstandes zwischen den Fahrzeugen  $n$  und  $n+1$  im Zeitintervall  $(t_0, t_1)$  an, die rechte Seite die Änderung der Geschwindigkeit von Fahrzeug  $n+1$  im Intervall  $(t_0, t_1)$ .

Mit

$$[x_n(t_1 - \tau) - x_{n+1}(t_1 - \tau)] - [x_n(t_0 - \tau) - x_{n+1}(t_0 - \tau)] = \Delta x_1 - \Delta x_0 = \Delta x_{1,0}$$

wird Gl. (2.11) zu

$$\begin{aligned} \lambda_{0,0} \Delta x_{1,0} &= v_e - v_0 \\ \Delta x_{1,0} &= \frac{v_e - v_0}{\lambda_{0,0}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Wenn das Führungsfahrzeug bis zum Halt bremst, wird  $v_e = 0$  und damit Gl. (2.12) zu

$$\Delta x_{1,0} = - \frac{v_0}{\lambda_{0,0}} \quad (2.13)$$

Haben also vor der Bewegungsänderung alle Fahrzeuge den Abstand  $\frac{v_0}{\lambda_{0,0}}$  (dabei seien die Fahrzeuge punktförmig angenommen), so geschieht bei einem plötzlichen Halt des ersten Fahrzeugs kein Auffahrunfall, sofern die Bedingung  $\lambda_{0,0} \tau \leq 1/e$  erfüllt ist (Abb.7), da bei dieser Parameterkombination kein Unterschwingen erfolgt. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß hierbei die Beschleunigungen der Folgefahrzeuge sehr groß werden können. Bei einem Sprung von  $v_0 = 5$  [m/sec] auf  $v_e = 0$  ist z. B. bei  $\lambda_{0,0} = 1$  [1/sec] die maximale Verzögerung des zweiten Fahrzeugs  $\ddot{x}_{2\min} = -5$  [m/sec<sup>2</sup>], allgemein

$$\ddot{x}_{2\min} = v_0 \cdot \lambda_{0,0} \quad (2.14)$$

Damit lassen sich die folgenden Kriterien für absolut sicheres Fahren in einer Fahrzeugkolonne, deren Verhalten mit Gl. (2.1) beschrieben wird, herleiten, wobei absolut sicheres Fahren dadurch charakterisiert ist, daß auch bei einem plötzlichen Halt des vorausfahrenden Fahrzeugs (z. B. Aufprall auf ein stehendes Hindernis) das nachfolgende Fahrzeug gerade noch rechtzeitig zum Stehen kommt:

- 1)  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 1/e = 0,368$
- 2) Minimaler Ausgangsabstand bei  $v_0$ :  $\Delta x_{0\min} = \frac{v_0}{\lambda_{0,0}} = \frac{v_0 \cdot \tau}{0,368}$
- 3)  $b_{\min} = v_0 \cdot \lambda_{0,0}$  ( $b_{\min}$  = maximal mögliche Verzögerung der Fahrzeuge, Gl. (2.14); wenn  $b_{\min}$  eine Erträglichkeitsgrenze angibt, läßt sich hieraus die maximale Geschwindigkeit eines Systems von Fahrzeugen errechnen, das sich nach Gl. (2.1) richtet)

Fordert man kein absolut sicheres Fahren, sondern nur Schutz vor dem Auffahren auf ein plötzlich bremsendes Fahrzeug (= relativ sicheres Fahren), müssen folgende Kriterien erfüllt sein, wenn angenommen wird, daß alle Fahrzeuge die gleichen Brems Eigenschaften aufweisen:

- 1)  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = 0,5$
- 2) Minimalabstand bei  $v_0$ :  $\Delta x_{0\min} = \frac{v_0}{\lambda_{0,0}} = \frac{v_0 \cdot \tau}{0,5}$

### 3. Die Fahrzeugfolgegleichung für beliebige l-m-Kombinationen

Im Unterschied zu der im vorherigen Kapitel diskutierten Gleichung ist in der nun zu untersuchenden Fahrzeugfolgegleichung

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{l,m} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)]^l} [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)] \quad (1.1)$$

die Beschleunigung nicht nur von der Relativgeschwindigkeit, sondern auch je nach dem Wert von l und m entweder vom Abstand zwischen zwei Fahrzeugen n und n+1 und von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs n+1 oder nur von einer der beiden Größen abhängig.

#### 3.1 Berechnungsmethode

Zur Berechnung von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Position der Folgefahrzeuge bei einer vorgegebenen Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs wird das in Absch. I.2.1 verwendete Programm als Grundlage herangezogen. Allerdings muß zusätzlich zu Geschwindigkeit und Beschleunigung auch noch die Position eines jeden Fahrzeugs mitberücksichtigt werden, damit die Abstände errechnet werden können.

Für eine Bewegung mit innerhalb eines Zeitintervalls  $(t_i, t_{i+1}) = A$  konstanter Beschleunigung gilt für den zurückgelegten Weg

$$x(t_{i+1}) = 0,5 A^2 \ddot{x}(t_i) + A\dot{x}(t_i) + x(t_i) \quad (3.1)$$

Das grobe Strukturdiagramm hat damit die in Abb. 13 aufgezeichnete Form.

Erläuterungen zu Abb. 13:

Es werden hier nur die zusätzlichen Erläuterungen, die nicht schon bei Abb. 1 angegeben sind, hinzugefügt.

- (1) Berechnung der Störfunktion
- (2) a) Für die Folgefahrzeuge werden die Anfangswerte für  $t = 0$  berechnet.

Dabei ergibt sich die Anfangsposition aus dem Anfangsabstand  $\Delta x_0$  (=  $X_0$  im Programm), multipliziert mit der Differenz aus der

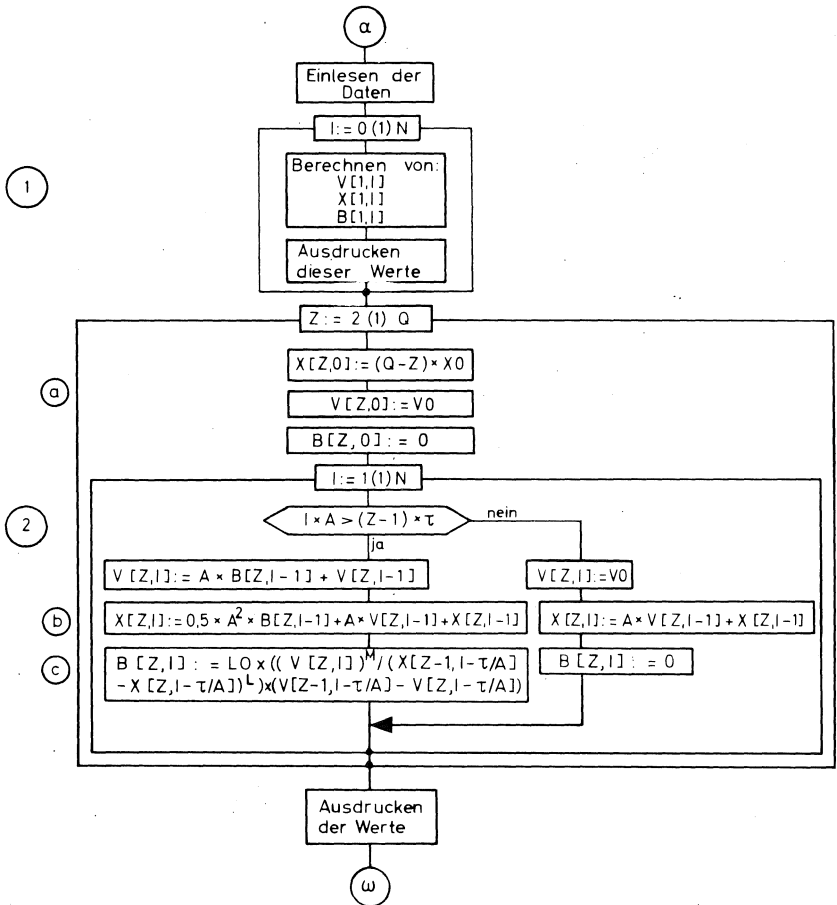


Abb. 13

Gesamtzahl aller Fahrzeuge zu der Nummer des betrachteten Fahrzeugs, so daß das letzte Fahrzeug einer Kolonne die Anfangsposition  $x(t_0) = 0$  hat.

- b) Nach Gl. (3.1) werden die Positionen der Fahrzeuge für  $t > t_0$  berechnet.
- c) Nach Gl. (1.1) werden die Beschleunigungen bestimmt (LO entspricht  $\lambda_{1,m}$ ).

Auch in diesen Programmen (s. Anhang 3) wurde  $A = 0,02$  [sec] gesetzt.

### 3.2 Stabilitätsbetrachtungen

#### 3.2.1 Grundlagen

Aus bisherigen Veröffentlichungen, die sich mit Stabilitätsuntersuchungen von Gl. (1.1) befassen (5, 11, 16, 18, 19), geht hervor, daß für diese Gleichung auf analytischem Wege keine Stabilitätskriterien ermittelt werden können.

Deshalb wird in den folgenden Abschnitten ein Verfahren gezeigt, das zwar nur spezielle, für den Zweck dieser Untersuchungen aber geeignete Stabilitätskriterien liefert. Diese Methode baut auf den Ergebnissen der Stabilitätsuntersuchung der Fahrzeugfolgegleichung mit  $l = m = 0$  auf (Kap. I.2).

Aus den dort gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich als Entscheidungshilfen für die Ermittlung der Stabilitätskriterien die folgenden Definitionen:

Unter Einzelstabilität wird - wie schon erwähnt - nur noch der nicht-oszillatorische Fall dieser Art der Stabilität verstanden (also kein Überspringen bei einer Sprungfunktion als Störfunktion des Führungsfahrzeugs), während der zwar abklingende, aber oszillatorische Fall ausgeschlossen wird, weil dabei für den Bereich, der oberhalb der Grenzen für Kolonnenstabilität liegt, immer ein instabiles Fahrverhalten der Kolonne die Folge ist.

Bei Kolonnenstabilität nehmen die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge, die durch eine sinusförmige Störfunktion hervorgerufen werden, von Fahrzeug zu Fahrzeug ab. Den Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität erhält man gerade dann, wenn die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge gerade die gleiche Größe wie die Amplitude des Führungsfahrzeugs erreichen.

Bevor die Stabilitätskriterien formuliert werden, müssen zunächst diejenigen Parameter bestimmt werden, die die Schwingungen beeinflussen. Bei der in Kap. I.2 untersuchten Fahrzeugfolgegleichung waren nur der Proportionalitätsfaktor  $\lambda_{0,0}$  und die Reaktionszeit  $\tau$  zu berücksichtigen. Außer diesen Parametern beeinflussen aber nun auch der Ausgangsabstand  $\Delta x_0$  und die Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  einer Kolonne das Stabilitätsverhalten, allerdings in Abhängigkeit von  $l$  und  $m$ :

Für  $l = 1, m = 0$  hat nur  $\Delta x_0$  Einfluß

für  $l \neq 0, m \neq 0$  haben  $\Delta x_0$  und  $v_0$  Einfluß.

Es zeigte sich jedoch, daß (im Gegensatz zu einer von FOX, LEHMANN (19) angegebenen Abschätzung eines Stabilitätskriteriums) nicht nur diese Größen herangezogen werden dürfen. Bei Berücksichtigung nur dieser Parameter können zwar Stabilitätskriterien aufgestellt werden, die aber abhängig von der Art der Störfunktion sind.

Um unabhängig von der Art der Störfunktion zu einer Abschätzung der Stabilitätsbedingungen zu gelangen, ist es notwendig, den Quotienten

$$\lambda_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{l,m} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^l} \quad (3.2)$$

genauer zu untersuchen, zunächst für die Kombination  $l = 1$  und  $m = 0$ :

Während eines Verzögerungsvorgangs werden die Abstände zwischen den Fahrzeugen geringer; d.h.  $\lambda_{n+1}(t)$  wächst an. Der größte nach einem Verzögerungsvorgang auftretende Wert von  $\lambda_{n+1}(t)$  ist der ungünstigste Wert, der sich für den hier untersuchten Fall zu

$$\lambda_{n+1}(t_i) = \lambda_{\max}^{(n+1)} = \frac{\lambda_{l,0}}{\Delta x_{\min}^{(n+1)}} \quad (3.3)$$

errechnet, wobei  $\Delta x_{\min}^{(n+1)}$  den dabei auftretenden Minimalabstand zwischen den Fahrzeugen  $n$  und  $n+1$  zum Zeitpunkt  $t_i - \tau$  bezeichnet. Nimmt man vereinfacht an,  $\lambda_{\max}^{(n+1)}$  sei für den gesamten Verzögerungsvorgang maßgebend, so lassen sich für die nichtlineare Fahrzeugfolgegleichung

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{l,0}}{x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)} [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)] \quad (3.4)$$

die Stabilitätskriterien auf die gleiche Art errechnen wie für die einfache Fahrzeugfolgegleichung (Absch.I2.2).

Für beliebige  $l$ - $m$ -Kombinationen mit  $l \neq 0$  und  $m \neq 0$  wird  $\lambda_{n+1}(t)$  zusätzlich von  $\dot{x}_{n+1}(t)$  beeinflusst. Es wird auch hier zunächst davon ausgegangen, daß

sich der ungünstigste Wert für  $\lambda_{n+1}(t)$  dann ergibt, wenn zwischen zwei Fahrzeugen n und n+1 gerade der Minimalabstand  $\Delta x_{\min}$  auftritt.

Es läßt sich nun nachweisen: Tritt der Minimalabstand zum Zeitpunkt  $t_i - \tau$  auf ( $\Delta x_{n+1}(t_i - \tau) = \Delta x_{\min}^{(n+1)}$ ), erreicht die Geschwindigkeit gerade zum Zeitpunkt  $t_i$  ein Minimum, d.h.:

$$\dot{x}_{n+1}(t_i) = v_{\min}^{(n+1)} .$$

Da nämlich bei Erreichen von  $v_{\min}^{(n+1)}$  die Beschleunigung  $\ddot{x}_{n+1}(t_i)$  zu null wird

$$\text{(aus } \ddot{x}_{n+1}(t_i) = 0 \text{ folgt } \dot{x}_{n+1}(t_i) = v_{\min}^{(n+1)}) \quad (3.5)$$

ist die Fahrzeugfolgleichung

$$\dot{x}_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{1,m} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^1} [x_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)]$$

nur erfüllt, wenn die rechte Seite der Gleichung ebenfalls zu null wird.

Berücksichtigt man nicht die Fälle  $\dot{x}(t) = 0$  (stehende Kolonne) und  $\Delta x(t-\tau) = 0$  (Unfall)<sup>+) , muß sonst immer gelten</sup>

$$\dot{x}_n(t_i - \tau) - \dot{x}_{n+1}(t_i - \tau) = 0 \quad (3.6)$$

Weil eine Funktion an der Stelle  $t_i$  einen Extremwert aufweist, wenn die Ableitung dieser Funktion für  $t_i$  zu null wird, gilt dann auch

$$x_n(t_i - \tau) - x_{n+1}(t_i - \tau) = \Delta x_{\min}^{(n+1)} \quad (3.7)$$

Wenn also in Gl. (3.3) für den Abstand die Größe  $\Delta x_{\min}^{(n+1)}$  eingesetzt wird, muß für die Geschwindigkeit  $v_{\min}^{(n+1)}$  eingesetzt werden:

$$\lambda_{n+1}(t_i) = \frac{\lambda_{1,m} [\dot{x}_{n+1}(t_i)]^m}{[\Delta x_{n+1}(t_i - \tau)]^1} = \frac{\lambda_{1,m} [v_{\min}^{(n+1)}]^m}{[\Delta x_{\min}^{(n+1)}]^1} \quad (3.8)$$

Erst mit diesem Nachweis, daß zu  $\Delta x_{n+1}(t_i - \tau) = \Delta x_{\min}^{(n+1)}$  die Geschwindigkeit  $\dot{x}_{n+1}(t_i) = v_{\min}^{(n+1)}$  gehört, kann die bisher noch nicht bewiesene Behauptung

+) Hier wie auch im folgenden werden die Fahrzeuge punktförmig angenommen. Im zweiten Teil dieser Arbeit werden dagegen endliche Fahrzeuglängen verwendet.

tung nachgeprüft werden, ob  $\lambda_{n+1}(t)$  in Gl. (3.3) bei Erreichen des Mindestabstands den größten und damit ungünstigsten Wert annimmt (d.h.: ein Maximum erreicht):

Dazu wird die Funktion

$$\lambda_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{1,m} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^1}$$

nach der Zeit differenziert:

$$\frac{1}{\lambda_{1,m}} \cdot \frac{d\lambda}{dt} = \frac{[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^{1 \cdot m} \cdot [\dot{x}_{n+1}(t)]^{m-1} \cdot \ddot{x}_{n+1}(t)}{([x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^1)^2} - \frac{[\dot{x}_{n+1}(t)]^m \cdot 1 \cdot [x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^{1-1} [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)]}{([x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^1)^2}$$

Setzt man die rechte Seite der Gleichung zu null und dividiert sie durch  $[\dot{x}_{n+1}(t)]^{m-1}$  und  $[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)]^{1-1}$ , ergibt sich

$$[x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau)] \cdot m \cdot \ddot{x}_{n+1}(t) = \dot{x}_{n+1}(t) \cdot 1 \cdot [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)] \quad (3.9)$$

Wenn  $\lambda_{n+1}(t)$  zum Zeitpunkt  $t_i$  ein Maximum haben soll, müssen in Gl. (3.9) für  $t = t_i$  die linke und rechte Seite identisch sein.

Werden die folgenden Beziehungen

$$x_n(t_i - \tau) - x_{n+1}(t_i - \tau) = \Delta x_{\min}^{(n+1)} \quad (\text{vgl. Gl. (3.7)})$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{n+1}(t_i) &= v_{\min}^{(n+1)} \\ \ddot{x}_{n+1}(t_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{vgl. Gl. (3.5)})$$

$$\dot{x}_n(t_i - \tau) - \dot{x}_{n+1}(t_i - \tau) = 0 \quad (\text{vgl. Gl. (3.6)})$$

in Gl. (3.9) eingesetzt, so wird daraus

$$\Delta x_{\min}^{(n+1)} \cdot m \cdot 0 = v_{\min}^{(n+1)} \cdot 1 \cdot 0$$



Gl. (3.8) gibt also den ungünstigsten Wert an, da der Nachweis gezeigt hat, daß  $\lambda_{n+1}(t_i)$  ein Maximum der Funktion  $\lambda_{n+1}(t)$  ist. Es gilt somit

$$\lambda_{n+1}(t_i) = \lambda_{\max}^{(n+1)} \quad (3.10)$$

Ob  $\lambda_{\max}^{(n+1)}$  allerdings das größte auftretende Maximum ist, sofern die Funktion mehrere Extremwerte besitzt, ist damit nicht gesichert. Dieser Nachweis könnte nur bei Kenntnis der Bewegungsgleichungen der betrachteten Fahrzeuge durchgeführt werden.

Durch Einführung von  $\lambda_{\max}^{(n+1)}$  ist es nun möglich, die Hypothese nachzuprüfen, ob ganz allgemein für alle l-m-Kombinationen die folgenden Stabilitätskriterien gelten:

für Einzelstabilität:  $\lambda_{\max} \cdot \tau \leq 0,368$

für Kolonnenstabilität:  $\lambda_{\max} \cdot \tau \leq 0,500 \quad +)$

(vgl. Absch. I.2.3).

### 3.2.2 Algol-Programm

Um die im vorigen Abschnitt aufgestellte Hypothese zu bestätigen oder zu verwerfen, wurde ein Algol-Programm erstellt. Allerdings genügt es, mit diesem Programm nur die für Kolonnenstabilität formulierte Bedingung nachzuprüfen, da diese sich von der Einzelstabilität nur durch eine weniger starke Dämpfung unterscheidet. ++)

---

+) Da diese Ungleichungen für alle Fahrzeuge einer Kolonne gelten müssen, kann auf den Index (n+1) verzichtet werden.

++) Um zu zeigen, daß es nicht notwendig ist, auch die Hypothese für Einzelstabilität nachzuprüfen, muß auf Absch. I.3.3 verwiesen werden. Gibt man nämlich als Störfunktion für das Führungsfahrzeug eine Sprungfunktion und die Daten  $v_e$ ,  $\Delta x_e$ ,  $\lambda_{l,m}$ , l und m vor, so kann mit Gl. (3.16)  $\Delta x_e = \Delta x_{\min}$  berechnet werden. Wird in Gl. (3.14)  $\Delta x_{\min}$  eingesetzt, erhält man mit  $a = 0,368$  die Reaktionszeit  $\tau$ . Mit den gegebenen Daten können die Geschwindigkeitsganglinien der Folgefahrzeuge errechnet werden, deren Amplituden nicht über die Amplitude des Führungsfahrzeugs anwachsen (vgl. Abb. 7). Wählt man dagegen bei sonst gleichen Daten einen größeren Wert für  $\tau$ , schwingen die Geschwindigkeitsganglinien über (vgl. Abb. 8).

Das Programm beruht auf folgenden Annahmen:

Alle Fahrzeuge einer Kolonne fahren mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  und gleichem Ausgangsabstand  $\Delta x_0$ , bis durch das Führungsfahrzeug eine periodische Störung in das System eingeführt wird. Diese Störung ruft Schwingungen in den kinematischen Größen hervor, die entweder mit der Zeit aufschaukeln oder abklingen. Aufschaukeln bedeutet eine Vergrößerung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsamplitude von Fahrzeug zu Fahrzeug. Durch das Rechenprogramm werden nun solche Parameterkombinationen gesucht, bei denen weder ein Überspringen noch ein Abklingen der Geschwindigkeitsamplituden auftritt. Diese Kombinationen stellen nach Definition den Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität dar. Wenn die im vorigen Abschnitt aufgestellte Hypothese richtig ist, muß für solche Kombinationen gelten:

$$\frac{\lambda_{1,m} [v_{\min}^{(n+1)}]^m}{[\Delta x_{\min}^{(n+1)}]^l} \cdot \tau = 0,5 \quad (3.11)$$

Dazu müssen auf der Grundlage des in Absch. I.3.1 erläuterten Programms für jede betrachtete Parameterkombination von  $\tau$ ,  $\lambda_{1,m}$ ,  $l$  und  $m$ , außerdem für verschiedene Ausgangszustände und unterschiedliche Störfunktionen die Minimalgeschwindigkeiten und Minimalabstände aller Fahrzeuge ermittelt und in Gl. (3.11) eingesetzt werden.

Das grobe Strukturdiagramm hat die in Abb. 14 aufgezeichnete Form.

Erläuterungen zu Abb. 14:

- (1) Berechnung der Störfunktion
- (2) a) Anfangswerte für  $\lambda_{1,m}$  und  $\tau$  werden vereinbart. Im Programm selbst ist die Reaktionszeit mit dem Symbol DELTA bezeichnet.  
b)  $\left\{ \right.$   
c) siehe Erläuterungen zu Abb. 13  
d)  $\left. \right\}$   
e) Die Maximalverzögerung  $b_{\min}$  der Folgefahrzeuge wird errechnet. Der Vergleich wird erst ab dem Zeitpunkt durchgeführt (also ab  $t = (Z-1) \tau / A$ ) an dem die Folgefahrzeuge zu reagieren beginnen.

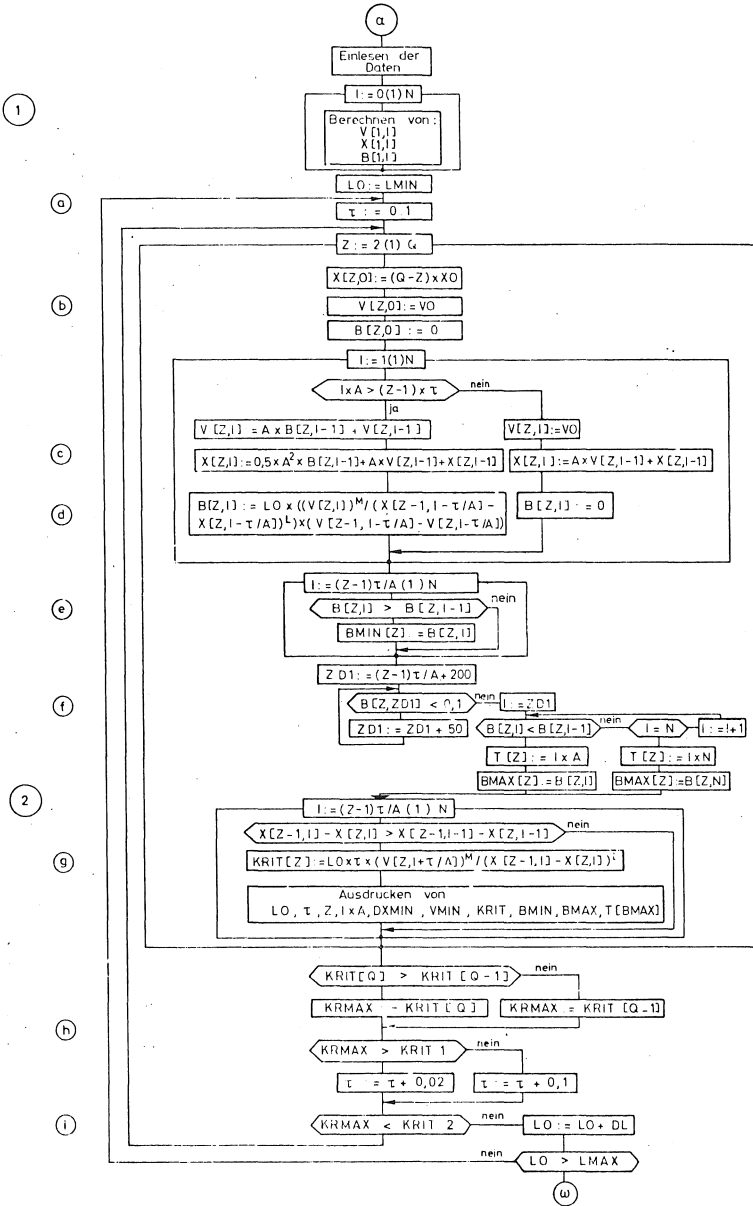


Abb 14

- f) Die Maximalbeschleunigung  $b_{\max}$  der Folgefahrzeuge wird errechnet, und außerdem der Zeitpunkt  $T^{\max}[Z]$ , an dem dieser Wert auftritt. Dieser Vergleich wird erst ab dem Zeitpunkt durchgeführt, an dem die Beschleunigung wieder einen positiven Wert erreicht hat. Tritt während der betrachteten Zeit kein Maximum auf, wird der Randwert  $B[Z, N]$  errechnet.
- g) Der während des Störvorganges auftretende Minimalabstand  $\Delta x_{\min}$  zwischen jeweils zwei Fahrzeugen  $n$  und  $n+1$  wird errechnet, außerdem kann damit nach den Gln. (3.6) und (3.7) auch die Minimalgeschwindigkeit  $v_{\min}^{(n+1)}$  ermittelt werden. Mit diesen Größen wird  $\lambda_{\max}^{(n+1)}$  (= KRIT  $[Z]$ ) berechnet. Alle Größen werden ausgedrückt.
- h) Wenn  $\lambda_{\max}^{(n+1)}$  nicht für alle Folgefahrzeuge gleich ist, wird der größte Wert (= KRMAX) herangezogen, um abzufragen, ob dieser Wert größer als eine untere Schwelle (= KRIT 1) ist. KRIT 1 liegt unterhalb des Grenzwertes für Kolonnenstabilität, ist also kleiner als 0,5. Ist KRMAX größer als diese Schwelle, wird  $\tau$  nur um 0,02 [sec] vergrößert, um die Rechengenauigkeit zu erhöhen, liegt KRMAX darunter, wird  $\tau$  um 0,1 [sec] erhöht, damit Rechenzeit gespart wird.
- i) Ist KRMAX kleiner als KRIT 2 (KRIT  $2 > 0,5$ ), dann wird der gesamte Rechenvorgang mit dem unter h) ermittelten neuen  $\tau$ , aber mit noch gleichem  $\lambda_{1,m}$ , wiederholt; ist KRIT 2 überschritten, wird  $\lambda_{1,m}$  um einen Betrag (= DL) erhöht. Überschreitet dieser neue  $\lambda_{1,m}$ -Wert den festgesetzten Maximalwert (= LMAX), ist der Rechenvorgang beendet, im anderen Fall wird mit dem neuen  $\lambda_{1,m}$ -Wert und dem Anfangswert von  $\tau$  wieder bei b) begonnen.

Im Anhang 4 ist das dazugehörige Algol-Programm wiedergegeben.

### 3.2.3 Auswertung der Programmläufe

Getestet wurde das Rechenprogramm an der Fahrzeugfolgegleichung mit  $l = m = 0$ , für die das Stabilitätskriterium bekannt und in Abb. 5 als entsprechende  $\lambda_{0,0}$ - $\tau$ -Grenzkurve aufgezeichnet ist.

Der Verlauf der Kurve in Abb. 5 stimmt mit den Werten überein, die durch das im vorigen Abschnitt erläuterte Programm errechnet wurden (vgl. Abb. 17a).

Wie die Hypothese für andere Exponenten nachgeprüft wurde, sei an einem Beispiel erläutert:

Mit den Exponenten  $l = 1$  und  $m = 1$ , der Störfunktion  $\dot{x}_1(t) = (20 - 2.5) + 2.5 \cos 0,4t$ , bei der also die Geschwindigkeit periodisch von  $v_0 = 20$  [m/sec] auf  $v_{\min} = 15$  [m/sec] abnimmt und wieder auf  $v_0 = 20$  [m/sec] ansteigt, und einem Ausgangsabstand von  $\Delta x_0 = 20$  [m] wurden für verschiedene  $\lambda_{1,1}$ -Werte diejenigen  $\tau$ -Werte errechnet, für die das Produkt  $\lambda_{\max} \cdot \tau = 0,5$  ist.

Ist die Hypothese richtig, müssen im Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität die Minimalgeschwindigkeiten der Folgefahrzeuge  $v_{\min}$  bei einer solchen Parameterkombination mit  $\lambda_{\max} \cdot \tau = 0,5$  gerade gleich der Minimalgeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs (15 [m/sec]) sein. Entsprechend müssen auch die Minimalabstände aller Folgefahrzeuge für jeweils eine solche Parameterkombination gleichgroß sein (sie dürfen also nicht überschwingen).

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Daten dieses Programmlaufs für zwei Folgefahrzeuge angegeben (das vollständige Ausdruckformular ist in Arhang 5 beigefügt).

$\lambda_{1,1}$	$\tau$ [sec]	FhzNr	$\Delta x_{\min}$ [m]	$v_{\min}$ [m/sec]	$\lambda_{\max} \cdot \tau$
0.40	0.80	2	9.80	15.03	0.491
0.40	0.80	3	9.90	15.09	0.488
0.40	0.82	2	9.78	15.02	0.504
0.40	0.82	3	9.84	15.06	0.502
0.60	0.68	2	12.39	15.01	0.494
0.60	0.68	3	12.40	15.01	0.494
0.60	0.70	2	12.38	14.99	0.509
0.60	0.70	3	12.37	14.99	0.509
0.80	0.58	2	13.96	15.00	0.499
0.80	0.58	3	13.96	15.00	0.499
1.00	0.50	2	15.00	15.00	0.500
1.00	0.50	3	15.00	14.99	0.500
1.20	0.44	2	15.74	15.00	0.503
1.20	0.44	3	15.73	14.99	0.503
1.40	0.38	2	16.30	15.00	0.490
1.40	0.38	3	16.29	15.00	0.490
1.40	0.40	2	16.28	14.99	0.516
1.40	0.40	3	16.27	14.98	0.515

Man erkennt an dieser Tabelle, daß die genannten Bedingungen für die  $\lambda_{1,1}$ - $\tau$ -Kombinationen mit  $\lambda_{\max} \cdot \tau = 0,5$  (die entweder direkt aus der Tabelle entnommen werden können oder durch Interpolation zwischen benachbarten  $\tau$ -Werten ermittelt wurden) erfüllt sind; also ist die Hypothese für dieses Beispiel nicht zu verwerfen.

In Abb. 15a sind die  $\tau$ -Werte, für die  $\lambda_{\max} \cdot \tau = 0,5$  ist, als Funktion von  $\lambda_{1,1}$  aufgetragen. Diese Kurve gibt also die Grenze zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität an. In Abb. 15b sind mit einem beliebigen  $\lambda_{1,1}$ - $\tau$ -Wertepaar der Grenzkurve ( $\lambda_{1,1} = 1,0$  [-],  $\tau = 0,5$  [sec]) die Geschwindigkeitsganglinien zweier Folgefahrzeuge errechnet worden. Man erkennt, daß gerade der Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität vorliegt.

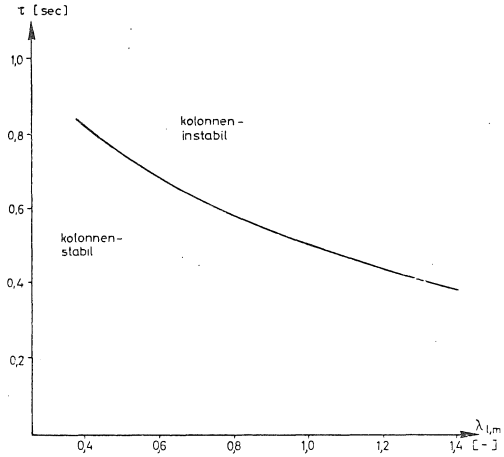


Abb. 15a

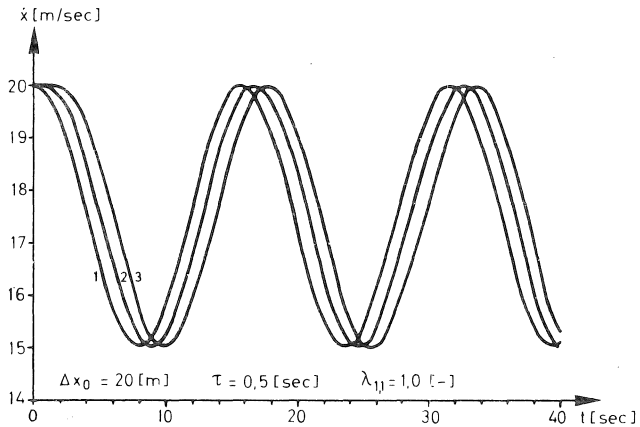


Abb 15 b

Insgesamt lassen sich aus allen Ausdrücken mit verschiedenen 1-m-Kombinationen, unterschiedlichen Störfunktionen (wobei auch hier der in Abb. 6 aufgezeichnete Bereich möglicher Amplituden und Frequenzen betrachtet wurde) und unterschiedlichen Werten von  $v_0$  und  $\Delta x_0$  folgende Ergebnisse ableiten:

1. Ist  $\lambda_{\max} \tau = 0,500$ , entspricht das gerade dem Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität.
2. Ist  $\lambda_{\max} \tau < 0,500$ , nehmen die Amplituden der Geschwindigkeitsganglinien von Fahrzeug zu Fahrzeug ab.
3. Bei sehr kleinen Werten von  $\lambda_{1,m}$  tritt häufig der Fall auf, daß es kein  $\tau$  gibt, bei dem für alle Folgefahrzeuge das Produkt  $\lambda_{\max} \cdot \tau$  den Wert 0,5 annimmt, weshalb die Stabilitätsgrenzkurven auch nicht für solche kleinen  $\lambda_{1,m}$ -Werte aufgezeichnet wurden. Bei der Kalibrierung der Fahrzeugfolgegleichung in Absch. I.3.4 wird aber gezeigt, daß solche Werte auch gar nicht auftreten.

Diese Ergebnisse zeigen (zumindest für alle nachgeprüften Fälle), daß die in Absch. I.3.2.1 aufgestellte Hypothese richtig ist.

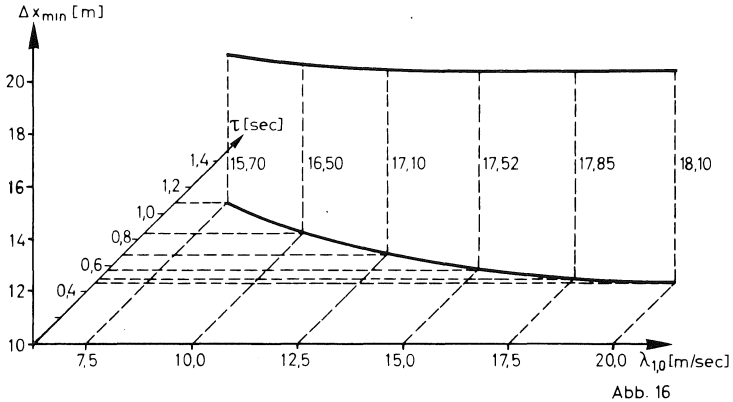
Für den Grenzfall zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität gilt also bei einer Kolonne von  $q$  Fahrzeugen unabhängig von  $l$ ,  $m$ ,  $\tau$ , und  $\lambda_{1,m}$

$$v_{\min}^{(1)} = v_{\min}^{(2)} = \dots = v_{\min}^{(q)},$$

wie vorausgesetzt, während im stabilen Fall  $v_{\min}$  von Fahrzeug zu Fahrzeug wieder zunimmt (die Amplituden also kleiner werden) und im instabilen Fall abnimmt (die Amplituden also größer werden).

Dagegen ist der auftretende Minimalabstand zwar im Grenzfall für jeweils eine  $\lambda_{1,m} - \tau$  - Kombination zwischen allen Fahrzeugen gleichgroß, aber abhängig von  $\lambda_{1,m}$  und  $\tau$ , wie aus Abb. 16 hervorgeht, in der für die Störfunktion  $\dot{x}_1(t) = 19 + \cos 0.7 t$  mit  $l = 1$ ,  $m = 0$  und  $\Delta x_0 = 20$  [m] die Grenzkurve aufgezeichnet ist.

Bei kleinen Werten von  $\lambda_{1,m}$  und damit wegen der Form der Grenzkurve bei grossen Reaktionszeiten  $\tau$  ist also der während der Störung auftretende Minimal-



abstand klein. Er wächst (die gleiche Störfunktion und den gleichen Ausgangszustand ( $v_0$ ,  $\Delta x_0$ ) vorausgesetzt) mit größer werdendem  $\lambda_{1,m}$  an, wobei die Zuwächse aber immer geringer werden.

### 3.2.4 Der Einfluß der einzelnen Größen auf das Stabilitätsverhalten

In Absch. I.3.2.1 wurden diejenigen Größen aufgeführt, die das Stabilitätsverhalten beeinflussen können. Dieser Einfluß wird im folgenden untersucht.

Obwohl die Parameter  $v_0$  und  $\Delta x_0$  nicht explizit in Gl. (3.11) enthalten sind, spielen sie dennoch für die Stabilität eine wichtige Rolle, weil die in dieser Gleichung auftretenden Größen  $\Delta x_{\min}^{(n+1)}$  und  $v_{\min}^{(n+1)}$  vom Ausgangsabstand  $\Delta x_0$  und von der Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  abhängen.

In den Abb. 17a und b sind die Auswirkungen von Veränderungen der untersuchten Parameter aufgezeichnet.

Abb. 17a zeigt den Einfluß, der durch Variation von  $\Delta x_0$  und  $v_0$  entsteht, wenn  $l$  und  $m$  konstant gehalten werden. (In der Abbildung ist  $l = 1$ ,  $m = 1$ ). Ein großer Ausgangsabstand  $\Delta x_0$  bewirkt also einen größeren stabilen Bereich, während eine große Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  diesen Bereich einschränkt.



Abb. 17b veranschaulicht den Einfluß auf die Stabilität, der durch Variation von  $l$  und  $m$  entsteht, wenn  $\Delta x_0$  und  $v_0$  konstant sind. (In der Abbildung ist  $v_0 = 10$  [m/sec],  $\Delta x_0 = 15$  [m]). Da sich die Werte von  $\lambda_{1,m}$  für jede  $l$ - $m$ -Kombination voneinander unterscheiden ( $\lambda_{1,m}$  hat allgemein die Dimension  $\frac{(\text{Zeiteinheit})^{m-1}}{(\text{Wegeinheit})^{m-1}}$ , also  $\left[ \frac{(\text{sec})^{m-1}}{(\text{m})^{m-1}} \right]$ ), muß bei der Untersuchung des Kurvenverlaufs verschiedener  $l$ - $m$ -Kombinationen eine Vergleichsbasis der  $\lambda_{1,m}$ -Werte hergestellt werden, damit die in Abb. 17b aufgezeichneten Kurven in jeweils vergleichbaren  $\lambda_{1,m}$ -Bereichen liegen. Diese Basis erhält man, wenn der Ausgangszustand einer Fahrzeugkolonne vor Beginn einer Störung für alle betrachteten  $l$ - $m$ -Kombinationen gleich ist. Dafür werden die folgenden Vereinbarungen getroffen:

$$\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau) = v_0 - v_0 = 0$$

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = 0$$

$$x_n(t-\tau) - x_{n+1}(t-\tau) = \Delta x_0$$

$$\frac{\lambda_{1,m} v_0^m}{\Delta x_0^1} = \lambda_0(l,m)$$

$\lambda_0(l,m)$  wird nun so gewählt, daß gilt

$$\lambda_0(l,m) = \lambda_0 = \text{const.}$$

Über

$$\lambda_{1,m} = \frac{\lambda_0 \Delta x_0^1}{v_0^m}$$

lassen sich für beliebige, aber für alle  $l$ - $m$ -Kombinationen gleiche Zahlenwerte von  $\lambda_0$  die dazugehörigen  $\lambda_{1,m}$  errechnen.

Gewählt wird z. B.	$\lambda_0$	=	0.3	0.6	0.9	1.2
Dann wird für						
$l = 0, m = 0$	$\lambda_{0,0}$	=	0.3	0.6	0.9	1.2
für						
$l = 1, m = 0$ (mit $\Delta x_0 = 15$ [m])	$\lambda_{1,0}$	=	4.5	9	13.5	18

für

$$l = 1, m = 1$$

(mit  $\Delta x_o = 15 [m]$   
 $v_o = 10 [m/sec]$ )

$$\lambda_{1,1} = 0.45 \quad 0.9 \quad 1.35 \quad 1.8$$

für

$$l = 1, m = 2$$

( mit  $\Delta x_o = 15 [m]$   
 $v_o = 10 [m/sec]$  )

$$\lambda_{1,2} = 0.045 \quad 0.09 \quad 0.135 \quad 0.18$$

für

$$l = 2, m = 0$$

(mit  $\Delta x_o = 15 [m]$ )

$$\lambda_{2,0} = 67.5 \quad 135 \quad 202.5 \quad 270$$

### 3.3 Abstandskriterien

In Absch. I.2.4 wurden Kriterien aufgestellt, deren Einhaltung die Sicherheit eines Folgevorgangs nach Gl. (2.1) je nach den gestellten Ansprüchen an die Sicherheit gewährleistet. Auch für andere l-m-Kombinationen können solche Kriterien für absolut bzw. relativ sicheres Fahren aufgestellt werden. Dazu müssen Formeln für den notwendigen minimalen Ausgangsabstand  $\Delta x_o \min$  und bei absolut sicherem Fahren zusätzlich die maximale Verzögerung  $b_{\min}$ , die bei einem Aufprall des Führungsfahrzeugs auf ein stehendes Hindernis für das Folgefahrzeug auftritt, hergeleitet werden.

Grundlage zur Berechnung des minimalen Ausgangsabstandes ist die Beziehung

$$\lambda_{\max} \cdot \tau \leq a \quad (a = 0,5 \text{ für Kolonnenstabilität}$$

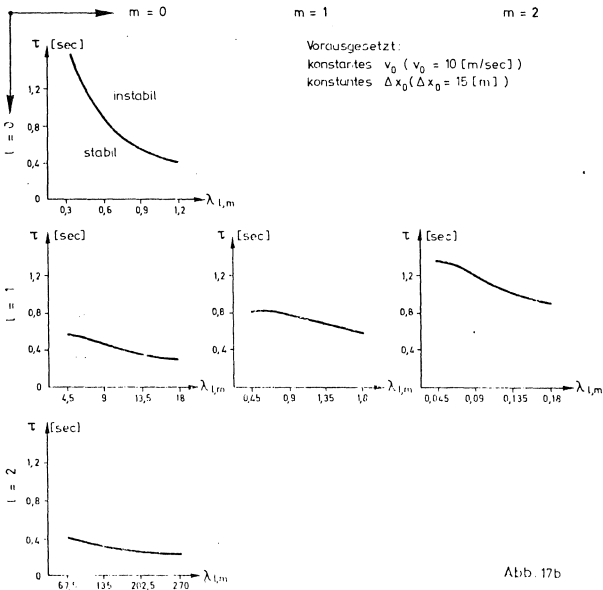
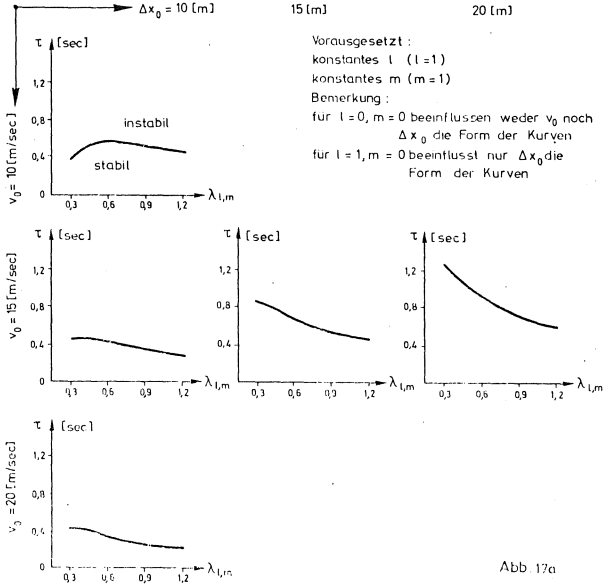
$$a = 0,368 \text{ für Einzelstabilität})$$

mit

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda_{l,m} \left[ \frac{v_{\min}^{(n+1)}}{(n+1)} \right]^m}{\left[ \Delta x_{\min} \right]}$$

(vgl. Gl. (3.11)). Durch Umformung erhält man daraus

$$\left[ \Delta x_{\min}^{(n+1)} \right] \geq \frac{\lambda_{l,m} \cdot \tau}{a} \left[ v_{\min}^{(n+1)} \right]^m \quad (3.12)$$



Diese Ungleichung kann verallgemeinert werden, weil zu jedem Zeitpunkt während eines Folgevorgangs gelten muß

$$[\Delta x_{n+1}(t-\tau)]^l \geq \frac{\lambda_{1,m} \cdot \tau}{a} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m \quad (3.13)$$

womit gewährleistet ist, daß das Produkt  $\lambda_{n+1}(t) \cdot \tau$  den Grenzwert  $a$  zu keiner Zeit überschreitet, so daß der stabile Bereich nicht verlassen wird. Gl. (3.13) muß also auch dann gelten, wenn eine Kolonne sich noch im Ausgangszustand befindet, d.h. wenn alle Fahrzeuge noch die Geschwindigkeit  $v_0$  und den Abstand  $\Delta x_0$  haben. Für diesen Fall wird Gl. (3.13) zu

$$[\Delta x_0]^l \geq \frac{\lambda_{1,m} \cdot \tau}{a} [v_0]^m$$

Den minimalen Ausgangsabstand erhält man daraus, wenn das Gleichheitszeichen gilt (und die Fahrzeuge punktförmig angenommen werden), zu

$$[\Delta x_{0 \text{ min}}]^l = \frac{\lambda_{1,m} \cdot \tau}{a} [v_0]^m \quad (3.14)$$

Auch hieran erkennt man, daß für Kombinationen mit  $m = 0$  die Geschwindigkeit keine Rolle spielt, um den minimalen Ausgangsabstand zu berechnen und daß für Kombinationen mit  $l = 0$  kein minimaler Ausgangsabstand angegeben werden kann, weil in diesem Fall der Abstand für das Stabilitätsverhalten keine Rolle spielt.

Der in Gl. (3.14) angegebene Abstand gilt entweder für absolut sicheres oder für relativ sicheres Fahren, je nachdem, welcher Wert für  $a$  eingesetzt wird.

Nach HOEFS (20) liefert die Integration der Fahrzeugfolgegleichung

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{\dot{x}_{n+1}(t+\tau)}{[\dot{x}_{n+1}(t+\tau)]^m} dt = \lambda_{1,m} \int_{t_0}^{t_1} \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)}{[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]^l} dt$$

die Lösungen

$$\begin{aligned}
 m = 1: & \ln [\dot{x}_{n+1}(t_1)] - \ln [\dot{x}_{n+1}(t_0)] \\
 m \neq 1: & \frac{1}{1-m} (\dot{x}_{n+1}(t_1))^{1-m} - (\dot{x}_{n+1}(t_0))^{1-m}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} m = 1: \\ m \neq 1: \end{aligned}} \right\} = \begin{cases} \lambda_{1,m} (\ln [\Delta x(t_1)] - \ln [\Delta x(t_0)]) : l = 1 \\ \frac{\lambda_{1,m}}{1-l} ([\Delta x(t_1)]^{1-l} - [\Delta x(t_0)]^{1-l}) : l \neq 1 \end{cases}$$

mit  $\Delta x(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t)$  (3.15) <sup>+</sup>

Mit dem Gleichungssystem (3.15) lassen sich Abstandsänderungen berechnen, die durch eine Bewegungsänderung des Führungsfahrzeugs hervorgerufen werden. Die Zeitpunkte  $t_0$  und  $t_1$  müssen dabei in Bereichen liegen, in denen stationärer Verkehrsfluß herrscht (Abb. 18).

Mit

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{n+1}(t_1) &= v_e & \Delta x(t_1) &= \Delta x_e \\
 \dot{x}_{n+1}(t_0) &= v_o & \Delta x(t_0) &= \Delta x_o
 \end{aligned}$$

werden die Gln. (3.15) zu

$$\begin{aligned}
 m = 1: & \ln v_e - \ln v_o \\
 m \neq 1: & \frac{1}{1-m} (v_e^{1-m} - v_o^{1-m})
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} m = 1: \\ m \neq 1: \end{aligned}} \right\} = \begin{cases} \lambda_{1,m} (\ln \Delta x_e - \ln \Delta x_o) : l = 1 \\ \frac{\lambda_{1,m}}{1-l} (\Delta x_e^{1-l} - \Delta x_o^{1-l}) : l \neq 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Während also Gl. (3.14) eine Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Abstand aufgrund des Stabilitätskriteriums angibt, die aussagt, daß bei einer bestimmten Geschwindigkeit  $v_o$  ein über Gl. (3.14) berechenbarer Abstand  $\Delta x_o$  nicht unterschritten werden darf, wenn der Folgevorgang im stabilen Bereich stattfinden soll, geben die Gl. (3.16) an, wie sich der Abstand bei Bewegungsänderungen verändert, ohne daß hierbei die Stabilität eine Rolle spielt.

+) Gl. (3.15) und auch die folgenden, ähnlich geschriebenen Gleichungen beinhalten vier einzelne Gleichungen.

Prinzip:

$$\begin{aligned}
 m = 1 & : a \\
 m \neq 1 & : b
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} m = 1 \\ m \neq 1 \end{aligned}} \right\} = \begin{cases} c & : l = 1 \\ d & : l \neq 1 \end{cases}$$

Daraus ergeben sich die vier Gleichungen zu

$$\begin{aligned}
 a &= c & \text{für } m = 1, l = 1 \\
 a &= d & \text{für } m = 1, l \neq 1 \\
 b &= c & \text{für } m \neq 1, l = 1 \\
 b &= d & \text{für } m \neq 1, l \neq 1
 \end{aligned}$$

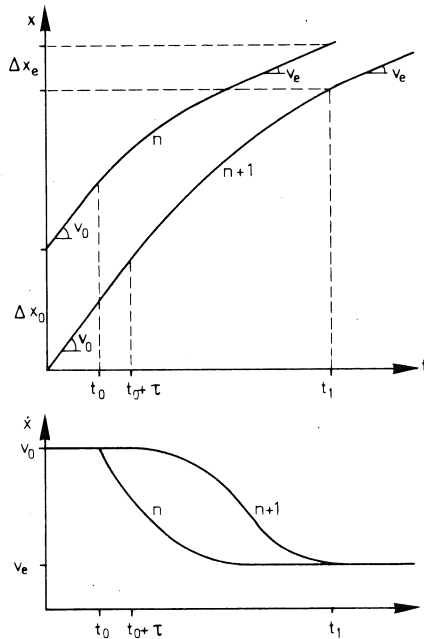


Abb.18

Gibt man sich einen Bewegungsvorgang vor, bei dem von einem Ausgangsabstand  $\Delta x_0$  auf die Endgeschwindigkeit  $v_e = 0$  und den Endabstand  $\Delta x_e = 0$  verzögert wird, so ist die Abstandsänderung  $\Delta(\Delta x_0) = \Delta x_0 - \Delta x_e = \Delta x_0$ .

Für  $m = 0, l = 0$  z. B. errechnet sich dann  $\Delta x_0$  nach Gl. (3.16)

zu

$$-v_0 = \lambda_{0,0} (-\Delta x_0) \quad (3.17)$$

$$\Delta x_0 = \frac{v_0}{\lambda_{0,0}} \quad (\text{vgl. Gl. (2.13)}) \quad (3.18)$$

Setzt man voraus, daß diese Bewegungsänderung im stabilen Bereich stattfindet, muß gelten:

$$\lambda_{0,0} \cdot \tau \leq a \quad (a = 0,368 \text{ bei Einzelstabilität} \\ a = 0,500 \text{ bei Kolonnenstabilität})$$

Setzt man den Grenzfall  $\lambda_{0,0} \cdot \tau = a$  in Gl. (3.18) ein, ergibt sich  $\Delta x_0$  zu

$$\Delta x_0 = \frac{v_0 \cdot \tau}{a} \quad (3.19)$$

Das bedeutet: Bei einer Verzögerung auf  $v_e = 0$  und  $\Delta x_e = 0$  muß der Ausgangs-  
abstand  $\Delta x_0$  mindestens den Wert  $v_0 \cdot \tau/a$  haben, wenn dieser Verzögerungsvor-  
gang sich noch im stabilen Bereich abspielen soll.

Auch für die maximale Verzögerung des Folgefahrzeugs, die dann auftritt, wenn  
das Führungsfahrzeug auf ein stehendes Hindernis prallt, ist es möglich,  
wenn auch nur näherungsweise, ein Kriterium anzugeben. Die Näherung besteht  
darin, daß angenommen wird, die maximale Verzögerung des dem Führungsfahr-  
zeug direkt folgenden Fahrzeugs trete im Intervall  $(t_0 + \tau, t_0 + 2\tau)$  auf  
(Abb. 19).

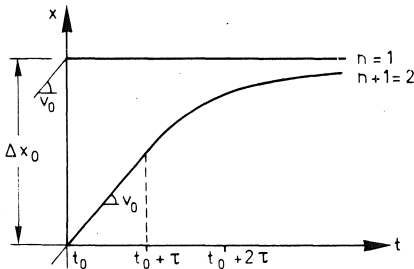


Abb. 19

Für das Führungsfahrzeug gilt

$$\dot{x}_1(t) = \begin{cases} v_0 & \text{für } t < t_0 \\ 0 & \text{für } t \geq t_0 \end{cases} \quad (3.20)$$

und für das Folgefahrzeug

$$\dot{x}_2(t) = v_0 \quad \text{für } t \leq t_0 + \tau \quad (3.21)$$

$$\dot{x}_2(t) = v_0 \cdot t$$

Die Beschleunigung des Folgefahrzeugs im Intervall  $(t_0 + \tau, t_0 + 2\tau)$  errechnet sich über die Fahrzeugfolgegleichung (1.1) zu

$$\ddot{x}_2(t+\tau) = - \frac{\lambda_{1,m} [\dot{x}_2(t+\tau)]^m}{[\Delta x_0 - v_0 t]^1} v_0 \quad (3.22)$$

$$\text{für } t_0 = 0 \leq t \leq t_0 + \tau$$

Da die maximale Verzögerung gesucht ist, muß Gl. (3.22) nach der Zeit differenziert werden:

$$\frac{d\ddot{x}_2(t+\tau)}{dt} = - \lambda_{1,m} v_0 \cdot [m(\Delta x_0 - v_0 t)] \cdot \ddot{x}_2(t+\tau) + 1 \cdot v_0 \cdot \dot{\ddot{x}}_2(t+\tau) \quad (3.23)$$

Nullsetzen von Gl. (3.23) und Substitution von  $t$  durch  $z - \tau$  liefert

$$\frac{\dot{\ddot{x}}_2(z)}{\ddot{x}_2(z)} = \frac{m}{1} z - \frac{m}{1} \tau - \frac{m}{1} \frac{\Delta x_0}{v_0} \quad (3.24)$$

Gl. (3.24) ist eine Differentialgleichung. Deren interessierende Lösung unter Einhaltung der Randbedingungen

$$\dot{x}_2(z = 2\tau) = v_0$$

$$x_2(z = 2\tau) = v_0 \tau$$

und mit  $z = t + \tau$  ist

$$\dot{x}_2(t+\tau) = v_0 \cdot \frac{\left[ t - \frac{\Delta x_0}{v_0} \right]^{\frac{1}{m}}}{\left[ \tau - \frac{\Delta x_0}{v_0} \right]^{\frac{1}{m}}} \quad (3.25)$$

Gl. (3.25) in Gl. (3.22) eingesetzt, ergibt:

$$\ddot{x}_2(t+\tau) = - \frac{\lambda_{1,m} \left[ v_0 \left( \frac{t - \frac{\Delta x_0}{v_0}}{\tau - \frac{\Delta x_0}{v_0}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m}{[\Delta x_0 - v_0 t]^1} \cdot v_0$$



Durch Umformung wird daraus

$$\ddot{x}_2(t+\tau) = b_{\min} = \frac{-\lambda_{1,m} v_0}{(-1)^l v_0^{1-m} \left(\tau - \frac{\Delta x_0}{v_0}\right)^l}$$

(Für  $m = 0, l = 0$  wird  $b_{\min} = -\lambda_{0,0} v_0$ , wie in Absch. I.2.4 schon errechnet wurde). Auch hier kann  $b_{\min}$  als eine Erträglichkeitsgrenze angesehen werden, die dann (durch Auflösung von Gl. (3.26) nach  $v_0$ ) die maximale Geschwindigkeit eines Systems von Fahrzeugen bestimmt.

Damit können die Kriterien zusammengefaßt werden.

Für absolut sicheres Fahren gilt:

$$1. \quad \Delta x_0 \min^l \geq \frac{\lambda_{1,m} \tau}{0,368} \cdot v_0^m$$

$$2. \quad b_{\min} \geq \frac{-\lambda_{1,m} v_0}{(-1)^l v_0^{1-m} \left(\tau - \frac{\Delta x_0}{v_0}\right)^l}$$

Für relativ sicheres Fahren gilt die gleiche Formel wie unter Punkt 1. für absolut sicheres Fahren, mit dem Unterschied, daß für  $a$  der Faktor 0,5 (also der Faktor der Kolonnenstabilität) eingesetzt werden muß. Für  $b_{\min}$  gibt es bei relativ sicherem Fahren keine Grenze.

### 3.4 Kalibrierung der Fahrzeugfolgegleichung

Bei einer großen Zahl von Meßfahrten auf Autobahnen hat HOEFS (20) Folgevorgänge beobachtet und ausgewertet. Für jede Fahrt wurden die Parameter  $\tau, \lambda_{1,m}, l$  und  $m$  der Fahrzeugfolgegleichung so bestimmt, daß die errechneten Werte für die Beschleunigung eines Folgefahrzeugs mit den gemessenen Werten möglichst gut übereinstimmen. Hierbei wurden vier Fälle unterschieden:

- Fall 1: Öffnen, also Vergrößerung des Abstands zwischen zwei Fahrzeugen ( $\Delta \dot{x}(t) \geq 0$ ), wobei die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht aufleuchten;
- Fall 2: Schließen, also Verringerung des Abstands zwischen zwei Fahrzeugen ( $\Delta \dot{x}(t) < 0$ ), wobei die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs ebenfalls nicht aufleuchten;
- Fall 3: Öffnen oder Schließen, also  $\Delta \dot{x}(t) \gtrless 0$ , wobei die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchten;
- Fall 4: Zusammenfassung der Fälle 1 bis 3 und Bildung von gewichteten mittleren Exponenten.

Über das Kriterium, daß die Restabweichung, das ist der nicht durch die Fahrzeugfolgegleichung erklärbarer Anteil der Beschleunigung eines beobachteten Fahrzeugs, zu einem Minimum werden muß, konnte für alle Fahrten und Fälle die Lage eines jeweils optimalen Punktes mit der geringsten Restabweichung gefunden werden. Damit ergab sich für jeden während einer Fahrt aufgetretenen Fall (Öffnen, Schließen, Bremslicht) jeweils eine optimale Wertekombination von  $\tau$ ,  $\lambda_{l,m}$ ,  $l$  und  $m$ . Aus allen so errechneten  $l$ - $m$ -Kombinationen wurden für jeden Fall Mittelwerte für  $l$  und  $m$  ermittelt:

- Fall 1:  $l = 0,5$      $m = 0,2$
- Fall 2:  $l = 1,5$      $m = 0,4$
- Fall 3:  $l = 2,5$      $m = 0,2$
- Fall 4:  $l = 1,1$      $m = 0,4$

Man erkennt, daß die Exponenten von der Art des Folgevorgangs abhängig sind. Ist z. B. die Relativgeschwindigkeit  $\Delta \dot{x}$  positiv, d.h. fährt das Führungsfahrzeug schneller als das Folgefahrzeug, und leuchten keine Bremslichter auf (denn positives  $\Delta \dot{x}$  kann ja auch bedeuten, daß zwar beide Fahrzeuge verzögern, das Führungsfahrzeug aber weniger stark als das Folgefahrzeug, wenn sie zuvor mit z. B. gleicher Geschwindigkeit gefahren sind), dann sind beide Exponenten klein. Während sich allerdings der Exponent  $m$  auch in den anderen Fällen nicht sehr ändert, hängt  $l$  sehr stark von der Art des Folgevorgangs ab. Er wird am größten, wenn die Bremslichter des vorderen Fahrzeug aufleuchten. In diesem Fall wird der Abstand zur beherrschenden Größe in der Fahrzeugfolgegleichung und bestimmt also das Beschleunigungsverhalten am stärksten.

Weil aus den errechneten  $l$ - und  $m$ -Werten der einzelnen Fahrten Mittelwerte

gebildet wurden, mußten auch die dazugehörigen  $\tau - \lambda_{1,m}$ -Wertepaare jeder Fahrt neu errechnet werden, um wiederum eine optimale Angleichung an das jeweils beobachtete Beschleunigungsverhalten der Folgefahrzeuge zu erreichen.

Die auf diese Art bestimmten Wertepaare sind für alle vier Fälle in Abb. 20a-d aufgetragen.

Nach der gleichen Methode können auch für beliebige andere l-m-Kombinationen die dazugehörigen  $\tau - \lambda_{1,m}$ -Werte ermittelt werden. Das wurde von HOEFS für drei spezielle, aus der Literatur bekannte l-m-Kombinationen der Fahrzeugfolgegleichung, nämlich

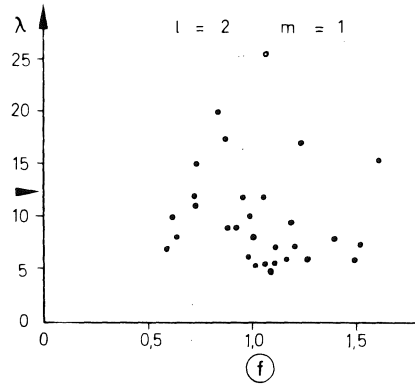
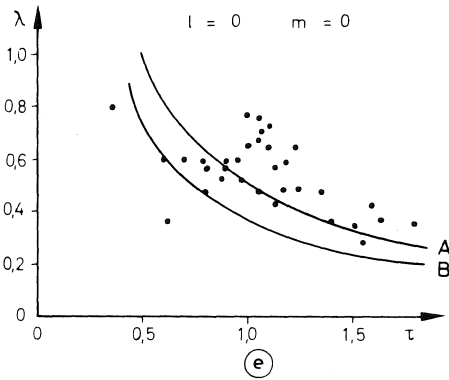
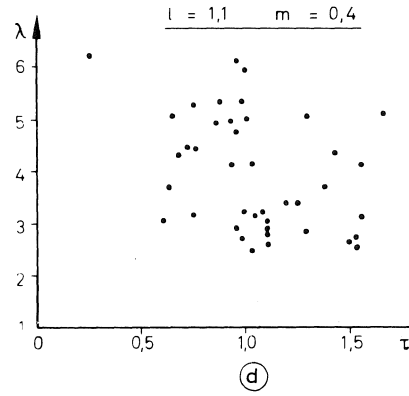
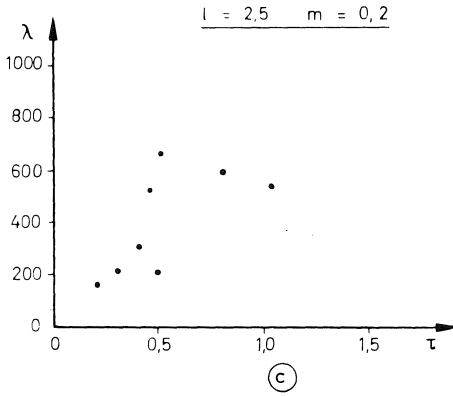
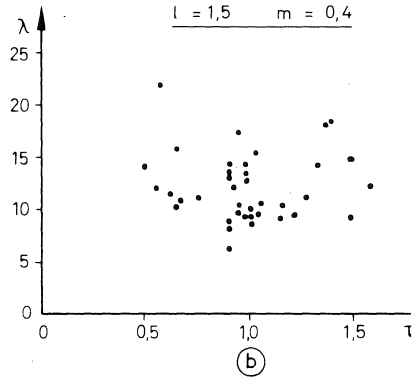
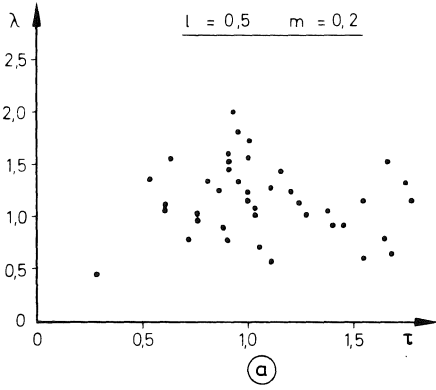
- l = 0, m = 0 (vgl. Kap. 2)
- l = 1, m = 0 (vgl. GAZIS et al. (4))
- l = 2, m = 1 (vgl. EDIE (21))

durchgeführt.

In Abb. 20e und f sind die dazugehörigen  $\tau - \lambda_{1,m}$ -Werte für die beiden Kombinationen l = 0 und m = 0 und l = 2, m = 1 aufgezeichnet (die erste der beiden Kombinationen wurde deshalb gewählt, weil sie in Kap. I.2 ausführlicher behandelt wurde, die zweite, weil bei ihr etwas geringere Restabweichungen auftreten als bei der Kombination l = 1, m = 0). In Abb. 20e sind außerdem die in Absch. I.2.2 ermittelten Grenzkurven (vgl. Abb. 5) eingezeichnet. Man erkennt, daß fast keine Punkte unterhalb der Grenzkurve für Einzelstabilität (Kurve B), einige unterhalb der Grenzkurve für Kolonnenstabilität (Kurve A) und die Mehrzahl der Punkte im Bereich der Kolonneninstabilität liegen. Das ist ein Indiz für instabiles Verhalten der Mehrzahl der beobachteten Fahrer.

Das Phänomen des stabilen bzw. instabilen Fahrens kann allerdings mit einer genaueren Methode untersucht werden. Da Gl. (3.13) eine Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Abstand angibt, der nicht unterschritten werden darf, wenn der Folgevorgang in bezug auf die für die Exponenten l und m eingesetzten Zahlenwerte im stabilen Bereich stattfinden soll, erhält man für jeweils einen Wert des Produktes  $\lambda_{1,m} \cdot \tau$  in einem  $\Delta x_{\min} - v_{\min}$ -Koordinatensystem <sup>+) eine Kurve, die den stabilen vom instabilen Bereich trennt (Abb. 21).</sup>

<sup>+) Der Index min deutet darauf hin, daß es sich um Abstände bzw. Geschwindigkeiten handelt, die nicht unterschritten werden dürfen, wenn der Folgevorgang stabil sein soll.</sup>



Quelle nach (20)

Abb. 20

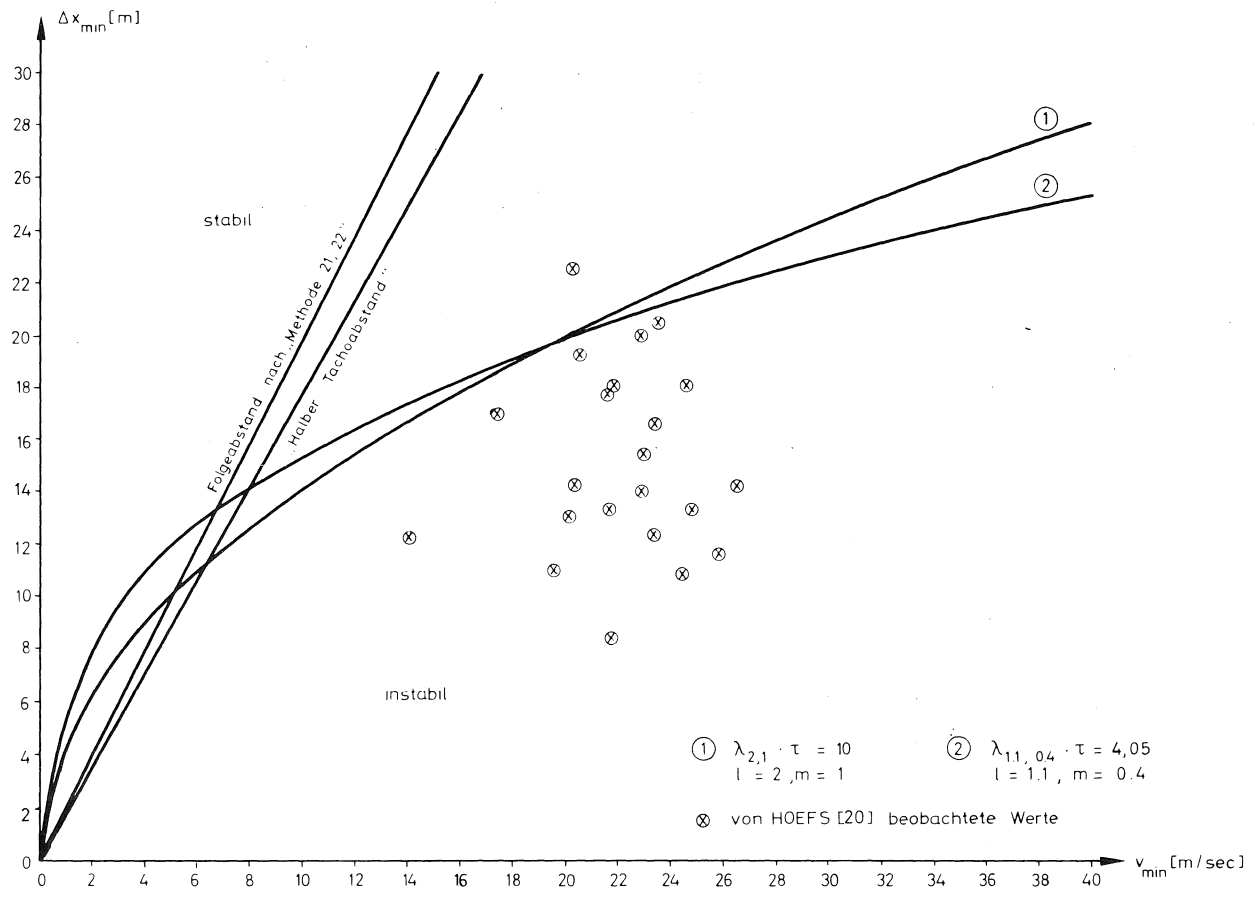


Abb 21

Kurve 1 ist die Grenzkurve (bezogen auf Kolonnenstabilität, also  $a = 0,5$ ) für  $l = 2$ ,  $m = 1$  mit  $\lambda_{2,1} \cdot \tau = 10$  als dem Mittelwert von allen aus Abb. 20f errechenbaren Produkten. Kurve 2 ist die Grenzkurve (ebenfalls bezogen auf Kolonnenstabilität) für die Exponenten  $l = 1, 1$  und  $m = 0,4$  mit  $\lambda_{1,1,0,4} \cdot \tau = 4,05$  als dem mittleren Wert von allen für diese Exponenten aus Abb. 20e errechenbaren Produkten. Der von der  $v_{\min}$ -Achse und der jeweiligen Kurve eingegrenzte Bereich beinhaltet Kombinationen von  $v_{\min}$  und  $\Delta x_{\min}$ , die ein instabiles Verhalten einer Kolonne bewirken, vorausgesetzt, daß für alle Fahrer dieser Kolonne die gleichen Werte für  $l$ ,  $m$  und  $\lambda_{l,m} \cdot \tau$  gelten. In Abb. 21 sind außerdem von HOEFS beobachtete Abstands-Geschwindigkeits-Werte eingetragen <sup>4)</sup>. Sowohl in bezug auf Kurve 1 als auch in bezug auf Kurve 2 liegen alle außer einem Punkt im instabilen Bereich, die Fahrer hielten also im Verhältnis zu ihrer Geschwindigkeit einen zu geringen Abstand ein. (Zur Veränderung des stabilen Bereichs bei verschiedenen Werten der Exponenten  $l$  und  $m$  siehe auch Abb. 17b.) Zum Vergleich sind in Abb. 21 zusätzlich zwei Geraden eingezeichnet, die als Regeln für einen genügend großen Abstand empfohlen werden, nämlich entweder eine Zeitlücke von zwei Sekunden zum Vordermann einzuhalten (Methode "21,22"), oder den Abstand so zu wählen, daß er gerade der halbe Tachoanzeige entspricht.

Obwohl die beobachteten Abstände darauf hindeuten, daß häufig im instabilen Bereich gefahren wird, kann daraus allerdings nicht geschlossen werden, daß diese Folgevorgänge bei einer größeren Zahl von Fahrzeugen in der Kolonne zwangsläufig zu Auffahrunfällen führen müßten. Denn einmal wurden für  $l$ ,  $m$  und  $\lambda_{l,m} \cdot \tau$  feste Werte vorausgesetzt, zum anderen sind die beobachteten Abstände nur zwischen dem Führungsfahrzeug und einem Folgefahrzeug ermittelt worden und deshalb nicht unbedingt repräsentativ für eine Kolonne, die aus mehr als zwei Fahrzeugen besteht. Ist nämlich der Abstand zwischen den zwei ersten Fahrzeugen einer Kolonne gering, der Abstand zwischen dem zweiten und dritten Fahrzeug dagegen groß, so kann die beginnende Instabilität bei Bewegungsänderungen durch die größere Lücke wieder abklingen oder ganz verschwinden.

---

<sup>4)</sup> Diese Abstände sind mittlere Folgeabstände nach Beendigung eines Annäherungsvorgangs. Daß sie teilweise sehr gering sind, liegt an der Versuchsanordnung: Das Meßfahrzeug fuhr auf der Überholspur einer BAB mit einer geringen Relativgeschwindigkeit an einer Kolonne vorbei. Weil gemessen wurde, kurz bevor dieser Überholvorgang beendet war, fuhren mehrere der beobachteten Folgefahrzeuge sehr dicht auf. Diese Messungen sind aber nicht identisch mit den Messungen zur Bestimmung der Größen  $l$ ,  $m$ ,  $\tau$  und  $\lambda_{l,m}$ .

### 3.5 Vergleich des Folgeverhaltens

In diesem Abschnitt sollen einige Unterschiede des Folgeverhaltens bei Variation der Exponenten  $l$  und  $m$  veranschaulicht werden.

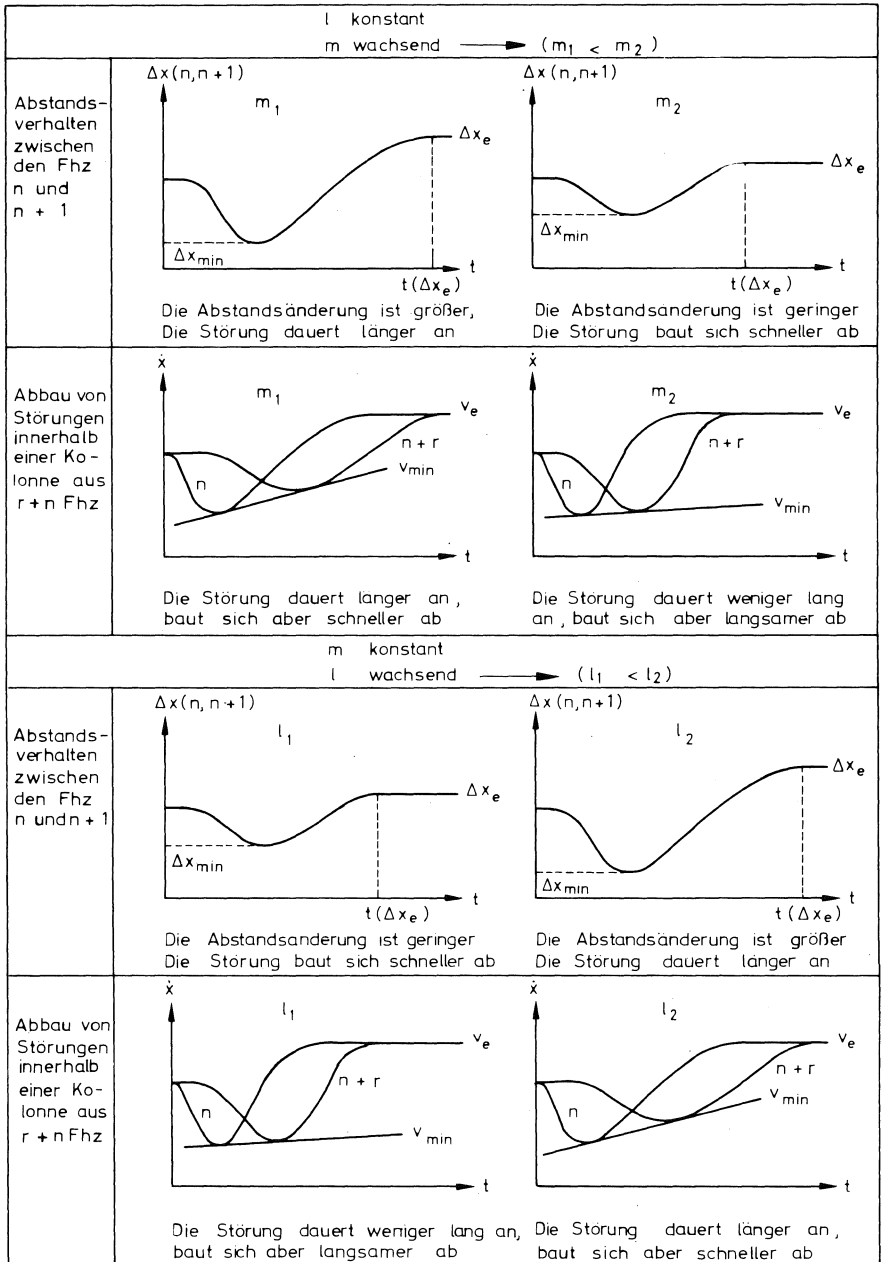
Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden folgende Voraussetzungen getroffen:

- Die Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs ist in allen Fällen gleich.
- Wurden Folgevorgänge auf der Grenze zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität betrachtet, war die Reaktionszeit in allen Fällen konstant, der Faktor  $\lambda_{l,m}$  konnte über die jeweiligen Grenzkurven ermittelt werden.
- Wurden stabile Folgevorgänge betrachtet, so wurde für  $\lambda_{lm}$  der gleiche Wert wie für den Grenzfall gewählt, während die Reaktionszeit um einen in allen Fällen gleichen Betrag verringert wurde.

Die Unterschiede im Abstandsverhalten zwischen jeweils zwei Fahrzeugen und im Abbau von Störungen innerhalb einer Kolonne sind qualitativ für beliebige  $l$ - $m$ -Kombinationen in Abb. 22 aufgezeichnet, wobei entweder  $l$  konstant und  $m$  variabel oder  $m$  konstant und  $l$  variabel gehalten wurden.

Zur Verdeutlichung sind in Abb. 23a und b für einen Folgevorgang auf der Grenze zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität und für einen stabilen Folgevorgang für  $l = 1$  und  $m = 0$  bzw.  $m = 0.5$  auch quantitativ die Unterschiede des Folgeverhaltens angegeben, wobei wegen der besseren Anschaulichkeit nur die Geschwindigkeitsganglinien des 1., 3. und 6. Fahrzeugs bzw. die Abstandsganglinien zwischen dem 1. und 2. und zwischen dem 5. und 6. Fahrzeug eingezeichnet wurden.

Folgevorgänge können in Anlehnung an die von HOEFS getroffene Unterscheidung der Exponenten für verschiedene Verkehrszustände in drei Phasen unterteilt werden (wobei nicht immer alle drei Phasen auftreten müssen), nämlich in eine Phase des Schließens ohne Aufleuchten der Bremslichter des Vordermannes, in eine Phase des Schließens mit Aufleuchten der Bremslichter und in eine Phase des Öffnens (auch hier könnte unterteilt werden in Öffnen mit und Öffnen ohne Aufleuchten der Bremslichter; das wird hier





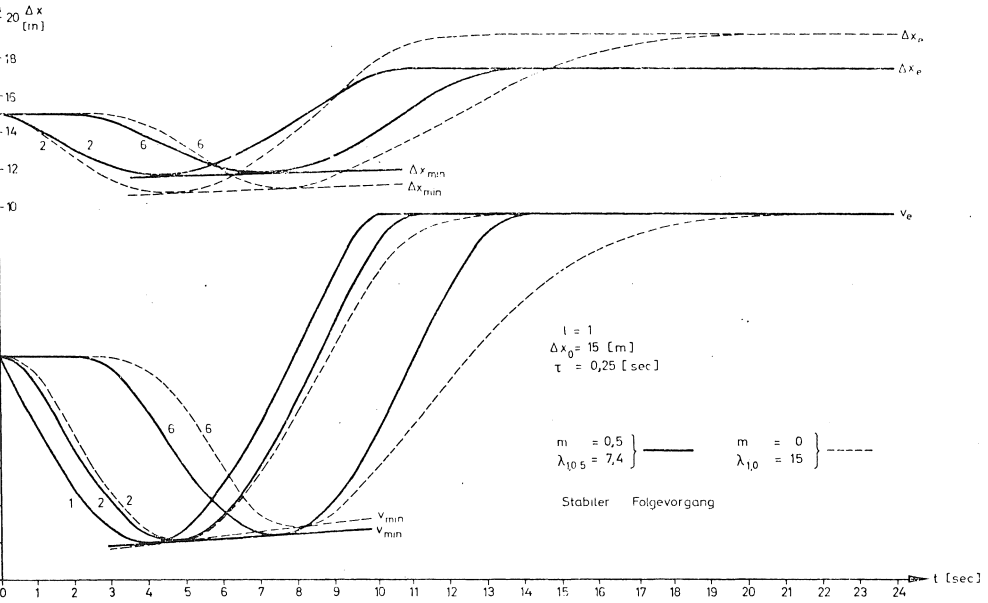


Abb. 23a

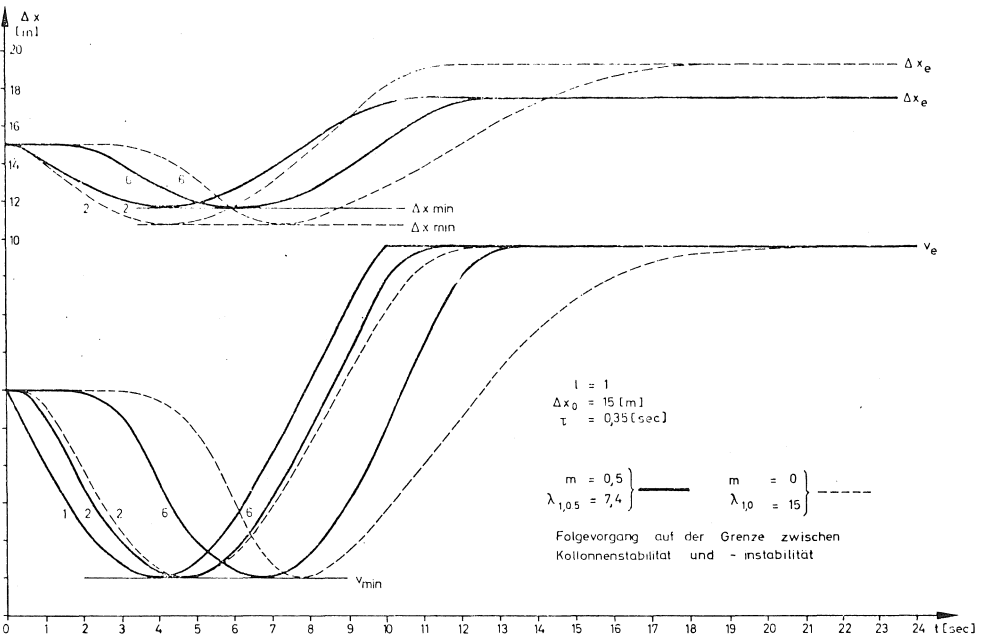


Abb 23b

aber nicht getan). Stellt man sich nun einen beliebigen Folgevorgang vor, in dem diese drei Phasen auftreten, so kann man an Abb. 22 ablesen, welche Unterschiede im Folgeverhalten durch die Verschiedenartigkeit der Exponenten hervorgerufen werden. Gerade beim Schließen mit Bremslicht, aber auch beim Schließen ohne Bremslicht liegen die Werte für  $l$  hoch, während  $m$  relativ gering und in beiden Fällen nicht sehr unterschiedlich ist. Das bedeutet: Beim Schließen, und dabei besonders beim Aufleuchten der Bremslichter, ist der Abstand zwischen den Fahrzeugen die einflußreichste Größe, und der während der Verzögerung auftretende Minimalabstand kann sehr gering werden, ohne daß der stabile Bereich verlassen wird. Außerdem baut sich die Störung (d.h. die Größe der Amplitude) innerhalb der Kolonne bei hohen  $l$ -Werten schneller ab. Im Fall des Öffnens dagegen nimmt  $l$  einen geringeren Wert an, während  $m$  sich nicht ändert. Ein kleinerer Wert von  $l$  bei konstantem  $m$  bedeutet aber, daß der eingetretene Endabstand nach der Beschleunigungsphase niedriger liegt als bei höheren  $l$ -Werten, bei denen eine Fahrzeugkolonne in der Beschleunigungsphase unrealistisch weit auseinandergezogen würde.

Diese am Beispiel des erwähnten Folgevorgangs aufgezählten Eigenschaften sind wirklichkeitsgetreu. Allerdings sind bisher die Exponenten  $l$  und  $m$  bei einem Folgevorgang über die gesamte Betrachtungszeit konstant gehalten worden, unabhängig davon, ob gerade der Fall des Öffnens, Schließens oder des Aufleuchtens der Bremslichter aktuell war. Aus diesem Grunde tritt auch z. B. der an Abb. 22 erkennbare Effekt auf, daß im Falle des Schließens (also bei höheren  $l$ -Werten) der erreichte Endabstand höher liegt als bei kleinen  $l$ -Werten (also dem Fall des Öffnens). Das ist sicher nicht sehr realistisch. Auf Exponenten, die von dem Verkehrsgeschehen abhängig sind, wird in Teil II näher eingegangen.

#### 4. Mathematischer Zusammenhang zwischen den mikroskopischen und makroskopischen Größen

Mikroskopische Größen des Verkehrsablaufs müssen, soweit sie dasselbe Phänomen beschreiben, in makroskopische Größen umgewandelt werden können (vgl. dazu LEUTZBACH (22)). Daß direkte Zusammenhänge zwischen mikroskopischen und makroskopischen Größen hergestellt werden können, wurde zum ersten Mal von GAZIS et al. (5) gezeigt und später von MAY, KELLER (23)

ausführlicher erläutert. In diesen Arbeiten wurde nachgewiesen, daß durch die Integration der allgemeinen Fahrzeugfolgleichung unter Beachtung von Randbedingungen makroskopische Beziehungen hergeleitet werden können.

In Absch. I.3.3 wurde die allgemeine Fahrzeugfolgleichung nach der Methode von HOEFS (20) integriert, um die Abstandsänderungen zu berechnen. Die Ergebnisse dieser Integration können auch zur Ermittlung der makroskopischen Beziehungen dienen.

Makroskopische Größen sind:

1. Die Verkehrsstärke  $q$  [Fhz / Zeitintervall]; das ist die Zahl der Fahrzeuge, die während eines Zeitintervalles einen Querschnitt passiert (und gleichbedeutend ist mit der mittleren Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen, die während dieses Zeitintervalles beobachtet werden).
2. Die Verkehrsdichte  $k$  [Fhz / Wegintervall]; das ist die Zahl der Fahrzeuge, die sich zu einem Zeitpunkt auf einer Strecke befinden (und gleichbedeutend mit dem reziproken mittleren Abstand der Fahrzeuge auf dieser Strecke).
3. Der Mittelwert der momentanen Geschwindigkeiten  $\bar{v}_m \left[ \frac{\text{Wegintervall}}{\text{Zeitintervall}} \right]$ ; das ist die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstroms, bezogen auf Beobachtungen zu einem Zeitpunkt über eine Wegstrecke.

Diese Größen sind über die Zustandsgleichung miteinander verbunden

$$q = k \bar{v}_m \quad (4.1)$$

Aus Gl. (3.15) erhält man unter der Voraussetzung, daß zu den Zeitpunkten, zwischen denen die Integration durchgeführt wird, jeweils Stationarität herrscht, und durch Substitution von  $\dot{x}_{n+1}(t)$  durch  $\bar{v}_m$  und von  $\Delta x(t)$  durch  $\frac{1}{k}$  die folgenden makroskopischen Beziehungen

$$\left. \begin{array}{l} m = 1: \ln \bar{v}_m \\ m \neq 1: \frac{1}{1-m} \bar{v}_m^{1-m} \end{array} \right\} = c_{1,m} + \left\{ \begin{array}{ll} \lambda_{1,m} \ln \frac{1}{k} & : l = 1 \\ \frac{\lambda_{1,m}}{1-l} k^{l-1} & : l \neq 1 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Der Wert der Konstanten  $c_{1,m}$  hängt von  $l$  und  $m$  ab. Nach (20) ergeben sich für die verschiedenen  $l$ - $m$ -Kombinationen unter Beachtung der dort aufgeführten Randbedingungen aus Gl. (4.2) und mit Gl. (4.1) die gesuchten Beziehungen  $q = q(k)$ :

$$\begin{array}{l} l < 1 \\ m < 1 \\ (m < l) \end{array} \quad q = \bar{v}_{m, \text{opt}} \left( \frac{1-m}{1-l} \right)^{\frac{1}{1-m}} k \left[ \left( \frac{k_{\max}}{k} \right)^{1-l} - 1 \right]^{\frac{1}{1-m}} \quad (4.3)$$

$$\begin{array}{l} l = 1 \\ m < 1 \end{array} \quad q = \bar{v}_{m, \text{opt}} (1-m)^{\frac{1}{1-m}} k \left[ \ln \left( \frac{k_{\max}}{k} \right) \right]^{\frac{1}{1-m}} \quad (4.4)$$

$$\begin{array}{l} l > 1 \\ m < 1 \end{array} \quad q = \bar{v}_{m, w} k \left[ 1 - \left( \frac{k}{k_{\max}} \right)^{1-l} \right]^{\frac{1}{1-m}} \quad (4.5)$$

$$\begin{array}{l} l > 1 \\ m = 1 \end{array} \quad q = \bar{v}_{m, w} k e^{-\frac{1}{1-l} \left[ \frac{k}{k_{\text{opt}}} \right]^{1-l}} \quad (4.6)$$

$$\begin{array}{l} l > 1 \\ m > 1 \\ (m < l) \end{array} \quad q = \bar{v}_{m, w} k \left[ 1 + \frac{m-1}{1-m} \left( \frac{k}{k_{\text{opt}}} \right)^{1-l} \right]^{-\frac{1}{m-1}} \quad (4.7)^+$$

Für alle weiteren  $l$ - $m$ -Kombinationen lassen sich aus Gl. (4.2) solche Beziehungen nicht ermitteln (vgl. Abb. 26). Die in den Gln. (4.3) bis (4.7) auftretenden Parameter sind in Abb. 24 erläutert. Diese Abbildung zeigt eine Funktion  $q = q(k)$  (Fundamentaldiagramm), in der die Randbedingungen

1.  $q = 0$  für  $k = 0$
2.  $q = 0$  bzw.  $\bar{v}_m = 0$  für  $k = k_{\max}$
3.  $\bar{v}_m = \bar{v}_{m, w}$  für  $k = 0$
4.  $\frac{dq}{dk} \Big|_{q_{\max}} = 0$  und  $\frac{d^2q}{dk^2} \Big|_{q_{\max}} < 0$  für  $0 < k < k_{\max}$

+) Mit diesen Gleichungen (4.3) bis (4.7) können maximale Verkehrsstärken errechnet werden, die sich für die einzelnen  $l$ - $m$ -Kombinationen stark voneinander unterscheiden. Ein Vergleich maximaler Verkehrsstärken ist in Anhang 6 angegeben.

$$5. \quad \lim_{k \rightarrow 0} \frac{dq}{dk} = \bar{v}_{m,w} \quad \text{bzw.} \quad \lim_{k \rightarrow 0} \frac{d\bar{v}_m}{dk} = 0^+$$

erfüllt sind (zur Herleitung der Randbedingungen siehe LEUTZBACH (22) ).

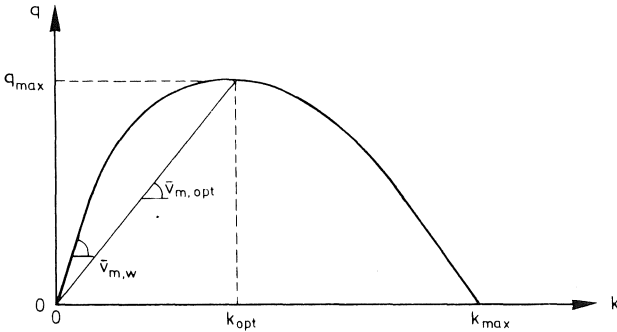


Abb. 24.

+) Diese Bedingung ist einschränkend und deshalb nicht unbedingt notwendig. Es ergibt sich nämlich (nach HOEFS (26) ):

$$\frac{d\bar{v}_m}{dk} = \frac{d}{dk} \left( \frac{q}{k} \right) = -\frac{q}{k^2} + \frac{dq}{dk} k^{-1} = \frac{-q+k \frac{dq}{dk}}{k^2}$$

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{d\bar{v}_m}{dk} = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{-q+k \frac{dq}{dk}}{k^2}$$

Nach der l'Hospitalschen Regel gilt dann auch

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{d\bar{v}_m}{dk} = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{-\frac{dq}{dk} + k \frac{d^2q}{dk^2} + \frac{dq}{dk}}{2k}$$

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{d\bar{v}_m}{dk} = \frac{1}{2} \lim_{k \rightarrow 0} \frac{d^2q}{dk^2} = 0 \quad (\text{fordert die Randbedingung}) ; \text{ also: } \left. \frac{d^2q}{dk^2} \right|_{k=0} = 0$$

Das bedeutet aber, daß bei  $k = 0$  die Funktion  $q = f(k)$  einen Wendepunkt aufweisen muß, wenn die Randbedingung erfüllt sein soll. Dies tritt aber nur bei 1-m-Kombinationen mit  $l > 1$  auf.

In Abb. 25 sind die Beziehungen aus den Gln. (4.3) bis (4.7) dargestellt (und zwar jeweils für eine l-m-Kombination innerhalb des jeweils definierten l-m-Bereichs). In den Funktionen 4.3 bis 4.5 ist k auf  $k_{\max}$  normiert und die Parameter  $\bar{v}_{m, \text{opt}}$  bzw.  $\bar{v}_{m, w}$  wurden so gewählt, daß  $q_{\max}$  gleich eins wird. Dagegen wurde bei den Funktionen 4.6 und 4.7  $k$  gleich eins gesetzt und der Maßstab von k so bestimmt, daß  $k_{\text{opt}}$  bei  $k = 0,25$  auftritt. Diese Festlegung ist willkürlich, gestattet aber einen Vergleich mit den anderen Funktionen. Auch hier hat  $\bar{v}_{m, w}$  einen solchen Wert, daß  $q_{\max}$  jeweils gleich eins ist. Welche Randbedingungen die aufgezeichneten Funktionen erfüllen, zeigt die folgende Tabelle. Wenn eine Randbedingung nicht eingehalten wird, ist die Bedingung angegeben, die stattdessen von der Funktion erfüllt wird.

	Randbedingungen				
	1.	2.	3.	4.	5.
4.3	✓	✓	$\bar{v}_m = \infty$ für $k = 0$	✓	$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{dq}{dk} = \infty$
4.4	✓	✓	$\bar{v}_m = \infty$ für $k = 0$	✓	$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{dq}{dk} = \infty$
4.5	✓	✓	✓	✓	✓
4.6	✓	$q = 0$ für $k_{\max} \rightarrow \infty$	✓	✓	✓
4.7	✓	$q = 0$ für $k_{\max} \rightarrow \infty$	✓	✓	✓

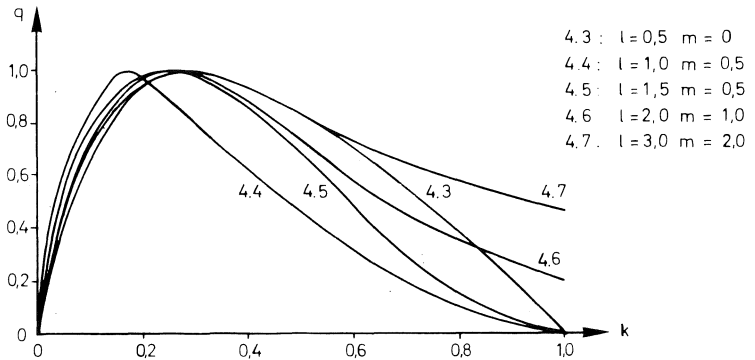
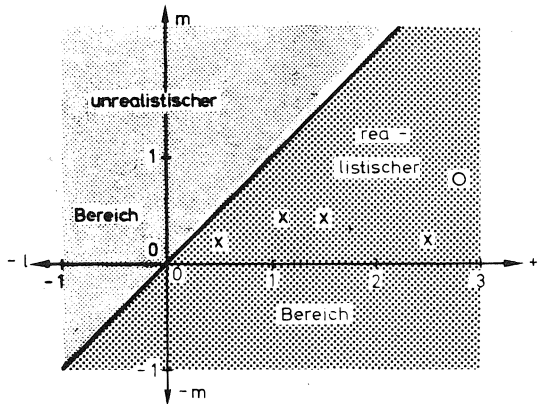


Abb. 25

In Abb. 26 liegen rechts von der Winkelhalbierenden diejenigen Kombinationen von  $l$  und  $m$ , die gewährleisten, daß die Form des Fundamentaldiagramms mindestens die folgenden Eigenschaften aufweist: Die Kurve beginnt im Punkt ( $q = 0, k = 0$ ), erreicht ein Maximum ( $= q_{\max}$ ) und strebt mit wachsendem  $k$  wieder gegen  $q$  gleich null.

Auf der Winkelhalbierenden und links davon liegen diejenigen  $l$ - $m$ -Kombinationen, für die kein oder ein nur sehr unrealistisches Fundamentaldiagramm konstruiert werden kann.

In dieser Abbildung erkennt man auch, daß sich aus der in Kap. I.2 diskutierten Fahrzeugfolgegleichung ( $l = 0, m = 0$ ) keine wirklichkeitsgetreue makroskopische Beziehung herleiten läßt.



x von HOEFS (20) ermittelte Werte  
 o von MAY, KELLER (23) ermittelter Wert

Abb. 26

Beobachtete  $l$ - $m$ -Kombinationen ( $l = 1,1; m = 0,4 / l = 0,5; m = 0,2 / l = 1,5; m = 0,4 / l = 2,5; m = 0,2$  in (20) und  $l = 2,8; m = 0,8$  in (23)) liegen im realistischen Bereich des  $l$ - $m$ -Koordinatensystems. MAY, KELLER geben in (27) zwei  $l$ - $m$ -Kombinationen an, die jeweils für einen Teilbereich des Fundamentaldiagramms gelten:

$l = 3,7; m = -1,0$  für den Bereich zwischen  $k = 0$  und  $k = k_{opt}$  und  
 $l = -0,8; m = -0,5$  für den Bereich zwischen  $k_{opt}$  und  $k_{max}$ .

Eine der beiden Kombinationen, nämlich  $l = -0,8; m = -0,5$ , liegt im unrealistischen Bereich. Bei der Beschreibung nur eines Teilbereichs müssen jedoch nicht alle (bzw. nicht die Mehrzahl) der genannten Randbedingungen erfüllt werden (z. B. spielt dann für den rechten Bereich des Fundamentaldiagramms die Randbedingung  $q = 0$  für  $k = 0$  keine Rolle).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß nur solche  $l$ - $m$ -Kombinationen, die rechts von der Winkelhalbierenden des  $l$ - $m$ -Koordinatensystems (Abb. 26) und zusätzlich dazu nur innerhalb des Bereichs beobachteter Werte von  $l$  und  $m$  liegen, also innerhalb der Grenzen

$$\begin{aligned} 0,5 &\leq l \leq 2,8 \\ 0,2 &\leq m \leq 0,8 \end{aligned}$$

eine einigermaßen wirklichkeitsgetreue Beschreibung des Verhaltens von Fahrzeugkolonnen ermöglichen. Zur Beschreibung von Teilbereichen des Fundamentaldiagramms können dagegen auch andere Kombinationen herangezogen werden.



## II. Konzeption eines Abstandswarngeräts

### 1. Vorbemerkung

Aufbauend auf den in Teil I erarbeiteten Grundlagen wird in Teil II zunächst auf die möglichst wirklichkeitsgetreue Beschreibung des Kolonnenverkehrs eingegangen und dann versucht, Maßnahmen zu erläutern, die die Sicherheit gegen Auffahrunfälle vergrößern. Daß es notwendig ist, sich mit Möglichkeiten der Verringerung von Auffahrunfällen zu beschäftigen, zeigt an einem Beispiel Abb. 27. In mehreren von LEUTZBACH, BRILON et al. (28, 29) durchgeführten Untersuchungen wurden über längere Zeiträume die Unfälle auf Bundesautobahnstrecken getrennt nach Unfalltypen in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung ausgewertet. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen ist der in Abb. 27 gut erkennbare U-förmige Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Verkehrsstärke. Die Ursache für den ansteigenden Ast bei höheren Verkehrsstärken liegt in der starken Zunahme der Auffahrunfälle begründet.

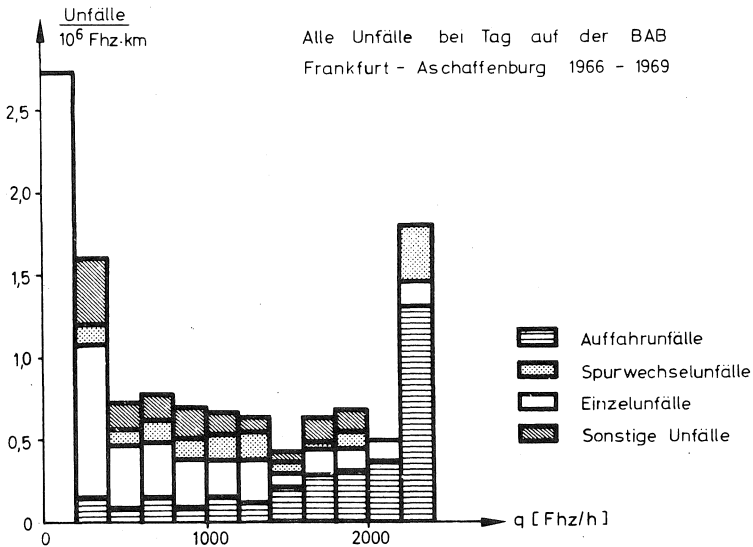


Abb. 27

Man erkennt an Abb. 27, daß bei Verkehrsstärken zwischen 1400 und 1800 [Fhz/h] ungefähr jeder zweite Unfall, bei Verkehrsstärken über 1800 [Fhz/h] fast jeder Unfall auf einen zu geringen Abstand zurückzuführen ist.

Das zur Beschreibung des Kolonnenverkehrs notwendige Algol-Rechenprogramm geht davon aus, daß das Fahrverhalten von Folgefahrzeugen mit der Fahrzeugfolgegleichung (Gl. (1.1)) und den von HOEFS (20) ermittelten Werten für die Exponenten  $l$  und  $m$ , für die Proportionalitätsfaktoren  $\lambda_{l,m}$  und für die Reaktionszeiten  $\tau$  genügend realistisch beschrieben werden kann (siehe dazu Absch. I.3.5).

Im Gegensatz zu Teil I müssen nun aber zusätzlich Zufallseinflüsse berücksichtigt werden, denn sowohl die Reaktionszeiten (womit wie bisher Wahrnehmungszeit, eigentliche Reaktionszeit und die durch die Mechanik des Fahrzeugs bedingte Verzögerungszeit gemeint sind) wie auch die Faktoren  $\lambda_{l,m}$  unterscheiden sich einmal von Fahrer zu Fahrer als auch bei dem einzelnen Fahrer, weil sie abhängig sind von der augenblicklichen Verkehrssituation.

Auch die Exponenten sind nun während eines Folgevorganges nicht mehr konstant, sondern richten ihre Größe nach den drei definierten Fällen (Öffnen, Schließen, Bremslicht). Allerdings werden sie innerhalb dieser Fälle für alle Fahrer als konstant betrachtet, obwohl auch diese Größen unterschiedliche Werte annehmen können (vgl. Absch. I.3.4). Dadurch wird aber die Wirklichkeitstreue nicht sehr beeinflusst, denn der nicht durch die Fahrzeugfolgegleichung erklärbare Anteil der Beschleunigung (= Restabweichung) eines jeden von HOEFS beobachteten Folgefahrzeugs liegt bei diesen  $l$ - $m$ -Kombinationen im Mittel bei  $\pm 0,2$  [m/sec<sup>2</sup>] und schwankt zwischen  $\pm 0,044$  und  $\pm 0,399$  [m/sec<sup>2</sup>]. HOEFS weist darauf hin, daß dieser Anteil gerade mit dem von MONTROLL (30) angegebenen Wert für das Eigenrauschen (acceleration noise) übereinstimmt. Dieses im Rechenprogramm nicht berücksichtigte Eigenrauschen entsteht durch unbewußte Bewegungen des Gaspedals durch den Fahrer und überlagert das bewußte Beschleunigen und Verzögern eines Fahrzeugs.

Das in den nächsten Abschnitten näher erläuterte Programm besteht im wesentlichen aus zwei Prozeduren, der Prozedur FZ1, in der die kinematischen Größen des Führungsfahrzeugs einer Kolonne aus einer beliebigen Beschleunigungsganglinie berechnet werden und der Prozedur FF, in der über die Fahrzeugfolgegleichung die kinematischen Größen des Folgefahrzeugs ermittelt werden.

Folgende Daten werden zu Beginn des Programms vereinbart:

- N = Anzahl der Zeitschritte I, über die eine Kolonne betrachtet wird.
- Q = Anzahl der Kolonnenfahrzeuge einschl. des Führungsfahrzeugs.
- A = Größe eines Zeitschritts in Sekunden (vgl. dazu Absch. I.2.1).  
Im Gegensatz zu Teil I wird nun für A ein Wert von 0,05 [sec] angesetzt, um trotz der größeren Zeitdauer, über die eine Kolonne betrachtet wird, die Rechenzeit nicht entsprechend anwachsen zu lassen.
- VO = Anfangsgeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs.
- XO = Anfangsabstand zwischen Führungsfahrzeug und erstem Folgefahrzeug.
- NA, NB = Hilfsgrößen zur Erzeugung von Zufallszahlen.
- ENT1 = Schalter, womit einzelne Programmteile übersprungen werden können.

Zunächst wird das Rechenprogramm für Kolonnenverkehr, bei dem keine Hilfseinrichtungen zur Abstandswahl vorhanden sind, beschrieben.

Die Ergebnisse dieses Programms dienen einmal dazu, das Verhalten von Fahrzeugkolonnen aufzuzeigen, und zum anderen dazu, die Unterschiede zwischen Kolonnenfahrten mit und ohne Hilfseinrichtungen zur Abstandshaltung bei gleichen Anfangsbedingungen zu verdeutlichen.

## 2. Kolonnenverkehr ohne Hilfseinrichtungen in den Fahrzeugen

### 2.1 Prozedur FZ1

Für das Führungsfahrzeug werden aus einer vorgegebenen Beschleunigungsganglinie die Geschwindigkeit  $V(I)$  und der zurückgelegte Weg  $X(I)$  errechnet. Im Gegensatz zu Teil I werden nun endliche Fahrzeuglängen verwendet. Deshalb bezieht sich  $X(I)$  jeweils auf die Front eines Fahrzeugs, und es ergeben sich daraus die folgenden Definitionen:

$\Delta x(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t)$  (entspricht  $DX(I) = XX(I) - X(I)$  im Programm)  
 ist der Bruttoabstand zwischen zwei Fahrzeugen. Mit einer mittleren  
 Fahrzeuglänge von 5 [m] errechnet sich daraus der Nettoabstand zu  
 $\Delta x_N(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) - 5$ .

Da der Fahrer eines Folgefahrzeugs erst nach Verstreichen einer Reaktionszeit auf Bewegungsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs reagiert, ist ein Anlaufbereich notwendig, in dem noch keine Bewegungsänderungen auftreten. Dieser Anlaufbereich muß mindestens so groß sein wie die Summe aller Reaktionszeiten der in der betrachteten Kolonne fahrenden Fahrzeuge.

Weil die einzelnen Reaktionszeiten erst in einem späteren Rechenschritt ermittelt werden, einen Wert von 2 [sec] aber nicht überschreiten, muß der Anlaufbereich dementsprechend mindestens eine Dauer von  $(Q - 1) \cdot 2$  [sec] aufweisen.

Das Strukturdiagramm für die Prozedur FZ1 hat somit die in Abb. 28 dargestellte Form.

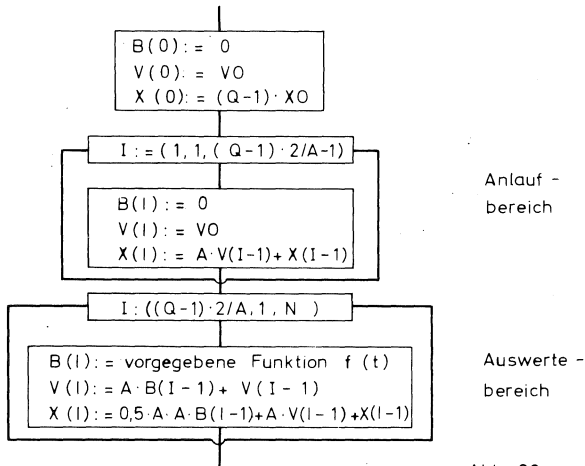


Abb. 28

Das in diesem und den folgenden Abschnitten beschriebene Algol-Programm ist in Anhang 7 vollständig angegeben.

## 2.2 Prozedur FF

### 2.2.1 Zufallsgrößen $\tau$ und $\lambda_{1,m}$

Um die kinematischen Größen der Folgefahrzeuge berechnen zu können, müssen zunächst die Reaktionszeiten  $\tau$  und die Proportionalfaktoren  $\lambda_{1,m}$  bekannt sein.

Dabei werden jedem Fahrer drei Wertepaare ( $\tau$  (FALL),  $\lambda_{1,m}$  (FALL) ) zugewiesen:

$\tau$ (1),	$\lambda$ (1)	für den Fall des Öffnens ( $\Delta\dot{x}(t) \geq 0$ ),
$\tau$ (2),	$\lambda$ (2)	für den Fall des Schließens ( $\Delta\dot{x}(t) < 0$ ),
$\tau$ (3),	$\lambda$ (3)	für den Fall des Aufleuchtens der Bremslichter des Vordermannes ( $\Delta\dot{x}(t) \geq 0$ ).

(Fall 4, in dem die drei genannten Fälle zusammengefaßt sind, wird nicht betrachtet.)

In Abb. 20a-c sind für diese drei Fälle alle  $\tau$ - $\lambda_{1,m}$ -Werte aufgetragen, die aus den einzelnen von HOEFS durchgeführten Meßfahrten errechnet wurden.

Aus den in dieser Abbildung eingezeichneten Werten wurden Verteilungsfunktionen von  $\tau$  und  $\lambda \cdot \tau$  gebildet (von  $\lambda \cdot \tau$  und nicht von  $\lambda$  deshalb, weil dieses Produkt in Gl. (3.13) auftritt und also auch die Form der durch diese Gleichung beschriebenen Abstands-Geschwindigkeits-Grenzkurven (vgl. Abb. 21) bestimmt).

In den folgenden zwei Tabellen sind die absoluten Häufigkeiten von  $\tau$  und  $\lambda \cdot \tau$  für alle drei Fälle angegeben.

Tabelle 1

$\tau$ [sec]	Absolute Häufigkeiten $f_i$ für		
	Fall 1	Fall 2	Fall 3
0.2 - 0.3	0	0	2
0.3 - 0.4	0	0	0
0.4 - 0.5	0	0	3
0.5 - 0.6	1	3	1
0.6 - 0.7	3	4	0
0.7 - 0.8	3	1	0
0.8 - 0.9	4	1	1
0.9 - 1.0	7	13	0
1.0 - 1.1	6	5	1
1.1 - 1.2	2	2	0
1.2 - 1.3	3	2	0
1.3 - 1.4	2	3	0
1.4 - 1.5	1	2	0
1.5 - 1.6	2	1	0
1.6 - 1.7	3	0	0
Mittelwert $\bar{\tau}$	1.07	0.99	0.52

Tabelle 2

Fall 1		Fall 2		Fall 3	
$\lambda \cdot \tau$	$f_i$	$\lambda \cdot \tau$	$f_i$	$\lambda \cdot \tau$	$f_i$
0.5 - 0.7	5	6 - 9	11	0 - 100	2
0.7 - 0.9	5	9 - 12	9	100 - 200	2
0.9 - 1.1	5	12 - 15	10	200 - 300	1
1.1 - 1.3	6	15 - 18	2	300 - 400	1
1.3 - 1.5	9	18 - 21	2	400 - 500	1
1.5 - 1.7	2	21 - 24	1	500 - 600	1
1.7 - 1.9	4	24 - 27	2		
1.9 - 2.1	1				
Mittelwerte und Standardabweichungen					
$\bar{\lambda \cdot \tau} = +1.23$ $s = +0.38$		$\bar{\lambda \cdot \tau} = +12.1$ $s = +4.8$		$\bar{\lambda \cdot \tau} = +241$ $s = +198$	

An Tabelle 1 erkennt man deutlich, daß sich die Mittelwerte der Reaktionszeiten unterscheiden: Beim Aufleuchten der Bremslichter eines vorausfahrenden Fahrzeugs liegen durch den damit verbundenen höheren Aufmerksamkeitsgrad des nachfolgenden Fahrers die Reaktionszeiten niedriger als in den beiden anderen Fällen. Auch ist beim Schließen der Mittelwert geringer als beim Öffnen. Das dürfte ebenfalls auf die größere Aufmerksamkeit zurückzuführen sein

Aus den absoluten Häufigkeiten für  $\tau$  und  $\lambda \cdot \tau$  wurden die in Abb. 29 dargestellten relativen Häufigkeiten  $h(\tau)$  bzw.  $h(\lambda \cdot \tau)$  und Verteilungsfunktionen  $H(\tau)$  bzw.  $H(\lambda \cdot \tau)$  errechnet. In dieser Abbildung sind außer den errechneten Verteilungsfunktionen auch die geglätteten Funktionen eingezeichnet, die wegen des geringeren Aufwands dann im Rechenprogramm verwendet wurden.

Aus den Verteilungsfunktionen  $H(\tau)$  und  $H(\lambda \cdot \tau)$ , die allgemein die Form

$$H(x) \begin{cases} = & ax + b & \text{für } x_1 \leq x \leq x_2 \\ & cx + d & \text{für } x_2 < x \leq x_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & & \leq x_n \end{cases}$$

haben, erhält man durch Auflösen nach  $x$  die Umformung

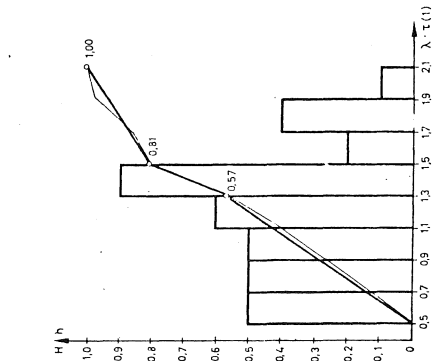
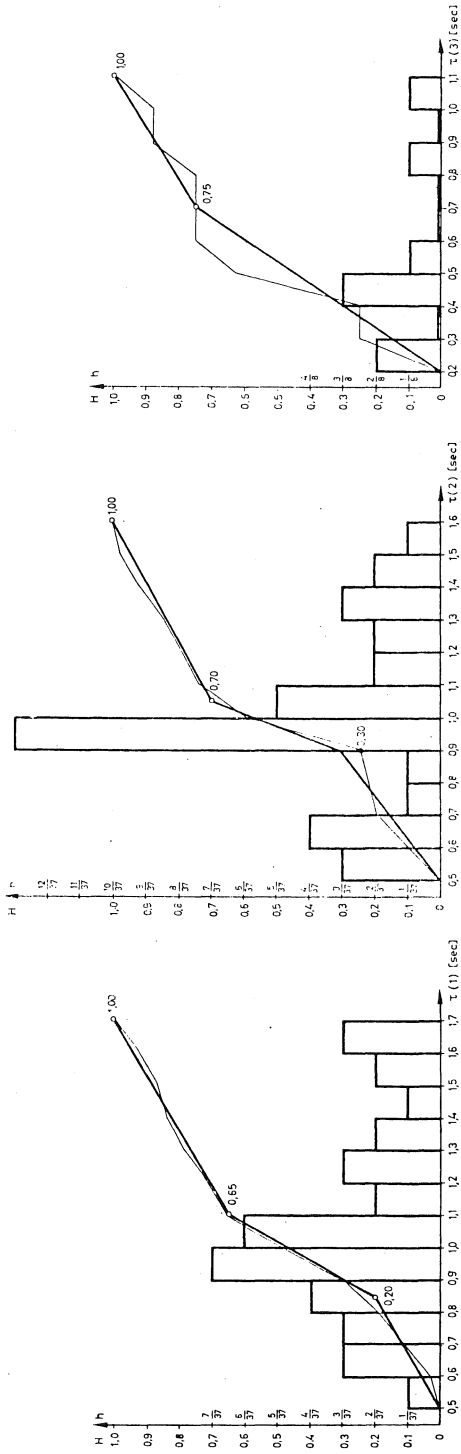
$$x \begin{cases} = & (H(x) - b)/a & \text{für } x_1 \leq x \leq x_2 \\ & (H(x) - d)/c & \text{für } x_2 < x \leq x_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & & \leq x_n \end{cases}$$

und daraus

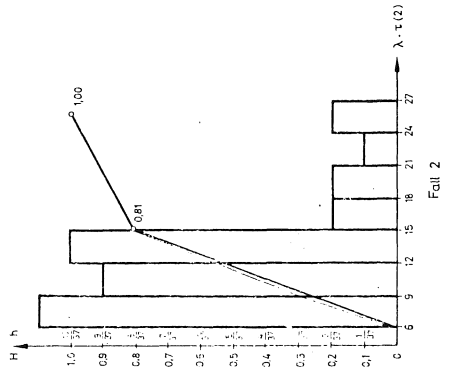
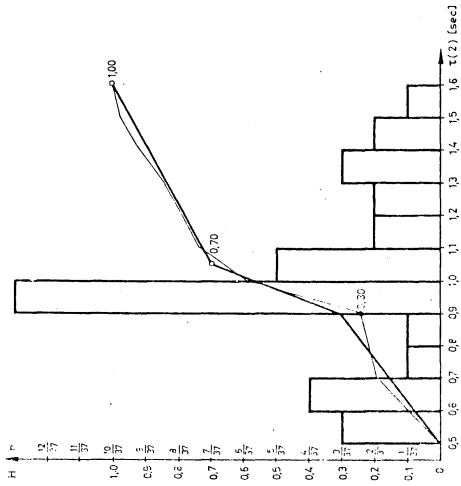
$$x \begin{cases} = & (ZF-b)/a & \text{für } 0 \leq ZF \leq y_1 \\ & (ZF-d)/c & \text{für } y_1 < ZF \leq y_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & & \leq 1 \end{cases}$$

ZF ist eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Zufallszahl, die in einem Zufallsgenerator GEN (ZF) erzeugt wird. Durch Erzeugung dreier Zufallszahlen ZF, ZFA und ZFB werden für jeden Fahrer jeweils drei Werte von  $\tau$  und  $\lambda_{1,m}$  (bzw. zunächst  $\lambda_{1,m} \cdot \tau$ ) errechnet, wie in dem vereinfachten Strukturdiagramm Abb. 30 dargestellt.

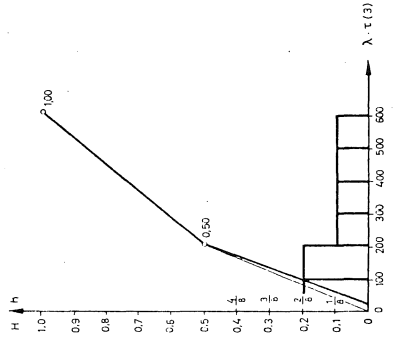
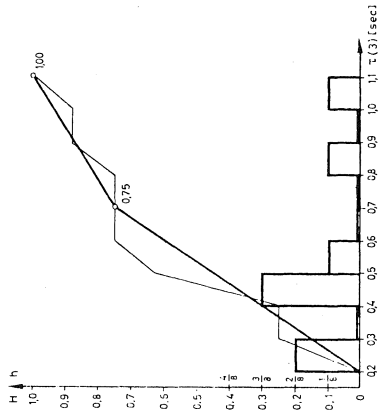
Für jeden Fahrer werden entsprechend dem Strukturdiagramm in Abb. 30 die drei Wertepaare für  $\tau$  (FALL) und  $\lambda_{1,m}$  (FALL) unabhängig voneinander ermittelt. Zwischen den Reaktionszeiten der drei Fälle besteht aber ein gewisser Zusammenhang, wie aus den von HOEFS ermittelten Werten hervorgeht, weil die Reaktionszeiten der Fälle 1 und 2 nicht beliebig weit auseinander liegen dürfen und größer sein müssen als die Werte für Fall 3. Deshalb wurden die mittleren prozentualen Abweichungen zwischen den Reaktionszeiten der einzelnen Fälle, bezogen jeweils auf einen Fahrer, errechnet und dann als Grenzen der möglichen Abweichungen festgelegt. Damit ergaben sich die folgenden Bedingungen:



Fall 1



Fall 2



Fall 3



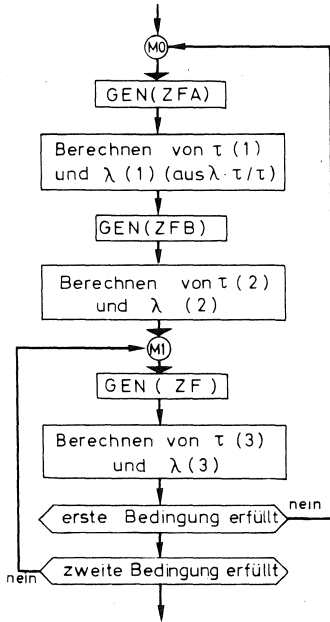


Abb. 30

1. Bedingung:  $1.50 \cdot \tau(1) \leq \tau(2) \leq 0.55 \cdot \tau(1)$
2. Bedingung:  $\begin{cases} \tau(3) \leq 0.85 \cdot \tau(1) \\ \tau(3) \leq 0.85 \cdot \tau(2) \end{cases}$

Sofern die erste Bedingung nicht erfüllt ist, werden für alle drei Fälle nochmals neue  $\tau$ - $\lambda_{1,m}$ -Werte errechnet (durch einen Rücksprung zur Marke M0, siehe Abb. 30), ist die zweite Bedingung nicht erfüllt, wird nur für Fall 3 ein neues Wertepaar  $(\tau, \lambda)$  errechnet (durch einen Rücksprung zur Marke M1, siehe Abb. 30).

Sind nach einem oder mehreren Rücksprüngen alle Bedingungen erfüllt, muß für alle drei Fälle der errechnete Zahlenwert  $\tau$  (FALL) aus rechentechnischen Gründen so ab- oder aufgerundet werden, daß bei Division dieser gerundeten Zahl durch 0.05 eine ganze Zahl entsteht (z. B. wird 0.87213 somit zu 0.85). Diese Umformung hängt direkt mit der gewählten Schrittweite von  $A = 0.05$  [sec] zusammen und bewirkt, daß in einem späteren Programmteil zu berechnende Feldgrenzen Integerzahlen werden.

### 2.2.2 Anfangswerte und Fallzuweisung

Die Anfangswerte für Beschleunigung  $B(0)$ , Geschwindigkeit  $V(0)$  und Position  $X(0)$  des betrachteten Folgefahrzeugs sind wie folgt vereinbart:

$$\begin{aligned} B(0) &= 0 \\ V(0) &= V_0 \\ X(0) &= (Q-Z) \cdot X_0 \end{aligned}$$

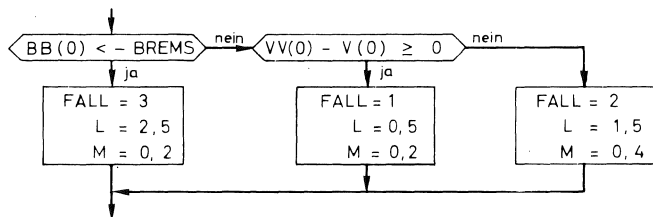
mit  $Z$  = Nummer des Fahrzeugs in der Kolonne.

Da Fall 3 definiert ist als der Fall, bei dem die Bremslichter des Vordermannes aufleuchten, wurde ein Kriterium formuliert, das angibt, ab welcher Verzögerung eines Fahrzeugs die Bremslichter überhaupt erst aufleuchten (vgl. WIEDEMANN (31)):

Für	$b > -0.50$	$[\text{m/sec}^2]$	kein Aufleuchten
Für	$-0.50 \geq b \geq -1.50$	$[\text{m/sec}^2]$	Aufleuchten möglich
Für	$b < -1.50$	$[\text{m/sec}^2]$	Aufleuchten

Innerhalb des Bereichs zwischen  $-0.50$  und  $1.50$   $[\text{m/sec}^2]$  wird mit einer gleichverteilten Zufallszahl BREMS entschieden, ob die Bremslichter aufleuchten oder nicht.

Nach Vereinbarung der Anfangswerte  $B(0)$ ,  $V(0)$ ,  $X(0)$  und von BREMS wird nun im nächsten Rechenschritt entschieden, welcher der drei Fälle aktuell ist, und damit, welches  $\tau$  (FALL) und  $\lambda$  (FALL) einem Fahrer zugewiesen werden muß (Abb. 31).



BB und VV sind die Werte des vorausfahrenden Fhz.

Abb 31

### 2.2.3 Berechnung der kinematischen Größen

Die Berechnung der Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position eines Folgefahrzeugs beruht prinzipiell auf dem in Abb. 13 dargestellten Strukturdiagramm. Nur wegen der hier angestrebten besseren Übereinstimmung mit der Wirklichkeit müssen einige zusätzliche Bedingungen eingeführt werden.

Dazu gehört auch eine für jedes Fahrzeug unterschiedliche maximale und minimale Beschleunigung  $B_{MAX}$  bzw.  $B_{MIN}$ , um verschiedene Beschleunigungs- und Verzögerungseigenschaften der einzelnen Fahrzeuge zu berücksichtigen, wofür die folgenden Grenzen festgelegt wurden (vgl. WIEDEMANN (31)):

$$B_{MIN} = -7.5 - (3 ZF - 1.5) + 0.0555 \dot{x}_{n+1}(t) \quad [m/sec^2]$$
$$B_{MAX} = 4.5 + (2 ZF - 1.0) + 0.0850 \dot{x}_{n+1}(t) \quad [m/sec^2]$$

Da  $ZF$  eine zwischen 0 und 1 gleich verteilte Zufallszahl ist, schwankt für  $\dot{x} = 0$   $B_{MIN}$  zwischen - 6 und - 9  $[m/sec^2]$  und  $B_{MAX}$  zwischen + 3.5 und + 5.5  $[m/sec^2]$ .

In Abb. 32 sind die Bereiche von  $B_{MIN}$  und  $B_{MAX}$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgezeichnet.

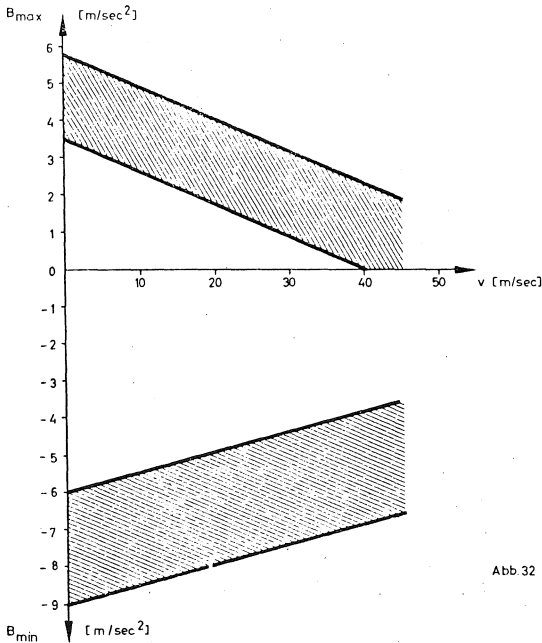


Abb 32

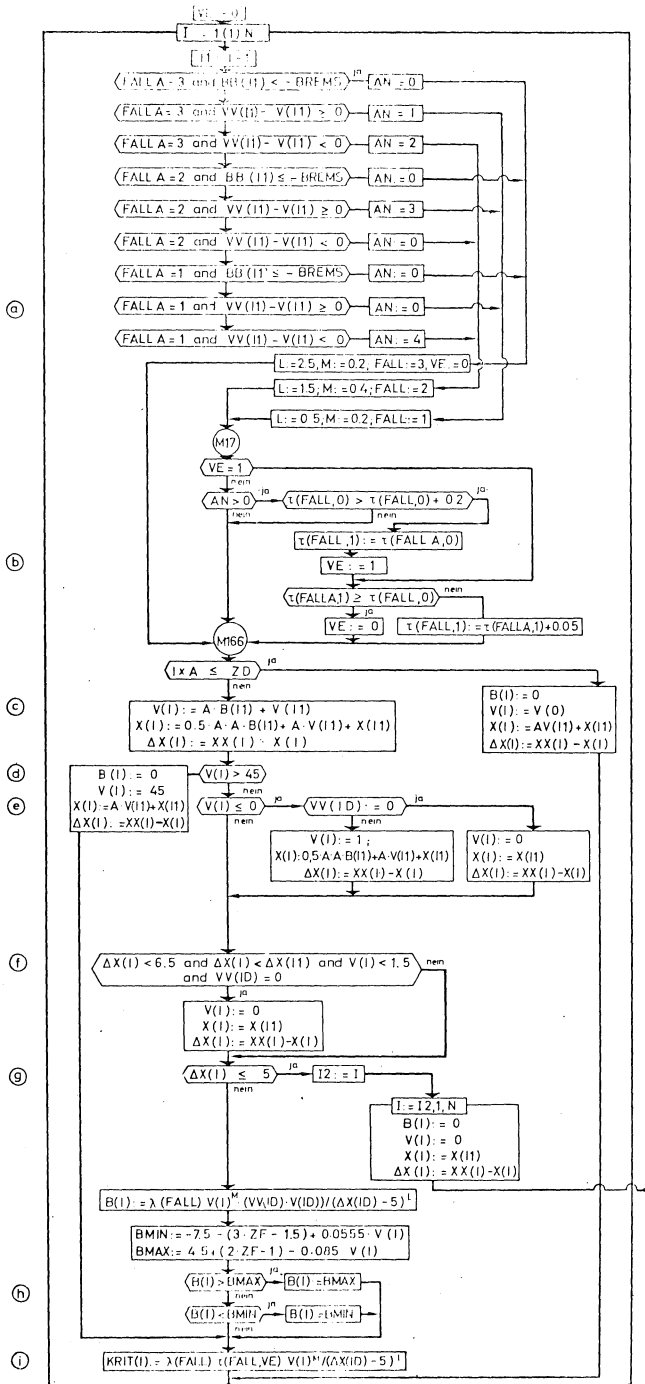


Abb 33

Das zur Berechnung der kinematischen Größen notwendige Strukturdiagramm ist in Abb. 33 dargestellt.

Erläuterungen zu Abb. 33:

- a) Zu Beginn eines jeden Zeitschrittes I wird zunächst abgefragt, ob durch Veränderungen der kinematischen Größen, die im vorangegangenen Zeitschritt I1 (=I-1) errechnet wurden, eine Falländerung eintritt (d.h.: FALL ≠ FALL A, wobei FALL A den Fall des Zeitschrittes I1 bezeichnet), weil dann die Exponenten l und m und damit auch die Reaktionszeit  $\tau$  und der Proportionalfaktor  $\lambda_{1,m}$  andere Werte annehmen.

Bei einer Falländerung kann nun die Reaktionszeit kleiner oder größer werden. Eine sprunghafte Vergrößerung würde aber bedeuten, daß sich der betrachtete Fahrer plötzlich wieder an einer Verkehrssituation orientieren würde, nach der er sich bei der vorangegangenen kleineren Reaktionszeit schon gerichtet hatte (weil ja Abstand und Relativgeschwindigkeit, also die Größen, die eine Reaktion und damit eine Beschleunigungsänderung bewirken, Funktionen von  $(t-\tau)$  sind). (Beispiel: Sprunghafte Erhöhung der Reaktionszeit von  $\tau(3) = 0.5$  [sec] auf  $\tau(2) = 1.0$  [sec] zum Zeitpunkt I = 1000 [0.05 sec]. Dann ist B (I=999) aus den kinematischen Größen des Zeitpunktes  $t - \tau = ID = 999 - 0.5/0.05 = 989$  errechnet worden, während B(I=1000) aus den kinematischen Größen des Zeitpunktes  $ID = 1000 - 1.0/0.05 = 980$  ermittelt werden müßte, einem Zeitpunkt, der bei  $\tau = 0.5$  [sec] schon 10 Zeitschritte zuvor berücksichtigt worden war.

Um statt des sprunghaften Anstiegs eine allmähliche Angleichung an den neuen  $\tau$ -Wert zu erreichen, werden deshalb bei einer Falländerung, bei der eine Vergrößerung von  $\tau$  möglich sein kann, einer Variablen AN Werte zwischen 1 und 4 zugewiesen:

- AN = 1: Änderung von Fall 3 in Fall 1
- AN = 2: Änderung von Fall 3 in Fall 2
- AN = 3: Änderung von Fall 2 in Fall 1
- AN = 4: Änderung von Fall 1 in Fall 2
- AN = C: keine Vergrößerung von  $\tau$  möglich

- b) Da die Angleichung des alten  $\tau$ -Wertes an den neuen  $\tau$ -Wert bei einer Falländerung über mehrere Zeitschritte andauert, die eigentliche Falländerung aber nur einmal auftritt, muß das Zeitintervall, in dem die Angleichung stattfindet, besonders gekennzeichnet werden. Das geschieht durch eine zweite Indizierung der Reaktionszeit, die nun mit  $\tau(\text{FALL}, \text{VE})$  bezeichnet wird. Hat VE den Wert eins, befindet sich  $\tau$  gerade im Zustand des Anstiegs auf den neuen Wert, ist VE gleich null, ist der neue Wert erreicht oder es ist kein neuer Wert erforderlich oder es kann in dem betrachteten Rechenschritt auch gerade eine Falländerung eingetreten sein. Dann aber wurde der Variablen AN ein Wert zwischen eins und vier zugewiesen.

Wenn Fall 3 übergeht in einen anderen Fall (AN = 1 oder AN = 2), ist immer eine Erhöhung von  $\tau$  die Folge (vgl. die zweite Bedingung in Absch. II.2.2.1). Ist AN gleich drei oder vier, geht also Fall 2 in

Fall 1 oder Fall 1 in Fall 2 über, kann eine Erhöhung die Folge sein; das muß aber zunächst abgefragt werden.

Die Angleichung an den höheren  $\tau$ -Wert geschieht in Schritten von 0.05 [sec], d.h.: das aktuelle  $\tau$  (FALL, 1), ergibt sich aus dem alten  $\tau$  (FALL A,1) durch Addition von 0.05 [sec]. Diese Schrittweite wurde aufgrund der Größe von A gewählt. Ist die Angleichung beendet, d.h. hat  $\tau$  den eigentlichen Wert des aktuellen Falles erreicht, wird VE wieder gleich null gesetzt.

Dieser Programmteil tritt allerdings nur dann in Kraft, wenn sich die alte und die neue Reaktionszeit um mehr als 0.2 [sec] unterscheiden.

- c) Solange im Anlaufbereich die Reaktionszeit für einen Fahrer noch nicht verstrichen ist (d.h.: solange  $I \cdot A \leq ZD$  ist), kann er auf Bewegungsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs noch nicht reagieren, d.h. das Fahrzeug fährt weiterhin mit seiner Anfangsgeschwindigkeit  $V(O)$ . Ist  $I \cdot A > ZD$ , errechnen sich die Geschwindigkeit und die Position aus den bekannten Bewegungsgleichungen.
- d) Übersteigt die Geschwindigkeit den Wert von 45 [m/sec], wird sie auf 45 [m/sec] begrenzt.
- e) Erreicht die Geschwindigkeit den Wert null oder unterschreitet diesen Wert (das ist nach der Fahrzeugfolgegleichung theoretisch möglich) und hat das vorausfahrende Fahrzeug n zum Zeitpunkt  $t - \tau$  (FALL, VE) ( $\hat{=} ID$  im Programm) die Geschwindigkeit  $\dot{x}_n(t-\tau) = 0$  ( $\hat{=} VW(ID) = 0$ ), wird dem betrachteten Fahrzeug n+1 ebenfalls die Geschwindigkeit  $\dot{x}_{n+1}(t) = 0$  zugewiesen. Hat das Fahrzeug n dagegen eine positive Geschwindigkeit, muß dem Folgefahrzeug eine Geschwindigkeit zugewiesen werden, die größer ist als null, weil dieses Fahrzeug wegen des Ausdrucks  $\dot{x}_{n+1}(t)$  im Zähler der Fahrzeugfolgegleichung sonst keine positive Geschwindigkeit mehr erreichen könnte.
- f) Unterschreitet der Netto-Abstand  $\Delta x_N(t)$  den Wert von 1.5 [m] (bzw. wird der Bruttoabstand  $\Delta x(t) < 6.5$  [m]), ist er außerdem kleiner als der im vorangegangenen Rechenschritt errechnete Abstand, ist die Geschwindigkeit kleiner als 1.5 [m/sec] und ist die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs gleich null, dann befindet sich das betrachtete Fahrzeug auf einer "Schleichfahrt" in Richtung auf das stehende Fahrzeug n. Die Fahrzeugfolgegleichung bewirkt nämlich, daß ein Annäherungsvorgang erst dann beendet ist, wenn die zwei Fahrzeuge den Abstand null erreicht haben. Deshalb wird in dieser Situation die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs ebenfalls auf den Wert null festgelegt.
- g) Wenn der Bruttoabstand gleich 5 [m] wird, ist der Nettoabstand zwischen den Fahrzeugen n und n+1 zu null geworden, das Folgefahrzeug n+1 ist also aufgefahren. Das aufgefahrne Fahrzeug bleibt ab diesem Zeitpunkt I2 stehen, während sich das Fahrzeug n weiterbewegt, da dessen kinematischen Größen schon über das gesamte Zeitintervall berechnet worden waren.
- h) Über die Fahrzeugfolgegleichung

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \frac{\lambda_{1,m} \cdot [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[\Delta x_{n+1}(t-\tau)]^1} [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)]$$

wird die Beschleunigung des Fahrzeugs n+1 errechnet. Überschreitet dabei die positive Beschleunigung den Maximalwert BMAX oder unterschreitet die negative Beschleunigung den Minimalwert BMIN, wird die Beschleunigung auf BMAX bzw. BMIN begrenzt.

i) Siehe Absch. II.2.2.4.

#### 2.2.4 Stabilitätsbetrachtung

Nach der Stabilitätsformel (vgl. Gl. (3.11)) für Kolonnenstabilität

$$\frac{\lambda_{1,m} \cdot v_{\min}^m}{\Delta x_{\min}} \cdot \tau \leq 0.5$$

wird für jeden Zeitschritt I ein Wert KRIT(I) errechnet:

$$\text{KRIT(I)} = \lambda_{1,m} \cdot \tau (\text{FALL, VE}) \cdot [\dot{x}_{n+1}(t)]^m / [\Delta x_N(t-\tau)]^1.$$

Überschreitet KRIT(I) den Wert 0.5, dann befindet sich das betrachtete Fahrzeug n+1 im Bereich der Kolonneninstabilität und damit in einem potentiell gefährlichen Abstandsbereich, also in dem Bereich unter der zu der gerade aktuellen Parameterkombination von  $l, m, \tau$  und  $\lambda$  gehörenden Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurve (vgl. Abb. 21).

Wie dort schon gezeigt wurde, weisen diese Grenzkurven für verschiedene l-m-Kombinationen und für verschiedene Werte von  $\lambda_{1,m} \cdot \tau$  einen unterschiedlichen Verlauf auf. Für die drei hier betrachteten Fälle Öffnen, Schließen und Bremslicht sind in Abb. 34 die Grenzkurven sowohl mit dem in Tabelle 2 (Absch. II.2.2.1) errechneten Mittelwert des Produkts  $\lambda_{1,m} \cdot \tau$  als auch mit der in der gleichen Tabelle angegebenen oberen und unteren Standardabweichung von  $\lambda_{1,m} \cdot \tau$  aufgezeichnet.

Betrachtet man an Abb. 34 zunächst nur die mittleren Kurven der drei Fälle, liegt die Kurve des Falles 3 (Bremslicht) am niedrigsten, gefolgt von der Kurve des Falles 2 (Schließen) und der des Falles 1 (Öffnen). Das beruht auf zwei Gründen:

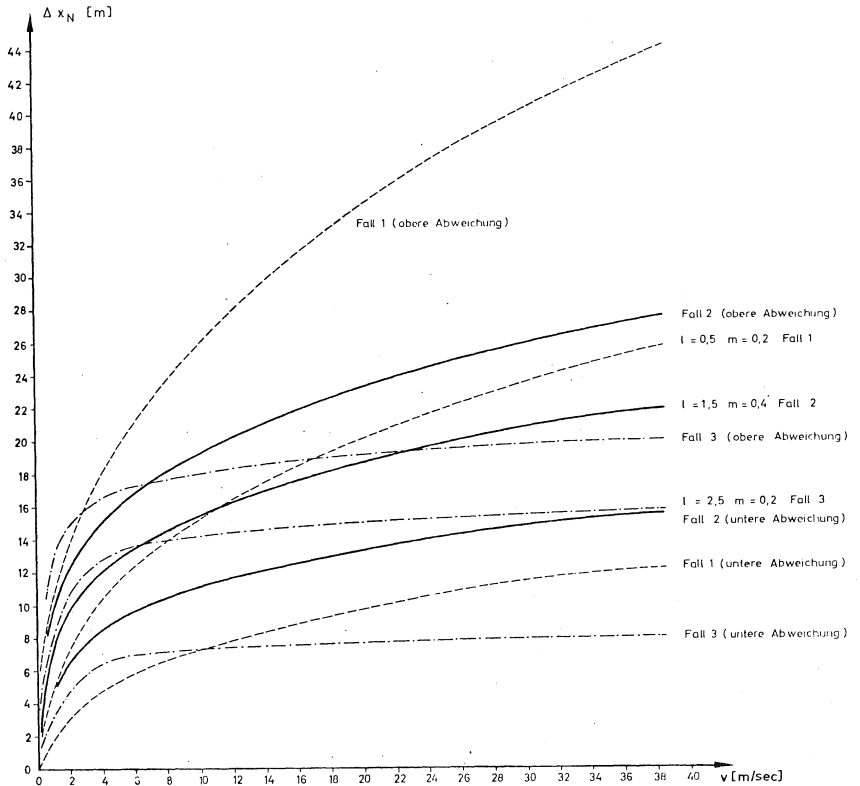


Abb. 34

1. Bei Fall 3 ist die mittlere Reaktionszeit geringer als bei Fall 2 und dort wiederum etwas geringer als bei Fall 1. Eine kleinere Reaktionszeit bedeutet aber (vgl. Absch. I.3.2.4), daß der stabile Bereich (also der Bereich oberhalb der entsprechenden Grenzkurve) größer ist. Das hat wiederum zur Folge, daß der Abstand bei gleicher Geschwindigkeit geringer sein kann als bei höheren Reaktionszeiten, ohne daß der Folgevorgang instabil wird, denn eine kleinere Reaktionszeit bewirkt eine schnellere Bereitschaft des Fahrers, auf Bewegungsänderungen zu reagieren, so daß er nur während eines relativ kurzen Zeitintervalles nach einer Bewegungsänderung des Vordermannes mit seiner Ausgangsgeschwindigkeit weiterfährt, bevor er selbst seine Geschwindigkeit ändert.



2. Nicht nur die Reaktionszeiten, sondern auch die Exponenten  $l$  und  $m$  haben auf die Stabilität einen Einfluß (vgl. Abb. 17b und 22). An Abb. 22 erkennt man, daß bei konstantem  $m$  (das kann für die drei Fälle näherungsweise angenommen werden) mit wachsendem  $l$  der während einer Bewegungsänderung auftretende Minimalabstand immer geringer werden kann, ohne daß der stabile Bereich verlassen wird. Für Fall 3 ist der Exponent  $l$  am größten. Er nimmt bei Fall 2 und Fall 1 immer weiter ab.

Betrachtet man beide Effekte zusammen, so können also sowohl durch kleinere Reaktionszeiten als auch durch höhere  $l$ -Werte die noch im stabilen Bereich liegenden Abstände geringer werden und am geringsten, wie hier, wenn beide Effekte zusammen auftreten.

Im Gegensatz zu den mittleren Kurven liegt die Kurve der unteren Abweichung für Fall 1 unter der des Falles 2, weil bei Fall 1 die Streuung der entsprechenden Parameter größer ist als bei den anderen Fällen.

Durch die Berechnung von KRIT wird also für jeden Fahrer zu jedem Zeitpunkt festgestellt, ob er sich - bezogen auf Kolonnenstabilität - im stabilen oder instabilen Bereich befindet. Natürlich kann die entsprechende Betrachtung auch für Einzelstabilität durchgeführt werden, bei der die Grenzkurven wegen des kleineren Faktors  $a$  (0.368 statt 0.5) wesentlich höher liegen. Es wurde aber aus folgendem Grund nur auf die Kolonnenstabilität eingegangen: Da in diesem Kapitel versucht wird, Kolonnenverkehr zu beschreiben, wie er heute beobachtet werden kann, und dabei auch relativ geringe Abstände auftreten (siehe Abb. 21), würde bei Verwendung der Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven für Einzelstabilität kaum ein Fahrer jemals aus dem instabilen Bereich herauskommen, weil die für Einzelstabilität notwendigen Abstände gegenüber den tatsächlich auftretenden Abständen unrealistisch groß sind. Es ist eine andere Frage, ob bei der Verwendung automatischer Abstandshilfen auf Grenzkurven der Kolonnen- oder der Einzelstabilität zurückgegriffen wird. Darauf wird aber im Abschn. II.3.2 näher eingegangen.

#### 2.2.5 Genereller Aufbau des Programms

Während die Prozedur FZ1 nur einmal benötigt wird, um die kinematischen Größen des Führungsfahrzeugs zu errechnen, muß die Prozedur FF innerhalb einer

Laufanweisung  $Z := 2(1)Q$  für jedes Folgefahzeug Z aufgerufen werden.

Weil zur Berechnung der kinematischen Größen eines Folgefahrzeugs Z die kinematischen Größen des vorausfahrenden Fahrzeugs Z-1 bekannt sein müssen, ist es notwendig, diese Daten solange zu speichern, bis die Berechnung für das Fahrzeug Z beendet ist. Deshalb beruht das Hauptprogramm auf dem in Abb. 35 angegebenen Schema.

Ergebnisse der Programmläufe sind in Kap. II.4 angegeben.

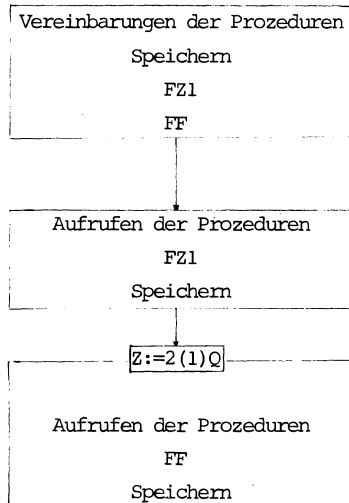


Abb. 35

### 3. Kolonnenverkehr mit Abstandswarngeräten

#### 3.1 Grundkonzeption

Die Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels zeigen, daß Auffahrunfälle aus dem (teilweise menschlich bedingten) Unvermögen der Fahrer resultieren können, ihre Fahrweise den gegebenen Verkehrsumständen richtig anzupassen. Dazu zählt im besonderen Maß das Unvermögen, einen der augenblicklichen Geschwin-

digkeit angepaßten Abstand einzuhalten. Während allerdings über die eigene Geschwindigkeit der Tachometer eine exakte Auskunft gibt, ist ein entsprechendes Gerät für den Abstand bisher in den Fahrzeugen nicht eingebaut. Dabei muß aber bedacht werden, daß die Anzeige des augenblicklichen Abstands allein nicht ausreicht, um dem Fahrer eine wirkungsvolle Information über sein Verhalten anzugeben, da er nicht in der Lage ist, die Angaben über Geschwindigkeit und Abstand so miteinander zu koppeln, um daraus Schlüsse für sein Verhalten zu ziehen. Es muß dem Fahrer also außerdem angezeigt werden, wie sein augenblicklicher Abstand in Bezug zu anderen kinematischen Größen zu beurteilen ist.

Eine solche Beziehung liefert aber das auf der Fahrzeugfolgegleichung beruhende Stabilitätskriterium (Gl. (3.13)). Damit können Aussagen über die "Güte" des Abstandes gemacht werden, denn dieses Kriterium führt ja zu Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven (z. B. Abb. 34), deren Verlauf von den Parametern  $l$ ,  $m$ ,  $\tau$  und  $\lambda_{1,m}$  abhängt.

Die Anwendung dieses Kriteriums gibt also die Antwort darauf, welche kinematischen Größen in Bezug zum Abstand gebracht werden müssen, um eine Aussage über die Güte des Abstandes machen zu können: wie aus Gl. (3.13) ersichtlich, ist dazu nur die Eigengeschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs notwendig. Die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs muß also nicht explizit berücksichtigt werden. +)

Schon in Kap. II.2 wurde bei der Beschreibung des Kolonnenfahrens erwähnt, daß gerade die für die Konstruktion der Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven wesentlichen Parameter  $l$ ,  $m$ ,  $\tau$  und  $\lambda_{1,m}$  einmal von Fahrer zu Fahrer als auch für die einzelnen Fahrer unterschiedlich sein können.

---

+)

Das Stabilitätskriterium wurde ja aus der Fahrzeugfolgegleichung abgeleitet, in der die Relativgeschwindigkeit auftritt. Da hier davon ausgegangen wird, daß sich ein Fahrer entsprechend der Fahrzeugfolgegleichung verhält (d.h.: bei kolonnenstabilem Verhalten werden über die Fahrzeugfolgegleichung nur solche kinematischen Größen für die Folgefahrzeuge errechnet, die dazu führen, daß z. B. bei einer sinusförmigen Bewegungsänderung des Führungsfahrzeugs die Amplituden der Geschwindigkeitganglinien von Fahrzeug zu Fahrzeug weiter abklingen oder im Grenzfall gerade gleichgroß bleiben (Definition der Kolonnenstabilität, vgl. Absch. I.2.2.1)), bedeutet das also auch, daß die Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven nicht nur für den Fall gleicher Geschwindigkeiten der Fahrzeuge einer Kolonne gelten.

Bei der Konzeption eines Abstandswarngerätes muß dies natürlich berücksichtigt werden.

Außerdem wurde davon ausgegangen, daß es nicht ausreicht, bei der Anzeige über die Güte des Abstands nur zwei Bereiche zu unterscheiden, nämlich den Bereich genügend großer Abstände (freier Bereich) und den Bereich zu geringer Abstände. Deshalb wurde dieser Bereich in zwei Teilbereiche unterteilt:

gelber Bereich (Abstand ist nicht mehr genügend groß);  
roter Bereich (Abstand ist extrem gefährlich).

### 3.2 Kriterien für die Auswahl der Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven

Die wichtigste Frage, die zunächst geklärt werden muß, ist, ob für das Abstandswarngerät Kolonnen- oder Einzelstabilität zugrunde gelegt werden soll. Bei Einzelstabilität wird die Entscheidung zugunsten eines absolut sicheren Fahrens getroffen. Ein nicht zu vernachlässigender Nachteil dieser Lösung liegt allerdings darin, daß dann die Leistungsfähigkeit einer Strecke wegen der dabei notwendigen sehr großen Abstände zwischen den Fahrzeugen gegenüber heutigen Leistungsfähigkeiten stark absinkt. Es muß zwar durch Abstandswarngeräte erreicht werden, daß die Abstände gegenüber Abständen im heutigen Kolonnenverkehr größer werden. Eine zu starke Anhebung würde aber auf das Unverständnis vieler Fahrer stoßen und deshalb die Gefahr implizieren, daß die Abstandswarnung, weil sie schon bei sehr großen Abständen erfolgt, nicht mehr beachtet wird. Aus diesen Gründen wurde statt der Einzelstabilität nur die Kolonnenstabilität in Betracht gezogen, d.h. die Auswahl der für das Abstandswarngerät in Frage kommenden Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven erfolgt nur aus der Schar von Kurven, von denen einige in Abb. 36 aufgezichnet sind. Da aber gerade dann, wenn nur noch relativ sicheres Fahren betrachtet wird, nicht vom mittleren Verhalten der Fahrer ausgegangen werden darf, müssen solche Grenzkurven gewählt werden, die für die meisten Fahrer ein stabiles Verhalten gewährleisten.

Grundlegend gilt nun, daß das Gerät auf zwei Fälle reagieren kann, nämlich auf den Fall des Öffnens und auf den Fall des Schließens <sup>+)</sup> . (Der Fall

---

+) Es wird hier nur von normalen Fahrbahnverhältnissen ausgegangen und nicht berücksichtigt, daß bei Nässe, Schnee- oder Eisglätte durch die dann schlechteren Bremseigenschaften entsprechend andere Grenzkurven maßgebend sein können.

Bremslicht kann nicht berücksichtigt werden, da ein solches Gerät nicht feststellen kann, ob beim vorausfahrenden Fahrzeug die Bremslichter aufleuchten oder nicht.) Dazu müßte das Gerät zunächst feststellen, ob  $\Delta \dot{x}$  größer oder kleiner als null ist (d.h. die Relativgeschwindigkeit messen) und dann für jeden Fall zwei Grenzen abfragen (Grenze zwischen freiem und gelbem Bereich und Grenze zwischen gelbem und rotem Bereich). Technisch einfacher realisieren läßt sich die Anzeige allerdings dann, wenn statt der vier hierfür notwendigen Grenzen nur zwei berücksichtigt werden, nämlich die ungünstigsten (weil dann die Messung der Relativgeschwindigkeit nicht notwendig ist). Betrachtet man Abb. 36, so zeigt sich, daß aus den genannten Forderungen (Betrachtung nicht der Mittelwerte, sondern der auf der sicheren Seite liegenden Werte und Berücksichtigung nur der ungünstigsten Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven) als Grenzen der Bereiche die zwei obersten Kurven in Frage kommen:

1. Grenze 1 zwischen freiem und gelbem Bereich: Fall 1 (obere Abweichung)

$$\text{mit } 1.61 \cdot \dot{x}^{0.2} / \Delta x_N^{0.5} = 0.5$$

2. Grenze 2 zwischen gelbem und rotem Bereich: Fall 2 (obere Abweichung)

$$\text{mit } 16.9 \cdot \dot{x}^{0.4} / \Delta x_N^{1.5} = 0.5. \quad +)$$

Nach Abb. 29 ergibt sich aus den Verteilungsfunktionen  $H(\lambda, \tau)$ , daß bezogen auf Fall 1 85%, bezogen auf Fall 2 ebenfalls 85% der Fahrer Werte des Produkts  $\lambda \cdot \tau$  aufweisen, die kleiner sind als die in die Grenzen eingegangenen Werte von  $\lambda \cdot \tau = 1.61$  für Fall 1 und  $\lambda \cdot \tau = 16.9$  für Fall 2. Berücksichtigt man außerdem, daß die Grenze 1 nicht nur für Öffnen, sondern auch für Schließen gilt und approximiert diese Kurve mit den Exponenten  $l = 0.5$  und  $m = 0.2$  durch eine Kurve mit den Exponenten  $l = 1.5$  und  $m = 0.4$ , so ergibt

---

+) Auch wenn bei der Auswahl der Kurven nur diejenigen berücksichtigt wurden, die aus der oberen Standardabweichung resultieren, muß dennoch betont werden, daß es sich bei den beiden Grenzen 1 und 2 um Grenzkurven zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität handelt. Bei der praktischen Anwendung wäre es deshalb denkbar, aus diesem Grunde etwas höher liegende Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurven zu wählen, auch deshalb, damit eine zusätzliche Sicherheit gegen eventuell auftretende Meßfehler vorhanden ist. Allerdings dürften erst praktische Fahrversuche darüber genaueren Aufschluß geben.

sich dafür ein Produkt  $\lambda \cdot \tau$  von 27.5. Dieses Produkt wird aber von keinem Fahrer überschritten: die Verteilungsfunktion  $H(\lambda, \tau)$  für Fall 2 umfaßt nur Werte  $\leq 27$  (Abb. 29). Das bedeutet auch, daß gerade für den Fall Schließen, der ja häufiger zu gefährlichen Situationen führt als der Fall des Öffnens, durch die gewählte Grenzkurve ein kollektiv-stabiles Verhalten in den meisten Fällen gewährleistet ist.

Stellt man dem durch die Stabilitätsbetrachtungen als günstig definiertem Bereich den tatsächlich auftretenden Bereich von Abständen gegenüber (Abb. 36) erkennt man, daß durch Einhaltung der Anzeige des Abstandswarngeräts die Abstände insgesamt erhöht würden. In Abb. 36 liegt der günstige Bereich oberhalb von Grenze 1, während der Bereich der tatsächlich auftretenden Abstände durch die Kurven  $ZF1 = 0$  und  $ZF1 = 1$  begrenzt ist (mit  $ZF1 = 0.5$  als einem mittleren Abstandsverhalten). Dieser Bereich umfaßt die Ergebnisse vieler Beobachtungen und wurde von WIEDEMANN (31) in einem Simulationsmodell zur Beschreibung des Verkehrsflusses benutzt, um Folgeabstände (bei etwa gleicher Geschwindigkeit des Führungs- und Folgefahrzeugs) zu ermitteln<sup>4)</sup>. Selbst die Grenze zwischen gefährlichem (gelbem) und extrem gefährlichem (rotem) Bereich (= Grenze 2) entspricht ungefähr erst dem heutigen mittleren Verhalten; das bedeutet, daß ungefähr 50% der Abstände so gering sind, daß bei Vorhandensein eines Abstandswarngeräts das rote Warnlicht aufleuchten würde.

An dieser Stelle ist es auch angebracht, die für das Abstandswarngerät gewählten Grenzen solchen Abständen gegenüberzustellen, die aufgrund der kinematischen Eigenschaften der Fahrzeuge notwendig wären, um bei einem Bremsmanöver eines Fahrzeugs für das nachfolgende Fahrzeug bei relativ sicherem Abstand noch einen Auffahrunfall zu vermeiden.

Der dafür erforderliche Minimalabstand errechnet sich aus der Differenz der Anhaltewege beider Fahrzeuge. Es wird angenommen, das vorausfahrende Fahrzeug n beginne zum Zeitpunkt  $t_0$  zu bremsen. Dann ist sein Bremsweg bis zum Stillstand

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

Der Fahrer des Fahrzeugs n+1 fährt während der Reaktionszeit  $\tau$  noch mit der Ausgangsgeschwindigkeit  $v_{n+1}$  und beginnt dann ebenfalls zu bremsen. Sein

---

4) Zur Definition des Bereichs verwendete WIEDEMANN die Funktion

$$\Delta x_N = 2 ZF1 + (1 + 7 ZF1) \sqrt{x},$$

wobei  $ZF1$  eine (0,5, 0,15)-normalverteilte Zufallszahl ist.

Anhalteweg errechnet sich zu

$$s_{n+1} = v_{n+1} \cdot \tau + \frac{v_{n+1}^2}{2b_{n+1}}$$

so daß sich der minimale Folgeabstand zu

$$\Delta x_{\min} = v_{n+1} \cdot \tau + 0.5 \left( \frac{v_{n+1}^2}{b_{n+1}} - \frac{v_n^2}{b_n} \right)$$

ergibt. Legt man, um die hieraus resultierenden Abstände an dem Beispiel einer Vollbremsung zu verdeutlichen, die folgenden Daten zugrunde

$$b_n = -7.5 \text{ [m/sec}^2\text{]}$$

$$b_{n+1} = -5.0 \text{ [m/sec}^2\text{]}$$

$$\tau = 1 \text{ [sec]}$$

$$v_{n+1} = v_n,$$

so ergibt sich die in Abb. 36 aufgezeichnete Bremswegparabel.

Ein Vergleich dieser Kurve mit den gewählten Grenzen zeigt, daß für dieses Beispiel bis zu einer Geschwindigkeit von 15 [m/sec] die Parabel unter der Grenze 2, bis zu einer Geschwindigkeit von 21 [m/sec] unter der Grenze 1 und ab dieser Geschwindigkeit oberhalb von Grenze 1 liegt. Das bedeutet, daß Grenze 1 für dieses Beispiel oberhalb von  $v = 21$  [m/sec] keinen sicheren Abstand mehr angeben würde.

Auch Beispiele mit anderen Daten liefern ähnliche Parabeln (je nach den gewählten Daten mit steilerem oder flacherem Verlauf), die aber alle die Eigenschaft haben, die Grenzkurven zu schneiden und somit ab diesen Schnittpunkten größere Abstände angeben als die Grenzkurven.

Gegen die Verwendung solcher Bremswegabstände bei der Konzeption von Abstandswarngeräten sprechen aber mehrere Gründe:

1. Große Abstände innerhalb von Kolonnen werden immer wieder zum Einscheren benutzt und somit verkleinert. Richtete sich nun ein Fahrer nach einem Abstandswarngerät, dessen Konzeption auf der Bremswegformel beruht, wäre er wegen dieses Effektes andauernd gezwungen zu verzögern, um wieder

einen von diesem Abstandswarngerät als günstig angezeigten Abstand zu erreichen. Zwei negative Auswirkungen können dann die Folge sein:

- Es besteht die Gefahr, daß die Anzeige nicht mehr beachtet wird.
- Das (vom Hintermann vielleicht sogar als unbegründet angesehene) Verzögern kann zu weiteren Instabilitäten führen.

Ein Abstandswarngerät sollte also das Abstandsniveau gegenüber dem heutigen Zustand anheben, aber nicht so weit, daß sich die Mehrzahl der Fahrer nicht mehr an die Anzeige hält. Dieser Forderung scheinen die gewählten Grenzen gerecht zu werden. Außerdem kann kein Abstandswarngerät dem Fahrer die Verantwortung abnehmen, sich der Situation entsprechend zu verhalten. Es kann den Fahrer bei seinen Entscheidungen nur durch die Angabe zusätzlicher Informationen unterstützen.

2. Bei Kolonnenverkehr (aus dessen mathematischer Beschreibung heraus die dem Abstandswarngerät zugrunde liegenden Grenzen abgeleitet wurden und wofür das Gerät also konzipiert ist) treten in aller Regel keine Höchstgeschwindigkeiten auf (vgl. dazu die Form des Fundamentaldiagramms; Abb. 24), so daß dieser Geschwindigkeitsbereich, in dem ja erst die Bremsabstände teilweise sehr viel größer werden können als die aus dem Stabilitätskriterium ermittelten Abstände, für die Festlegung der Grenzkurven nicht maßgebend sein sollte.

Dennoch können auch gelegentlich auf einer verhältnismäßig freien Strecke einige schnellfahrende Fahrzeuge beobachtet werden, die dicht hintereinander herfahren. In solchen Verkehrssituationen ist aber ein plötzliches Bremsmanöver z. B. des Führungsfahrzeugs weit weniger wahrscheinlich als bei höheren Verkehrsdichten.

Außerdem soll auch der folgende Punkt nicht unerwähnt bleiben: Durch die Messung nur des Abstands und der Eigengeschwindigkeit und nicht noch der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs, die bei der Anwendung der Bremswegformel als Grundlage eines Abstandswarngeräts notwendig wäre, sind weniger Fehlerursachen durch Fehlmessungen oder Meßungenauigkeiten vorhanden.

Ein Abstandswarngerät, das auf der in diesem Abschnitt erläuterten Konzeption beruht, schließt die Gefahr von Auffahrunfällen nicht vollständig aus.



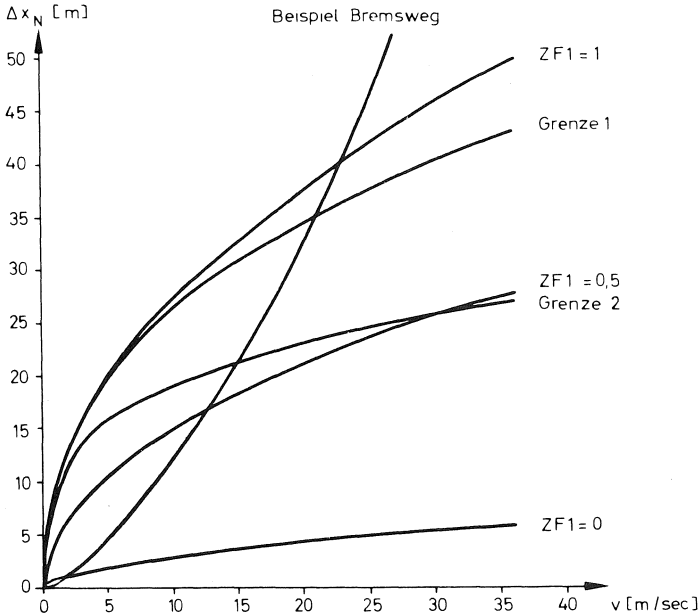


Abb. 36

Es kann aber angegeben werden, in welchen Bereichen der oberen Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurve (Grenze 1) welche Sicherheit gegen Auffahrunfälle gegeben ist, wenn folgende Annahmen getroffen werden:

Ein Fahrzeug n+1 fahre mit konstanter Geschwindigkeit  $v_{n+1}$  auf ein Fahrzeug n mit geringerer Geschwindigkeit  $v_n$  zu, bis Grenze 1 erreicht ist (dabei wird angenommen, daß der Abstand zunächst genügend groß war)<sup>+)</sup> . Bei Erreichen dieser Grenzkurve benötige der Fahrer noch 0.5 [sec], um einen Verzögerungsvorgang einzuleiten. Die über den gesamten Geschwindigkeitsbereich gemittelte maximale Verzögerung des Fahrzeugs n+1 betrage  $b_{n+1} = -5$  [m/sec<sup>2</sup>].

<sup>+)</sup>  Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu den bisherigen Annahmen, die ja davon ausgehen, daß sich ein Fahrer so verhält, wie es durch die Fahrzeugfolgegleichung beschrieben wird. Danach müßte nämlich der Fahrer schon vor Erreichen von Grenze 1 einen Verzögerungsvorgang eingeleitet haben, weil  $\Delta \dot{x} < 0$  ist.

Fall 1: Absolut sicherer Bremswegabstand ( $v_n = 0$ )

Einen absolut sicheren Bremswegabstand gibt der in Abb. 37 stark ausgezeichnete Bereich von Grenze 1 an, in dem das Fahrzeug n+1 noch rechtzeitig hinter dem stehenden Fahrzeug n zum Halten kommt. Dieser Bereich liegt zwischen  $v = 0$  und  $v = 15$  [m/sec] (= 54 [km/h]); er umfaßt also die im Stadtverkehr üblichen Geschwindigkeiten.

Fall 2: Relativ sicherer Bremswegabstand ( $v_n \approx v_{n+1}$ ).

In Anlehnung an das in diesem Abschnitt schon erwähnte Beispiel einer Bremswegparabel (Abb. 36) wird auch hier angenommen, daß die Maximalverzögerung des Fahrzeugs n einen Wert von  $b_n = -7.5$  [m/sec<sup>2</sup>] annehmen kann. Die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge n und n+1 sollen sich während des Annäherungsvorgangs bis zum Beginn der Verzögerung nur geringfügig voneinander unterscheiden ( $v_n = v_{n+1} - 1$  [m/sec]). Damit kann der Bereich des relativ sicheren Bremswegabstandes definiert werden: er liegt zwischen den Grenzwerten  $v = 15$  [m/sec] und  $v = 26$  [m/sec] (= 94 [km/h]) (siehe Abb. 37). Das ist aber auch gerade ein für Kolonnenverkehr charakteristischer Geschwindigkeitsbereich.

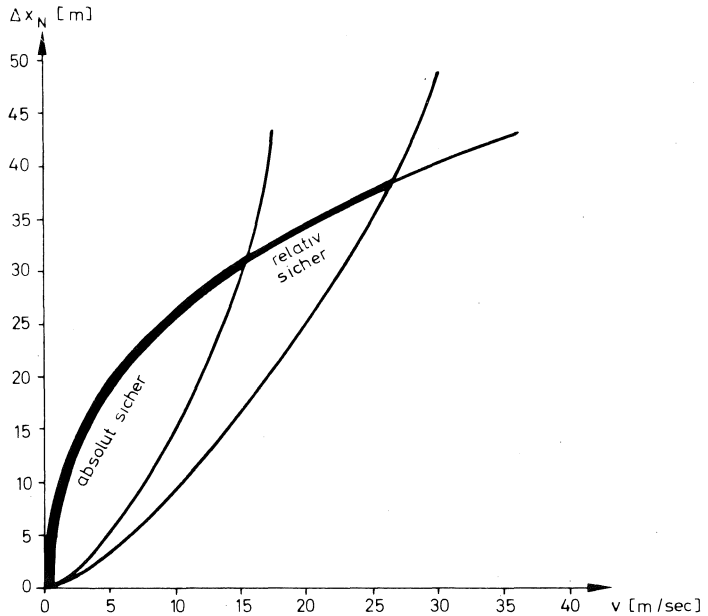


Abb. 37

Oberhalb dieses Grenzwertes von  $v = 26 \text{ [m/sec]}$  ist eine solche Sicherheit unter den genannten Voraussetzungen nicht mehr gegeben. Allerdings ist auch in diesem Bereich von Grenze 1 gewährleistet, daß kein Auffahrunfall geschieht, wenn man bei sonst unveränderten Bedingungen wie oben gleiche Verzögerungseigenschaften beider Fahrzeuge (also  $b_n = -5 \text{ [m/sec}^2\text{]}$ ) annimmt.

### 3.3. Wirkungsweise des Abstandswarngeräts

Durch die in Absch. II.3.2 definierten Grenzen wird also der Abstand in Beziehung zur Eigengeschwindigkeit gebracht, womit es möglich ist, eine Aussage über das Abstandsverhalten zu machen. Die Anzeige selbst könnte z. B. entsprechend Abb. 38 gestaltet werden.

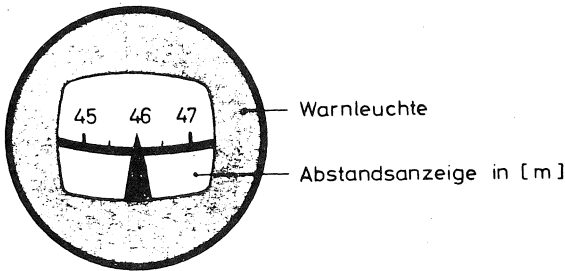


Abb. 38

Die Warnleuchte gibt Auskunft über die Gefährlichkeit des Abstands, wobei sie bei einer Abstands-Geschwindigkeits-Kombination unter der Grenze 2 rot und bei einer Abstands-Geschwindigkeits-Kombination zwischen Grenze 1 und Grenze 2 gelb aufleuchtet. Zusätzlich zum Aufleuchten des roten Warnlichts kann auch noch ein akustischer Warnton erfolgen. Ob bei Abstands-Geschwindigkeitskombinationen oberhalb von Grenze 1 ein grünes Licht oder überhaupt kein Licht aufleuchten soll, kann hier nicht endgültig entschieden werden (gegen ein grünes Licht spricht z. B. ., daß ein Abstand, der gerade ober-

halb von Grenze 1 liegt, nicht unbedingt von jedem Fahrer in jeder Verkehrssituation schon als günstig angesehen wird). Auch müßte die gesamte Anzeigengestaltung dahingehend untersucht werden, inwieweit sie auf den Fahrer einen positiven oder negativen Gewöhnungseffekt bewirkt.

Da der Abstand zum Vordermann sowieso gemessen wird <sup>+) ,</sup> wird es technisch nicht schwierig zu realisieren sein, ihn auch noch direkt anzuzeigen. Das kann z. B. durch eine in die Warnleuchte eingebaute Anzeige geschehen, die nach dem Prinzip des Lupentachometers mit festem Zeiger und beweglichem Zahlenband arbeitet.

Durch die beschriebene Anzeige wird der Fahrer auf zweierlei Weise beeinflusst:

1. Beim Aufleuchten des gelben oder roten Warnlichts (und eventuell durch den akustischen Warnton) wird sein Aufmerksamkeitsgrad erhöht. Ein höherer Aufmerksamkeitsgrad bewirkt aber eine Verringerung der Reaktionszeit (dabei speziell der Wahrnehmungszeit). Ein Beweis für diese Annahme sind die in Tabelle 1 (Absch. II.2.2.1) angegebenen Werte für die Reaktionszeiten beim Aufleuchten der Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs, die ja weit unter den für die anderen Fälle ermittelten Reaktionszeiten liegen, wobei das Aufleuchten der Bremslichter sehr gut verglichen werden kann mit dem Aufleuchten des gelben oder roten Warnlichts der Anzeige, da aufleuchtende Bremslichter auch als eine Abstandswarnung betrachtet werden können.
2. Um beim Aufleuchten des gelben oder roten Warnlichts wieder in einen günstigeren Abstandsbereich zu gelangen, wird ein Fahrer seine Beschleunigung (bzw. Verzögerung) so verändern, daß sich der Abstand wieder vergrößert.

In den nächsten Abschnitten sollen nun die Unterschiede zwischen dem Verhalten von Kolonnen mit Abstandswarngeräten zum in Absch. II.2.3. beschriebenen Verhalten ohne Abstandswarngeräte mit Hilfe eines um die oben erwähnten zwei Punkte erweiterten Rechenprogramms aufgezeigt werden.

---

+) Die Messung des Abstandes zu einem vorausfahrenden Fahrzeug kann zur Zeit noch nicht als gelöst angesehen werden. Die Entwicklung solcher Geräte durch die Industrie wird aber vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert.

### 3.4 Rechenprogramm

#### 3.4.1 Verringerung der Reaktionszeit

Der aus der Anzeige des Abstandswarngeräts resultierende höhere Aufmerksamkeitsgrad hat eine Verringerung der Reaktionszeit zur Folge. Im Rechenprogramm wurde nun angenommen, daß diese Verringerung von der gerade herrschenden Situation bzw. von der Gefährlichkeit des Abstands abhängig ist. Die Gefährlichkeit wird durch einen Faktor K ausgedrückt, der Werte zwischen 1 und 4 annehmen kann und bewirkt, daß die Reaktionszeit des einzelnen Fahrers je nach der Größe von K verringert wird, wobei für  $K = 1$  keine Veränderung und für  $K = 4$  die größte Verringerung eintritt:

$$\tau(K, \text{FALL}, \text{VE}) := \tau(1, \text{FALL}, \text{VE}) \cdot (1.1 - 0.1 \cdot K)$$

$K=2$  bewirkt dementsprechend eine 10-prozentige,  $K=3$  eine 20-prozentige und  $K=4$  eine 30-prozentige Verringerung. Die Einführung von K hat außerdem zur Folge, daß für  $\tau$  eine weitere Indizierung notwendig ist, d.h.: statt  $\tau(\text{FALL}, \text{VE})$  wird ab jetzt  $\tau(K, \text{FALL}, \text{VE})$  verwendet.

Ändert sich bei einem Fahrer die Reaktionszeit  $\tau$ , so muß sich auch das dazugehörige  $\lambda$  ändern. Es existiert zwar für jeden Fahrer bei jeder l-m-Kombination ein optimales Wertepaar  $(\tau, \lambda)$ , bei dem die Restabweichung, also die Differenz zwischen der tatsächlich beobachteten Beschleunigung und der über die Fahrzeugfolgegleichung errechneten Beschleunigung am geringsten ist, es gibt aber auch für alle anderen  $\tau$ -Werte ein dazugehöriges optimales  $\lambda$ , für das die Restabweichung dann zwar größer ist als bei der optimalen Kombination, aber immer noch kleiner als bei beliebigen sonstigen  $\lambda$ -Werten.

Zwischen der Reaktionszeit  $\tau$  eines Fahrers und  $\lambda$  besteht ein funktionaler Zusammenhang  $\lambda = f(\tau)$ . Dieser unterscheidet sich zwar von Fahrer zu Fahrer und innerhalb der einzelnen Fälle, hat aber prinzipiell immer einen ähnlichen Verlauf (Abb. 39, schwach ausgezogene Kurven). Deshalb konnte eine aus den einzelnen Funktionen gebildete mittlere Funktion errechnet werden, die den ungefähren Verlauf aller tatsächlichen Funktionen wiedergibt (Abb. 39, stark ausgezeichnete Kurven).

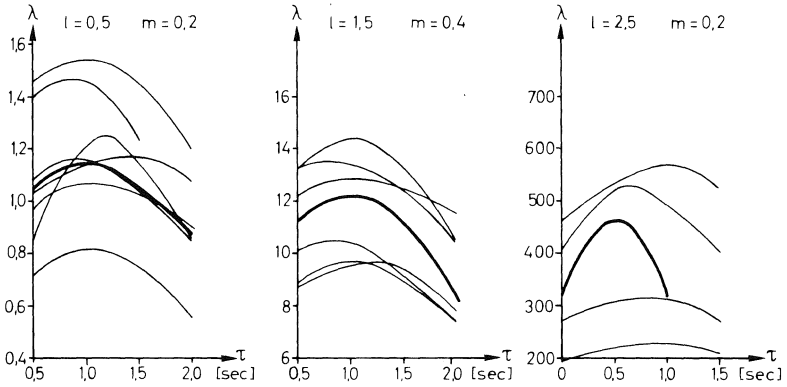


Abb. 39

Die meisten Funktionen weisen einen parabelförmigen Verlauf auf

$$\lambda = a \tau^2 + b \tau + c$$

und erfüllen die folgenden Bedingungen wenigstens näherungsweise:

1. Das Maximum der Kurven liegt bei  $\tau = \tau_{opt}$  und  $\lambda = \lambda_{opt}$ , also

$$\left. \frac{d\lambda}{d\tau} \right|_{\tau = \tau_{opt}} = 0$$

2. Daraus ergeben sich auch die Koordinaten eines Punktes zu

$$P(\tau_{opt}, \lambda_{opt})$$

3. Die Koordinaten eines weiteren Punktes erhält man aus der Bedingung, daß für  $\tau = 0.5 \tau_{opt}$   $\lambda$  im Mittel  $0.92 \lambda_{opt}$  ist, zu

$$P(0.5 \tau_{opt}, 0.92 \lambda_{opt})$$

Damit errechnet sich die gemittelte Funktion  $\lambda = f(t)$  zu

$$\lambda = \frac{-0.08 \lambda_{opt}}{0.25 \tau_{opt}^2} (\tau - \tau_{opt})^2 + \lambda_{opt}$$

$\tau_{opt}$  ist der Wert der Reaktionszeit für  $K = 1$  und  $VE = 0$ , entsprechendes gilt für  $\lambda_{opt}$ ;  $\tau$  und  $\lambda$  sind dann die durch  $K > 1$  veränderten Werte. Bei den in Abb. 39 eingezeichneten gemittelten Kurven wurden für  $\tau_{opt}$  und  $\lambda_{opt}$  die in den beiden Tabellen des Absch. II.2.2.1 angegebenen Mittelwerte  $\bar{\tau}$  und  $\bar{\lambda}$  der drei Fälle eingesetzt.

Die Unterschiede gegenüber der bisherigen Berechnung der Reaktionszeiten sind in Abb. 40 als Strukturdiagramm aufgezeichnet und im folgenden erläutert:

- a) Für alle drei Fälle und für jeden Wert von  $K$  wird die Reaktionszeit errechnet und in eine durch 0.05 teilbare Zahl umgeformt (vgl. Absch. II.2.2.1).
- b) Die Verringerung von  $\tau$  tritt bei Fall 3 (= Bremslicht) nicht in Kraft, da die für diesen Fall errechnete Reaktionszeit mit  $K=1$  als die kleinstmögliche Reaktionszeit eines Fahrers angesehen wird.
- c) Die Reaktionszeiten für die Fälle 1 und 2 dürfen für  $VE=0$  die Reaktionszeit  $\tau(1, 3, 0)$  nicht unterschreiten, da sie in b) als der kleinstmögliche Wert definiert wurde.
- d) Entsprechend dürfen die Reaktionszeiten für die Fälle 1 und 2 nicht kleiner werden als 0.5 [sec] (vgl. Abb. 29).
- e) Berechnung des neuen Wertes von  $\lambda_{1,m}$  bei Änderung von  $\tau$ .
- f) Mit  $ENT 1 = 1$  wird der folgende Programmteil übersprungen (das bedeutet: kein Abstandswarngerät).
- g) Durch diese Abfrage wird verhindert, daß schon während des Zeitintervalls, in dem noch keine Reaktion auf Bewegungsänderungen erfolgt, das Abstandswarngerät in Funktion tritt.
- h) Aus den aktuellen Werten der Geschwindigkeit und des Nettoabstandes werden entsprechend den in Absch. II.3.2 angegebenen Gleichungen für Grenze 1 und Grenze 2 die jeweils aktuellen Werte

$$GR1 = V(I)^{0.2} / (\Delta X(I) - 5)^{0.5}$$

bzw.

$$GR2 = V(I)^{0.4} / (\Delta X(I) - 5)^{1.5}$$

errechnet. Dadurch wird festgestellt, in welchem Abstands-Geschwindigkeitsbereich sich das betrachtete Fahrzeug gerade befindet. Daß bei der Berechnung von  $GR1$  und  $GR2$  im Gegensatz zur Berechnung von  $B(I)$  und  $KRIT(I)$  der Nettoabstand als Funktion von  $I(\hat{=t})$  und nicht von  $ID(\hat{=t}-\tau)$

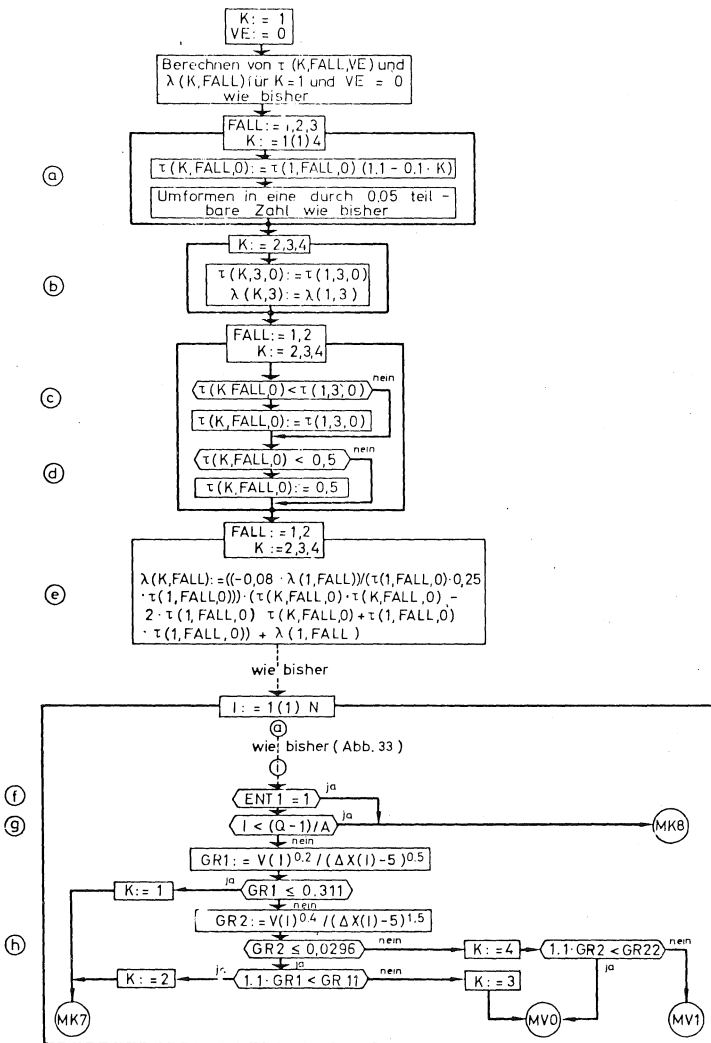


Abb. 40



auftritt, liegt daran, daß das Abstandswarngerät keine Reaktionszeit hat (bzw. daß seine Reaktionszeit vernachlässigt wird). Das hat außerdem den Vorteil, daß bei einer Abstandsverkleinerung, die ja eher zu kritischen Situationen führen kann, ein geringerer Abstand bei der Berechnung von GR1 und GR2 berücksichtigt wird als bei Verwendung von ID, so daß dadurch ein zusätzlicher Sicherheitseffekt auftritt, weil  $\Delta x_N$  im Nenner steht.

Ist  $GR1 > 0.311$ , ist der Abstand genügend groß und K wird der Wert eins zugewiesen. Unterschreitet GR1 den Wert 0.311 (= 0.5/1.61), dann befindet sich das Fahrzeug entweder im gelben oder roten Bereich.

Deshalb wird dann abgefragt, ob GR2 kleiner als 0.0296 (= 0.5/16.9) ist. Wenn das der Fall ist, befindet sich das Fahrzeug im gelben Bereich, sonst im roten Bereich.

Innerhalb des gelben Bereichs werden nun zwei unterschiedliche Aufmerksamkeitsgrade definiert: Ist gegenüber dem vorangegangenen Zeitschritt I-1 eine mindestens 10-prozentige Verbesserung eingetreten (das wird abgefragt durch  $1.1GR1 < GR11$ , wobei GR11 der im Zeitschritt I-1 errechnete Wert von GR1 ist), dann wird K gleich zwei gesetzt, ist eine geringere Verbesserung oder auch eine Verschlechterung eingetreten, wird K gleich drei gesetzt. Im roten Bereich wird für K der Wert vier vereinbart (also die maximale Reduzierung der Reaktionszeit). Erst danach wird abgefragt, ob auch hier eine mindestens 10-prozentige Verbesserung gegenüber dem vorangegangenen Zeitschritt erfolgt ist oder nicht. Der Unterschied liegt dann in einem Sprung zur Marke MVO oder MV1, die zu verschiedenartigen Veränderungen der Beschleunigung führen (vgl. Absch. II.3.4.2).

### 3.4.2 Veränderung der Beschleunigung

Befindet sich ein Fahrer im gelben oder roten Bereich, ist eine Verringerung der Reaktionszeit nicht die einzige Folge. Der Fahrer wird versuchen, durch Veränderung seiner Beschleunigung wieder einen größeren Abstand zu erreichen, wobei auch hier die Stärke der Veränderung eine Funktion der herrschenden Verkehrssituation ist. Wie nun die Veränderung der Beschleunigung vor sich geht, wie sie vom Temperament des einzelnen Fahrers und von anderen Faktoren abhängt, läßt sich nicht im einzelnen beantworten. Wenn ein Fahrer aber überhaupt auf die Anzeige seines Abstandswarngeräts reagiert, dann auf jeden Fall durch eine Abstandsvergrößerung. Das in Abb. 41 aufgezeichnete Strukturdiagramm und die folgenden dazugehörigen Erläuterungen geben also nur eine Version von wahrscheinlich sehr vielen denkbaren Möglichkeiten der Reaktion auf die Anzeige des Geräts wieder. Deshalb wurden auch nur wenige Zufallseinflüsse (die z. B. die Verschiedenartigkeit der Fahrer u. a. ausdrücken könnten) berücksichtigt.

In dem erläuterten Rechenprogramm erfolgt die Änderung der Beschleunigung durch eine additive Vergrößerung der negativen Beschleunigung (Verzögerung) oder durch eine prozentuale Abnahme der positiven Beschleunigung, d.h.: die über die Fahrzeugfolgleichung errechnete Beschleunigung wird also additiv oder prozentual je nach der Verkehrssituation verändert.

Erläuterung der Abb. 41:

- a) In Abb. 40 wurden K-Werte vereinbart, deren Größe von der augenblicklichen Verkehrssituation abhängt und die eine Verringerung der Reaktionszeit bewirken. Diese K-Werte dienen nun auch dazu, ein Maß für die Veränderung der Beschleunigung anzugeben. Hat K den Wert 3 oder 4 (wobei bei vier aber die Situation im vorhergegangenen Zeitschritt ungünstiger gewesen sein muß), wird zur Marke MVO gesprungen, für die sonstigen Fälle bei K = 4 zur Marke MV1. Durch einen Sprung nach MVO werden einer Variablen ZK Werte zugewiesen, deren Größe von K abhängt, sofern überhaupt eine Verringerung der Beschleunigung notwendig ist. Keine Verringerung tritt nämlich ein, wenn die Relativgeschwindigkeit größer als null ist (wenn also das vorausfahrende Fahrzeug eine höhere Geschwindigkeit hat als das nachfolgende Fahrzeug) und die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht aufleuchten oder wenn zwar die Bremslichter aufleuchten, das Folgefahrzeug aber schon stärker bremst als das vorausfahrende Fahrzeug, weil in beiden Fällen sowieso schon eine Verbesserung der Situation eintritt.

In allen anderen Fällen wird ZK als Funktion von K so vereinbart, daß ZK Werte von K/4 oder K/2 annimmt.

Bei einem Sprung nach MV1 befindet sich das betrachtete Fahrzeug auf jeden Fall gerade im roten Bereich, deshalb muß die Veränderung der Beschleunigung kräftiger sein als bei MVO. Hier werden zwei Situationen unterschieden: Ist der Abstand schon gefährlich klein ( $\Delta x_n < 15$  [m]) und nähert sich das Folgefahrzeug dem vorausfahrenden Fahrzeug, das selbst bremst oder schon steht, dann beginnt der Fahrer des Folgefahrzeugs mit der maximalen Verzögerung  $B_{MIN}$  zu bremsen, um einen Auffahrunfall noch zu vermeiden. Sind dagegen diese Bedingungen nicht erfüllt, werden auch hier der Variablen ZK Werte als Funktionen von K zugewiesen, hier allerdings Werte von K/2 oder K.

- 
- +) Daß in der Abfrage die zusätzliche Bedingung enthalten ist, daß die eigene Geschwindigkeit  $\geq 15$  [m/sec] sein muß, ergibt sich aus kinematischen Überlegungen: Nimmt man an, die maximale Verzögerung eines Fahrzeugs im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und 15 [m/sec] sei  $B_{MIN} = -7.5$  [m/sec<sup>2</sup>] (vgl. Abb. 32), dann ergibt sich aus  $v(t) = v_0 + b(t-t_0)$  eine notwendige Bremsdauer von 2 [sec] von  $v = 15$  [m/sec] bis zum Stillstand und über die Bewegungsgleichung  $x(t) = x_0 + v_0(t-t_0) + 0.5b(t-t_0)^2$  errechnet sich daraus ein Bremsweg von 15 [m]. Bei Geschwindigkeiten  $> 15$  [m/sec] kommt also ein Fahrzeug, das nicht über extrem gute Brems-eigenschaften verfügt, überhaupt nicht mehr rechtzeitig zum Stillstand.

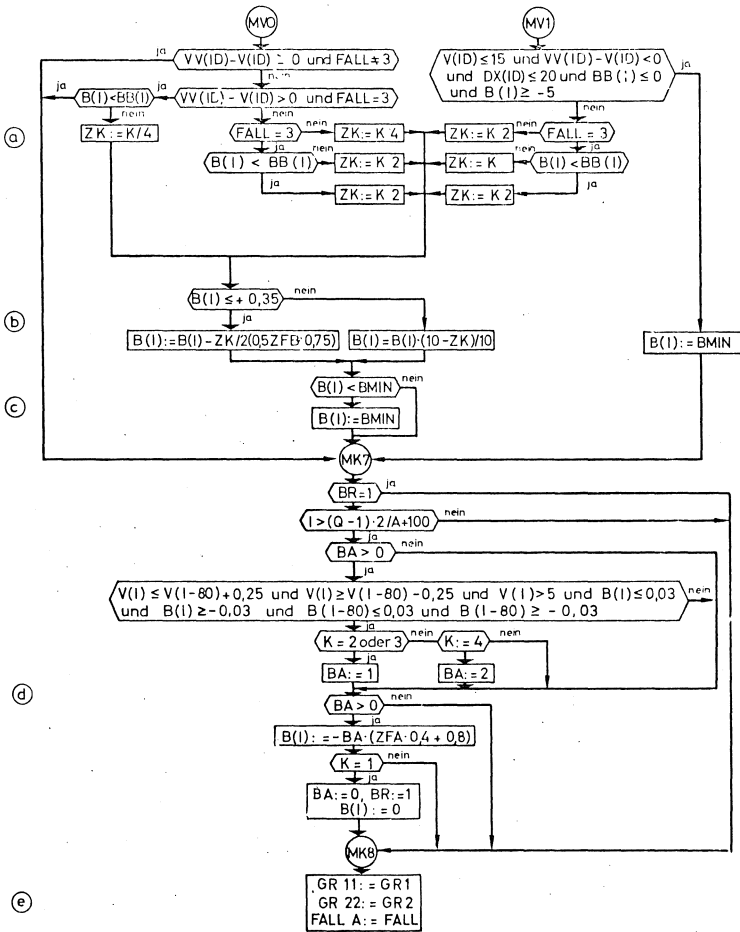


Abb. 41

- b) Aufgrund der Wertzuweisungen an ZK werden neue Beschleunigungswerte errechnet. Dabei wird unterschieden, ob die Beschleunigung negativ ist (wobei negativ hier definiert ist bis zur oberen positiven Grenze des Eigenrauschens, also bis + 0.35[m/sec<sup>2</sup>]) oder positiv. Ist  $B(I) \leq 0.35$ , errechnet sich die Beschleunigung aus dem Wert, der über die Fahrzeugfolgegleichung schon errechnet wurde und einem Summanden  $ZK/2 \cdot (0.5 ZFB+0.75)$ . Somit kann die über die Fahrzeugfolgegleichung errechnete Beschleunigung um folgende Werte verringert werden (weil ZFB eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Zufallszahl ist und deshalb 0.5 ZFB+0.75 zwischen 0.75 und 1.25 gleichverteilt ist):

ZK (0.5 ZFB + 0.75) mit ZK = K	1.125	1.875	1.500	2.500
mit ZK = K/2	0.562	0.937	0.750	1.250
mit ZK = K/4	0.281	0.469	0.375	0.625
	ZFB=0	ZFB=1	ZFB=0	ZFB=1
	K = 3		K = 4	

Damit wird z. B. eine über die Fahrzeugfolgegleichung errechnete Beschleunigung von -3,5 [m/sec<sup>2</sup>] mit ZFB=1, K=4 und ZK=K/4 geändert in den Wert  $b = -4.75$  [m/sec<sup>2</sup>].

Ist dagegen die Beschleunigung größer als 0.35 [m/sec<sup>2</sup>], wird im Unterschied zu der oben erläuterten additiven Veränderung eine prozentuale Verringerung der über die Fahrzeugfolgegleichung errechneten Beschleunigung angewandt. Dabei kann der Faktor  $(10 - ZK)/10$  die folgenden Werte annehmen:

$(10 - ZK)/10$ mit ZK = K	0.700	0.600
ZK = K/2	0.850	0.800
ZK = K/4	0.925	0.900
	K = 3	K = 4

Der Unterschied besteht also darin, daß im Bereich positiver Beschleunigungen eine stärkere Verringerung möglich sein kann. Dem liegt die Vorstellung zugrunde, daß eine Motorverzögerung schneller durchgeführt wird als eine Bremsung.

- c) Durch die Verringerung ist es möglich, daß die maximale Verzögerung  $B_{MIN}$  überschreitet, so daß sie wieder auf  $B_{MIN}$  festgelegt werden muß.
- d) Wenn sich nach Beendigung der Reaktion auf eine Bewegungsänderung ein Fahrzeug immer noch im gelben oder roten Bereich befindet, beginnt ein solange andauernder Verzögerungsvorgang, bis der freie Bereich wieder erreicht ist. Im gelben Bereich wird dafür eine Verzögerung zwischen -0.8 und -1.2[m/sec<sup>2</sup>] festgelegt, so daß zufällig entschieden wird, ob der Fahrer durch Motorbremsung oder durch eine Verzögerung mit dem Bremspedal versucht, seinen Abstand zu vergrößern. Befindet sich das Fahrzeug dagegen noch im roten Bereich, wird angenommen, daß der Fahrer auf jeden Fall durch Betätigung des Bremspedals den Abstand vergrößert (mit einer Verzögerung zwischen -1.6 und -2.4 [m/sec<sup>2</sup>]).

- e) Die während des aktuellen Zeitschrittes I errechneten Werte für GR1, GR2 und FALL werden im nächsten Zeitschritt I+1 für Vergleiche benötigt und deshalb umgespeichert.

#### 4. Ergebnisse

Ergebnisse der Programmläufe können natürlich wegen der Vielzahl an Möglichkeiten nur beispielhaft aufgezeigt werden. Außerdem sollen sie in erster Linie nur die Unterschiede des Verhaltens von Fahrzeugkolonnen ohne Hilfseinrichtungen zu dem Verhalten mit Hilfseinrichtungen verdeutlichen.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, liegen allen Beispielen die gleichen Bedingungen zugrunde.

Die Beschleunigungsganglinie des Führungsfahrzeugs besteht aus einem Verzögerungs- und Beschleunigungsanteil, die bewirken, daß sich die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs von  $v_0 = 35$  [m/sec] (= 126[km/h]) auf die Endgeschwindigkeit  $v_e = 26$  [m/sec] (= 93,5[km/h]) reduziert, wobei dazwischen eine Minimalgeschwindigkeit von 25 [m/sec] (= 90[km/h]) erreicht wird:

$$b_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t < 10 \text{ [sec]} \\ -1.5 & " \quad 10 \leq t < 11 \quad " \\ -2.0 & " \quad 11 \leq t < 12 \quad " \\ -2.5 & " \quad 12 \leq t < 13 \quad " \\ -2.0 & " \quad 13 \leq t < 15 \quad " \\ 0 & " \quad 15 \leq t < 19 \quad " \\ 1.5 & " \quad 19 \leq t < 21 \quad " \\ 0 & " \quad 21 \leq t < 26 \quad " \\ -1.0 & " \quad 26 \leq t < 28 \quad " \\ 0 & " \quad t \geq 28 \text{ [sec]} \end{cases}$$

Alle Folgefahrzeuge haben ebenfalls die Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0 = 35$  [m/sec]. Die Ausgangsabstände (Bruttoabstände) zwischen den Fahrzeugen sind ebenfalls konstant und betragen für die einzelnen Beispiele entweder 45 [m], 35 [m] oder 25 [m]. Auch die nach Absch. II.2.2.1 errechneten Reaktionszeiten  $\tau$  und Proportionalitätsfaktoren  $\lambda_{1,m}$  haben in allen Läufen für die einzelnen Fahrer die gleichen Werte, weil in allen Läufen für NA und NB (siehe Kap. II.1) die gleichen Zahlen verwendet wurden. Sie betragen für die betrachteten fünf Fahrer der Folgefahrzeuge

	Fall 1		Fall 2		Fall 3	
	$\tau$	$\lambda$	$\tau$	$\lambda$	$\tau$	$\lambda$
Fahrer 2	0.50	1.00	0.70	11.01	0.20	176.92
Fahrer 3	0.85	0.93	1.05	12.97	0.30	252.09
Fahrer 4	1.20	1.17	1.00	12.01	0.25	184.10
Fahrer 5	1.50	1.17	0.90	10.65	0.20	154.48
Fahrer 6	1.10	1.24	0.95	11.32	0.45	356.31

Die Weg-Zeitdiagramme und die Abstandsganglinien aller sechs Fahrzeuge sind in den Abbildungen 42 bis 46 aufgezeichnet. Abb. 42a zeigt die Bewegungslinien der sechs Fahrzeuge dieser Kolonne (mit  $\Delta x_0 = 45$  [m]), bei der kein Fahrzeug mit einem Abstandswarngerät ausgerüstet ist. An den Abstandsganglinien (Abb. 42b) erkennt man deutlich die Instabilität des Folgevorgangs, die dazu führt, daß der Abstand zwischen den Fahrzeugen 5 und 6 bis auf ca. 8 [m] absinkt.

Zusätzlich zu den kinematischen Größen wurde aber auch für jeden Fahrer KRIT(I) (vgl. Absch. II.2.2.4) errechnet. Überschreitet KRIT(I) den Wert 0.5, befindet sich der betrachtete Fahrer im Bereich der Kolonneninstabilität. In diesem Fall mit  $\Delta x_0 = 45$  [m] betragen die Maximalwerte von KRIT(I) für die einzelnen Folgefahrer 0.64, 0.80, 0.77, 1.21, und 1.10; sie liegen also alle über der Grenze von 0.5.

Abb. 43 zeigt die Auswirkungen, wenn der Ausgangsabstand  $\Delta x_0$  von 45 [m] auf 35 [m] bei sonst gleichen Bedingungen verringert wird. Das fünfte Fahrzeug der Kolonne ist auf das vierte aufgefahren (das aus programmtechnischen Gründen allerdings so eingezeichnet ist, als ob es nach dem Unfall noch weitergefahren wäre), weil der Bruttoabstand kleiner als 5 [m] wurde. Auch das sechste Fahrzeug wurde in diesen Unfall verwickelt. Die Instabilität ist bei diesem Ausgangsabstand noch größer: die Maximalwerte von KRIT(I) sind hier für die nicht aufgefahrenen Fahrzeuge auf 1.06, 1.17 und 1.96 angewachsen.

Allerdings wurde bei der Berechnung dieser Ergebnisse wiederum davon ausgegangen, daß ein Fahrer nur das direkt vorausfahrende Fahrzeug beobachtet. In Wirklichkeit dagegen werden gerade bei starkem Kolonnenverkehr viele Fahrer nicht nur dieses, sondern auch zumindest das davor fahrende Fahrzeug besonders im Falle des Aufleuchtens der Bremslichter beobachten, wodurch natürlich die Reaktion auf Bewegungsänderungen früher erfolgen kann.

Die Abbildungen 44a und b zeigen die unter sonst gleichen Bedingungen errechneten Bewegungslinien <sup>+)</sup> und Abstandsganglinien wie die in Abb. 42 aufgezeichneten Kurven der sechs Fahrzeuge mit dem Unterschied, daß hier nun unterstellt wird, alle Fahrer richteten sich nach der Abstandswarnanzeige. An Abb. 44b erkennt man, daß die Abstandsschwankungen im Gegensatz zu Abb. 42b geringer sind (der minimale Abstand liegt nun bei 21 [m]) und bei den letzten Fahrzeugen der Kolonne die maximale Amplitude wieder abnimmt.

In den Abb. 45a, b und 46 sind die entsprechenden Kurvenverläufe für die Ausgangsabstände  $\Delta x_0 = 35$  [m] (Abb. 45a, b) und  $\Delta x_0 = 25$  [m] (Abb. 46) aufgetragen. Auffahrunfälle treten hierbei nicht auf. Auch überschreitet bei allen drei Ausgangsabständen kein Fahrer einen Wert KRIT(I) von 0,6, meist liegt dieser Wert unter 0,5, also im stabilen Bereich.

Es kann also aufgrund der hier gezeigten Ergebnisse behauptet werden, daß unter den getroffenen Vereinbarungen ein in den Fahrzeugen eingebautes Abstandswarngerät die Sicherheit des Verkehrsflusses erhöhen würde. Allerdings sind hierzu weitere Untersuchungen notwendig, die genaueren Aufschluß darüber geben müßten, inwiefern im einzelnen das Fahrverhalten der Fahrer durch eine Abstandswarnanzeige beeinflusst würde und welche wahrnehmungspsychologischen Aspekte bei der Gestaltung der Anzeige beachtet werden müßten.

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann aber auch eine Empfehlung für das Fahren in Kolonnen ohne Abstandswarngerät abgeleitet werden.

Während nämlich die für die Einhaltung eines genügend großen Abstandes empfohlenen Regeln "Halber Tachoabstand" oder "Methode 21,22" (siehe Abb. 21) gerade im Bereich höherer Geschwindigkeiten sehr große Abstände angeben, die für die heutigen Verhältnisse zum Teil unrealistisch sind, weil sie (z. B. durch "Kolonnenspringer") immer wieder verkleinert werden, kann aufgrund der Stabilitätseigenschaften als Anhaltspunkt für einen Mindestabstand im besonders auf Autobahnen sehr häufigen Geschwindigkeitsbereich zwischen 100 und 130 [km/h] entsprechend der in Abb. 36 eingezeichneten oberen Abstand-Geschwindigkeit-Grenzkurve (Grenze 1) ein Wert von ungefähr 50 [m] angegeben werden, der deshalb leicht abzuschätzen ist (im Gegensatz z. B. zur Regel

<sup>+) In den Weg-Zeit-Diagrammen (Abb. 44a, 45a, 46) sind durch verschiedene Strichelungen der Bewegungslinien die Bereiche angegeben, bei denen entweder das gelbe oder rote Warnlicht der Abstandsanzeige aufleuchtet.</sup>

"Halber Tachoabstand"), weil die Leitpfosten entlang der Autobahn oder sonstiger Schnellstraßen gerade im Abstand von 50 [m] aufgestellt sind.

Aus dieser Bemerkung lassen sich zusammen mit zwei schon an anderen Stellen erwähnten Empfehlungen drei Regeln für das Fahren in Kolonnen zusammenfassen:

1. Wenn möglich, auch weiter vorausfahrende Fahrzeuge beobachten, um auf Bewegungsänderungen der vorausfahrenden Fahrzeuge eher reagieren zu können (das entspricht im Modell einer Verringerung der Reaktionszeit).
2. Bei sonst engem Abstand innerhalb einer Kolonne größere Lücken schaffen, damit beginnende Instabilitäten wieder abgebaut werden.
3. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 100 und 130 [km/h] einen Abstand von 50 [m] (Abstand der Leitpfosten) nicht unterschreiten. Bei Abständen dieser Größenordnung sind auch Einschervorgänge anderer Fahrzeuge weniger wahrscheinlich.



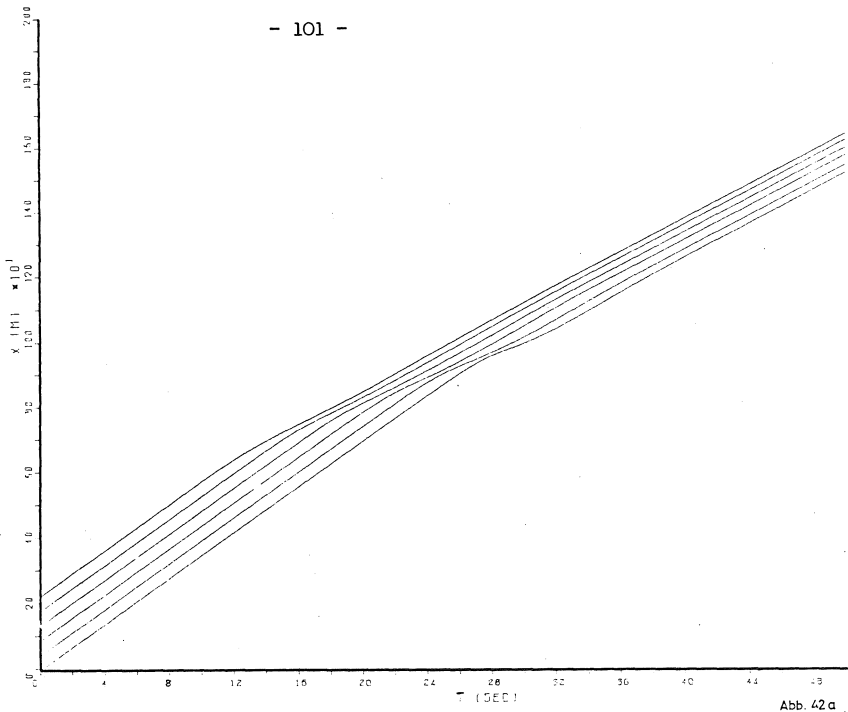


Abb. 42a

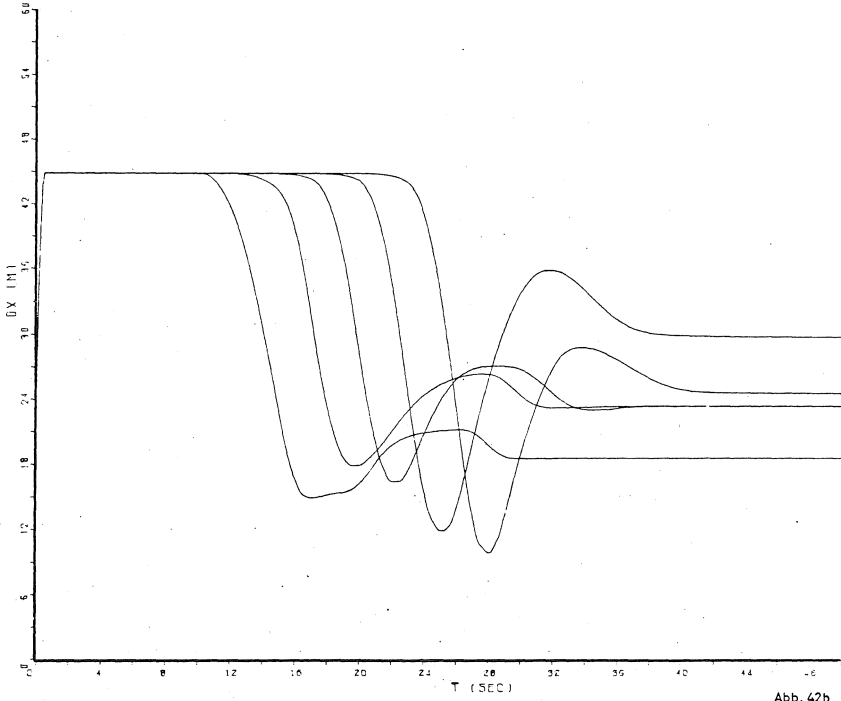


Abb. 42b

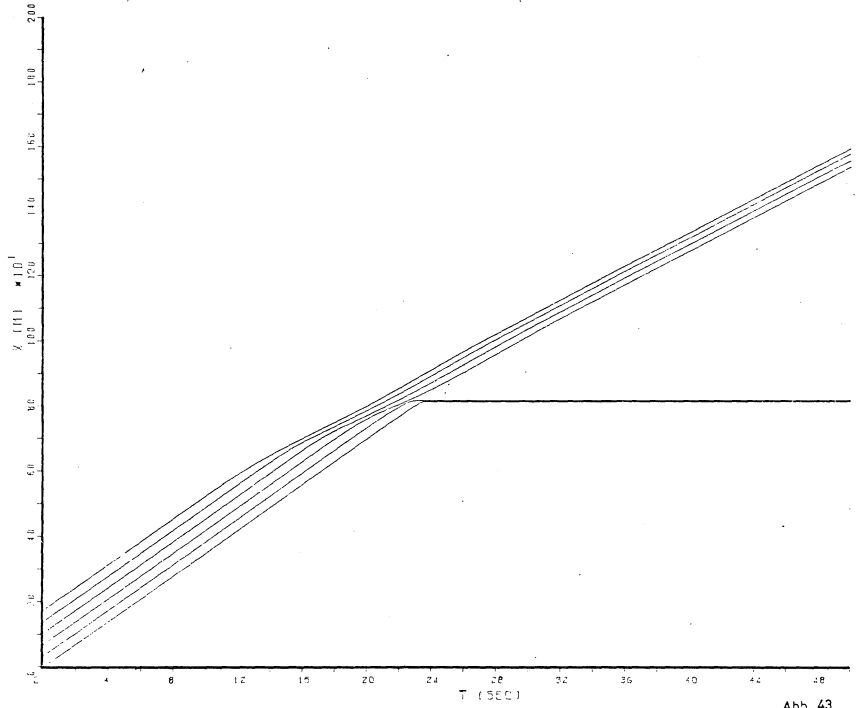


Abb. 43

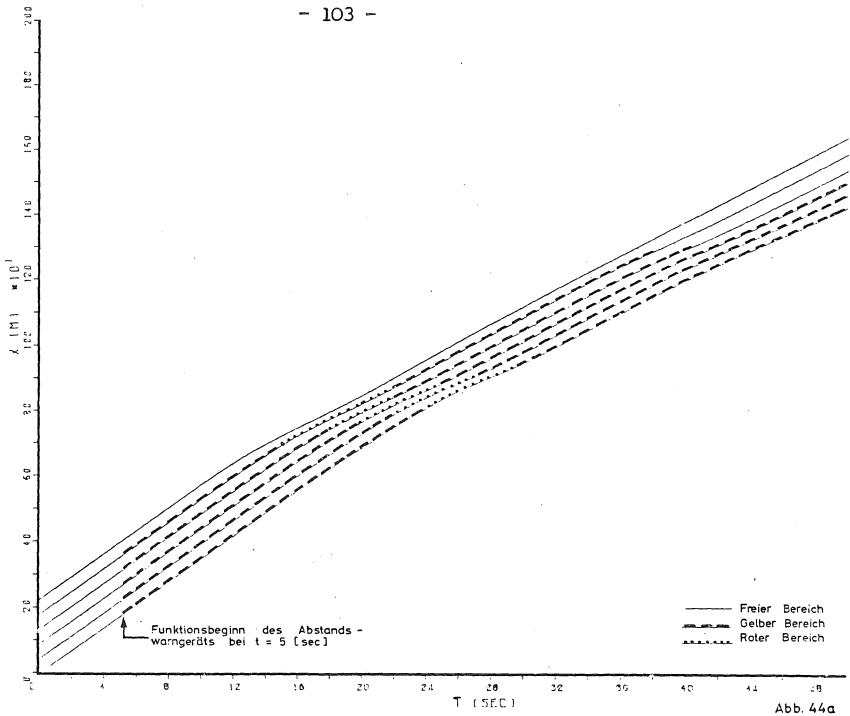


Abb. 44a

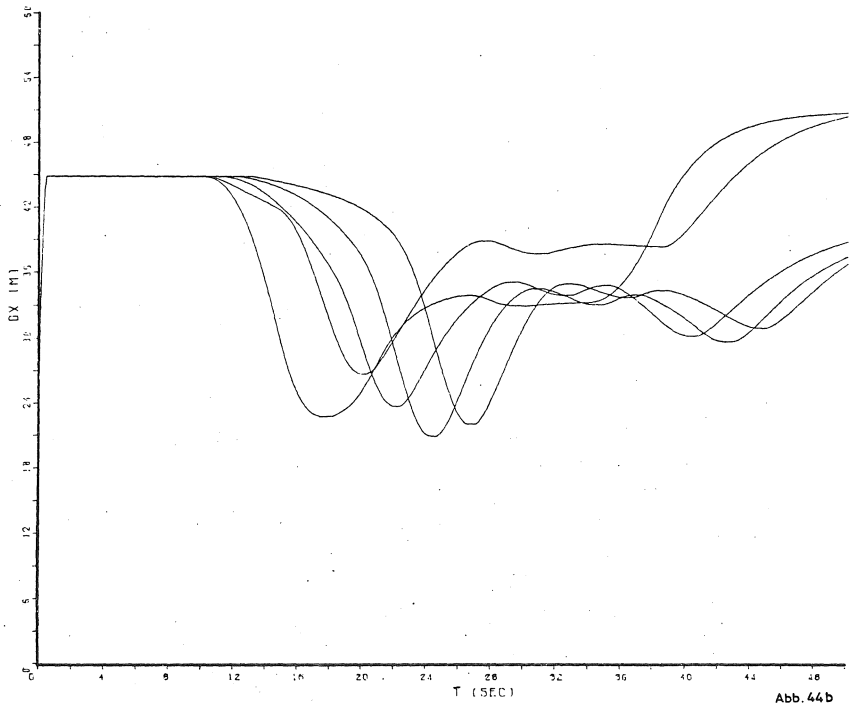


Abb. 44b

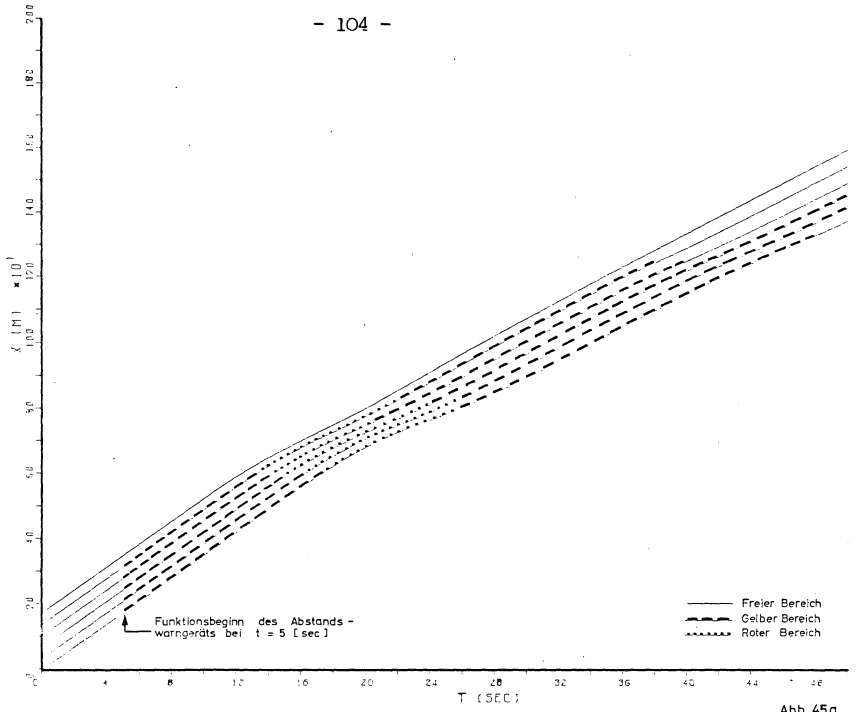


Abb. 45a

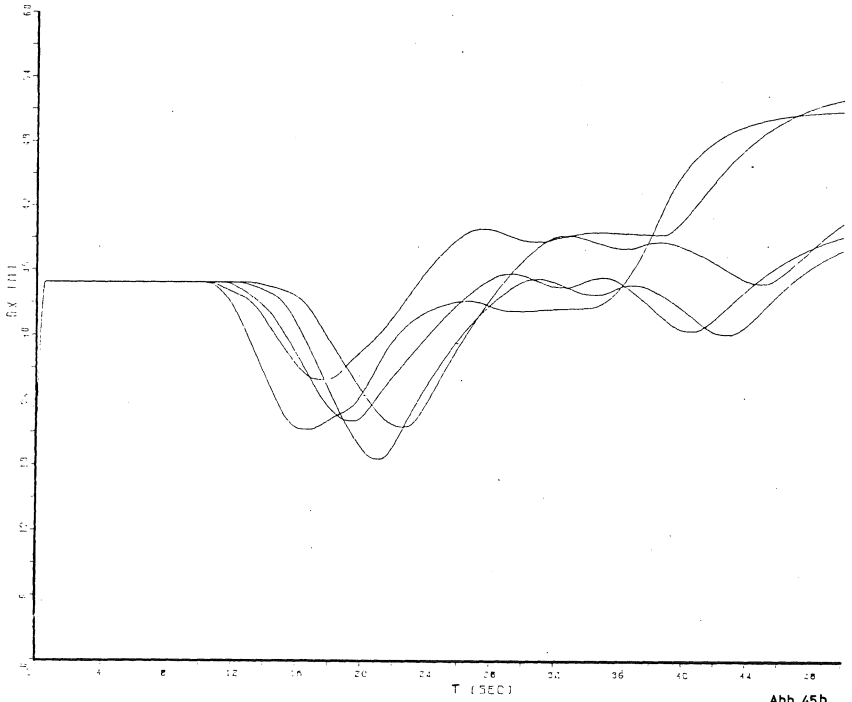


Abb. 45b

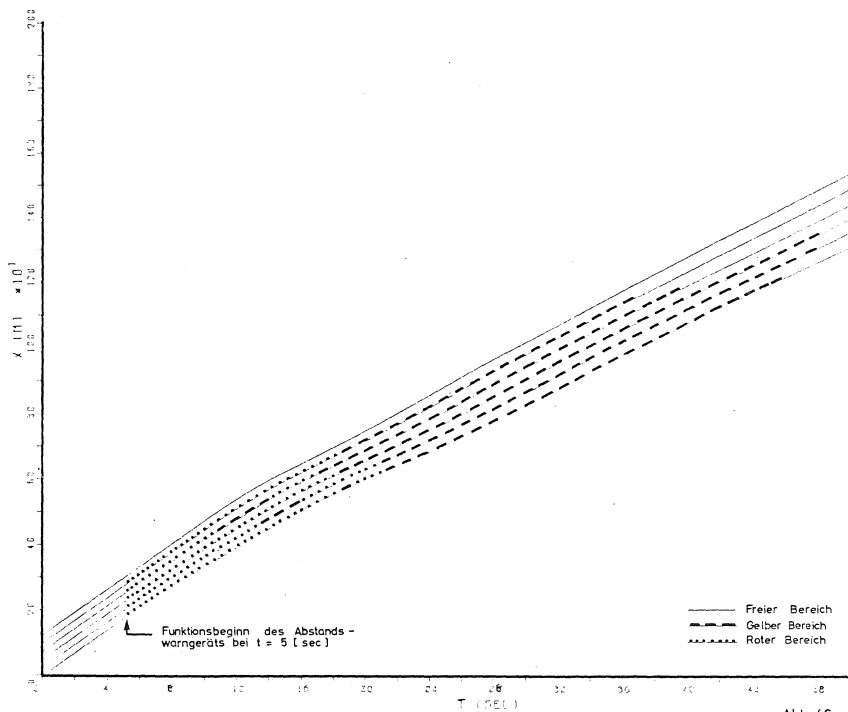


Abb. 46

## 5. Ausblick auf die Möglichkeit automatischer Folgesysteme

Auf der Grundlage der Beschreibung des Verhaltens von Fahrzeugkolonnen durch die Fahrzeugfolgegleichung wurde ein Abstandswarngerät konzipiert, dessen technische Funktionsweise auf der Messung und Verarbeitung der Eigengeschwindigkeit und des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug beruht.

Es ist denkbar, daß die Messung dieser Größen noch weitergehend genutzt wird, nämlich als Grundlage einer automatischen Fahrzeugführung derart, daß ein Fahrer nicht mehr selbst auf die Anzeige eines Abstandswarngerätes reagiert, sondern daß die notwendigen Bewegungsänderungen automatisch durchgeführt werden.

Da von einem solchen automatischen System verlangt werden sollte, daß sich seine Reaktionen von den normalen menschlichen Verhaltensweisen in gleichen Verkehrssituationen prinzipiell nicht allzusehr unterscheiden, weil sonst die Gefahr bestünde, daß ein Fahrer in die automatische Regelung eingreift, obwohl das nicht notwendig wäre (wobei es sogar vorstellbar ist, daß ein solches Eingreifen zu ganz neuen Gefahrensituationen führen könnte), liegt es nahe, als Grundlage eines solchen Systems die Fahrzeugfolgegleichung heranzuziehen. Bei notwendigen Bewegungsänderungen würden also die kinematischen Größen des mit einem solchen Gerät ausgerüsteten Fahrzeugs über die Fahrzeugfolgegleichung ermittelt werden.

Ein grundlegender Unterschied zwischen Abstandswarngerät und automatischer Fahrzeugführung liegt allerdings darin, daß das Abstandswarngerät für den Fahrer nur eine zusätzliche Hilfe sein kann, er also noch alle Bewegungsänderungen selbst durchführen muß und dafür die Verantwortung trägt, während bei einer automatischen Fahrzeugführung ihm in dieser Beziehung alles abgenommen wird - also auch die Verantwortung. Das hat aber zur Konsequenz, daß dann, im Gegensatz zur Konzeption des Abstandswarngerätes, absolut sichere Abstände eingehalten werden müßten, d.h. es müssen andere als die in Abb. 34 für Kolonnenstabilität aufgezeichneten Grenzkurven gewählt werden.

## II. Zusammenfassung

Innerhalb von Fahrzeugkolonnen treten Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen dergestalt auf, daß außer dem ersten Fahrzeug alle weiteren Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit nach dem Fahrverhalten der vorausfahrenden Fahrzeuge richten müssen.

Eine Möglichkeit, solche Wechselwirkungen mathematisch zu beschreiben, bietet die von HERMAN et al. entwickelte Fahrzeugfolgegleichung

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

Die für den Sonderfall  $l = m = 0$  angegebenen Stabilitätskriterien für Einzelstabilität und für Kolonnenstabilität werden diskutiert und in Zusammenhang mit absolut sicherem und relativ sicherem Abstand gebracht.

Diese Kriterien waren Grundlage, auch für alle anderen  $l$ - $m$ -Kombinationen der Fahrzeugfolgegleichung Stabilitätsbetrachtungen anzustellen und den Einfluß der auf die Stabilität einwirkenden Größen zu diskutieren.

Als Ergebnis können für beliebige  $l$ - $m$ -Kombinationen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit Grenzwerte des Abstands zwischen zwei Fahrzeugen angegeben werden, deren Unterschreitung Instabilität zur Folge hat. Instabilität erhöht die Gefahr von Auffahrunfällen gegenüber stabilem Verhalten, weil durch die sich vergrößernden Amplituden der Schwingungen der Geschwindigkeitsganglinien auch die Schwankungen der Abstände zwischen den Fahrzeugen so anwachsen, daß die Abstände zu null werden können.

Von HOEFS wurde gezeigt, daß mit bestimmten  $l$ - $m$ -Kombinationen eine realistische Beschreibung des Kolonnenverkehrs möglich ist.

Wendet man die Stabilitätskriterien auf solche  $l$ - $m$ -Kombinationen an und vergleicht beobachtete Abstände mit solchen Abständen, die dem Kriterium der Kolonnenstabilität genügen, kann festgestellt werden, daß die Mehrzahl der Abstände im instabilen Bereich liegt, also potentiell gefährliche Abstände sind.

Zur Beurteilung der "Güte" von Abständen können somit die Stabilitätskriterien herangezogen werden und als Grundlage für die Konzeption eines Abstandswarngeräts dienen.

Prinzipiell bestehen für die Konzeption eines solchen Geräts zumindest zwei Möglichkeiten:

1. Die Abstände werden nach den bekannten Bremswegformeln so ermittelt, daß für die Mehrzahl der auftretenden Fälle unter der Annahme bestimmter Verzögerungseigenschaften der Fahrzeuge kein Auffahrunfall geschieht, wenn das vorausfahrende Fahrzeug plötzlich stark bremst.
2. Die Abstände werden so gewählt, daß für die Mehrzahl der Fahrer ein stabiles Fahrverhalten gewährleistet ist.

Da der Nachteil der ersten Möglichkeit unzweifelhaft darin liegt, daß bei höherem Geschwindigkeitsniveau die Abstände gegenüber beobachteten Abständen so stark anwachsen, daß sie wahrscheinlich von der Mehrzahl der Fahrer nicht eingehalten werden, wird die zweite Möglichkeit weiterverfolgt. Auch dabei ergeben sich größere als heute zu beobachtende Mindestabstände, die aber besonders bei hohen Geschwindigkeiten (die allerdings bei Kolonnenverkehr überhaupt nicht oder selten auftreten) niedriger liegen als die über die Bremswegformel errechneten Abstände.

Anhand einiger Beispiele wird der Unterschied des Verhaltens von Fahrzeugkolonnen mit und ohne Abstandswarngeräten verdeutlicht.



IV. Anhang  
=====

Anhang 1

Weitere Berechnungsmethoden für die Fahrzeugfolgegleichung mit  $l = m = 0$

1. Fahrzeugfolgevorgang als Regelkreis

Beim Kolonnenfahren ohne Überholmöglichkeit werden die Fahrer von Folgefahrzeugen versuchen, die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen möglichst klein zu halten, im Idealfall gegen null streben zu lassen. Das geschieht durch Beobachtung der Bewegungsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs (oder auch mehrerer vorausfahrender und sogar folgender Fahrzeuge). Ein solcher Prozeß läßt sich vereinfacht durch einen Regelkreis darstellen (Abb. A1.1).

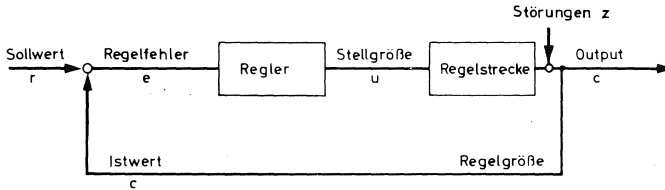


Abb. A1.1

Ein Fahrer (= Regler) strebt die Relativgeschwindigkeit  $\Delta \dot{x} = 0$  an (d.h.: Sollwert  $r=0$ ). Wenn er dabei eine gewisse Regelabweichung  $e$  feststellt (wobei gilt:  $e=r-c$ ), wird er den Regelfehler korrigieren wollen, indem er die Regelabweichung in Stellsignale  $u$  umwandelt. Dadurch wird die tatsächliche Relativgeschwindigkeit verändert. Die durch die Korrektur entstandene neue Größe  $c$  wird nun zur Regelgröße, die dem neuen Istwert  $c$  entspricht. Die Information über den neuen Istwert geht wieder zurück und wird mit dem Sollwert verglichen. Wenn dabei gilt:  $c = r$ , ist die Regelabweichung gleich null und der Regelvorgang beendet. Bei einem

Folgevorgang wird dieser Zustand allerdings nicht eintreten, weil einmal Bewegungsänderungen nicht genau abgeschätzt werden können (mit diesem Problemkreis beschäftigten sich TODOSIEV (7), MICHAELS (8), WIEDEMANN (9)), und weil zum anderen Störgrößen  $z$ , die von außen auf das System einwirken, eine weitere Korrektur erforderlich machen können.

Da im vorliegenden Fall die Führungsgröße  $r$  keine Funktion der Zeit ist, sondern eine konstante Größe darstellt, handelt es sich bei diesem Regelkreis um eine Festwertregelung, die die Wirkung einer oder mehrerer Störgrößen ausgleicht, die Regelgröße  $c$  also auf dem konstant eingestellten Sollwert ( $r = 0$ ) halten soll.

Bei der Festwertregelung wird angestrebt, die Regelabweichungen in möglichst kleinen Grenzen zu halten oder vollständig zu beseitigen; dabei soll der Regelverlauf eine möglichst gute Dämpfung aufweisen.

Ein gegenüber Abb. A 1.1 verändertes Strukturbild gibt den Regelvorgang vereinfacht wieder (Abb. A 1.2):

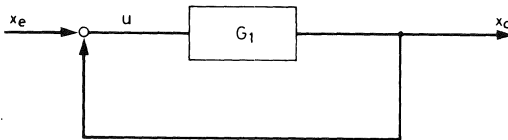


Abb. A 1 2

Zwischen der Eingangsgröße  $x_e$  (das sind hier nun die Störungen) sowie der Ausgangsgröße  $x_a$  (Relativgeschwindigkeit  $c$ ) liegen, zu einem Block zusammengefaßt, Regler und Regelstrecke.

Für den in Abb. A 1.2 aufgezeichneten Regelkreis läßt sich eine Übertragungsfunktion  $G$ , also das Verhältnis der Ausgangsgröße  $x_a$  ( $x_a = X_a e^{j\omega t}$ ,  $X_a$  = komplexer Zeiger)

zur Eingangsgröße  $x_e$  ( $x_e = X_e e^{j\omega t}$ ) angeben:

$$x_a = G_1 u$$

Mit

$$u = x_e - x_a$$

wird daraus

$$x_a = G_1 (x_e - x_a)$$
$$x_a = \frac{G_1}{1 + G_1} \cdot x_e$$

und mit

$$G = \frac{G_1}{1 + G_1}$$

erhält man

$$x_a = G \cdot x_e \quad (\text{A1.1})$$

Bei Kenntnis der Übertragungsfunktion kann für jede beliebige Eingangsgröße  $x_e$  die Ausgangsgröße  $x_a$  berechnet werden. Dabei muß allerdings beachtet werden, daß die Eingangs- und Ausgangsfunktionen die Laplace-Transformierten der entsprechenden zeitabhängigen Funktionen sind (vgl. dazu (10)).

## 2. Lösung mit Laplace-Transformation

Durch die Laplace-Transformation wird eine zeitabhängige (oder von einer anderen Variablen abhängige) Funktion  $f(t)$  über

$$\int_0^{\infty} e^{-s t} f(t) dt = F(s)$$

in einen Bildbereich  $s$  ( $s =$  komplexe Zahl) transformiert, so daß aus einer zeitabhängigen Funktion, (bei der die Variable  $t$  von 0 bis  $\infty$  laufen kann) eine von  $s$  abhängige Funktion wird, bei der  $s$  von  $\infty$  bis 0 läuft. Einer der Vorteile dieser Transformation liegt darin, daß aus einer Differentialgleichung im Zeitbereich eine algebraische Gleichung im Bildbereich wird, die sich in vielen Fällen einfacher lösen läßt.

Zur Unterscheidung von den ursprünglichen Funktionen werden die Laplace-transformierten Funktionen mit großen Buchstaben bezeichnet.

Formt man die Fahrzeugfolgegleichung (2.1) mit  $\dot{x} = v$  um und bringt die Konstante  $\lambda_{0,0}$  auf die linke Seite der Gleichung, so erhält man

$$\frac{1}{\lambda_{0,0}} \cdot \dot{v}_{n+1}(t) = v_n(t-\tau) - v_{n+1}(t-\tau) \quad (\text{A 1.2})$$

Nach den Regeln der Laplace-Transformation gilt für die Umformung von Zeitfunktionen in Funktionen des Bildbereichs

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{c f(t)\} &= c \mathcal{L}\{f(t)\} = c F(s) && \text{(Faktoren bleiben erhalten)} \\ \mathcal{L}\{v_n(t-\tau)\} &= V_n(s) e^{-\tau s} && \text{(Verschiebungssatz)} \\ \mathcal{L}\{\dot{v}_n(t)\} &= s V_n(s) + v_n(o) && \text{(Differentialtransformation)} \end{aligned}$$

Durch Anwendung dieser Regeln auf Gl. (A 1.2) erhält man

$$\frac{1}{\lambda_{0,0}} s V_{n+1}(s) + v_{n+1}(o) = V_n(s) e^{-\tau s} - V_{n+1}(s) e^{-\tau s}$$

und durch Auflösung nach  $V_{n+1}(s)$

$$V_{n+1}(s) = \frac{\frac{1}{\lambda_{0,0}} e^{-\tau s}}{1 + \frac{1}{\lambda_{0,0}} e^{-\tau s}} V_n(s) \quad (\text{A 1.3})$$

wenn die Anfangsbedingung  $v_{n+1}(o) = 0$  gesetzt wird (siehe dazu auch DREW (11)).

Aus der zeitabhängigen Differential-Differenzgleichung wurde durch die Transformation eine von  $s$  abhängige algebraische Gleichung. Ist  $V_n(s)$  die Laplace-Transformierte der Geschwindigkeitsganglinie <sup>+) des Fahrzeugs  $n = 1$  (= Eingangsfunktion in das Regelkreissystem) und betrachtet man dieses Fahrzeug als Führungsfahrzeug einer Kolonne, dann erhält man die Laplace-Transformierte der Geschwindigkeitsganglinie des Folgefahr-</sup>

<sup>+) Die Geschwindigkeitsganglinie ist definiert als der Verlauf der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs über die Zeit.</sup>

zeugs  $n + 1$  durch Multiplikation von  $V_n(s)$  mit dem Quotienten von Gl. (A 1.3) und somit die Ausgangsgröße des Regelkreissystems. Dieser Quotient entspricht der Übergangsfunktion  $G$  (Gl. (A 1.1) des Regelkreises, wobei

$$G_1 = \frac{1}{s} \lambda_{0,0} e^{-\tau s}$$

ist.

Will man nun die Geschwindigkeitsganglinie der Folgefahrzeuge z. B. aufzeichnen, müssen die über die Laplace-Transformation errechneten Funktionen  $V_{n+1}(s)$  für  $n = 2, 3, \dots, k$  wieder in den Zeitbereich zurücktransformiert werden. Wegen der Exponentialglieder in Gl. (A 1.3) läßt sich das nur über Näherungsverfahren durchführen. Ein solches numerisches Verfahren zur punktweisen Ermittlung der Lösung ist von DOETSCH (12) angegeben. Weil dieses Verfahren recht aufwendig ist, wird allerdings die Anwendbarkeit der Laplace-Transformation beeinträchtigt.

### 3. Lösung mit Analogrechner

Eine andere Methode zur Lösung der Fahrzeugfolgegleichung bietet der Analogrechner. In diesem Rechenggerät wird statt der zu lösenden Gleichung ein analoges elektrisches Modell benutzt, das es erlaubt, die Ergebnisse auf einem Oszillographen sichtbar zu machen oder aufzeichnen zu lassen. Da bei einem Analogrechner die Anwendung von Rechenelementen möglich ist, die neben den Grundrechenarten Addition und Subtraktion unmittelbar die Integration erlauben, ist dieses Gerät speziell für die Behandlung von Differentialgleichungen geeignet.

Die Lösung einer Differentialgleichung z. B. der Art

$$\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0$$

erhält man, indem die höchste auftretende Ableitung auf der linken Seite des Gleichheitszeichens isoliert wird:

$$\ddot{x} = -b\dot{x} - cx$$

Durch eine erste Integration von  $\ddot{x}$  ergibt sich  $-\dot{x}$  (Minuszeichen, weil bei einer am Analogrechner durchgeführten Summation oder Integration die Vor-

zeichen vertauscht werden), durch eine zweite Integration + x. Multiplikation dieser Größen mit den dazugehörigen Faktoren und Rückführung zum ersten Integrierer (wobei das Vorzeichen von x wieder vertauscht werden muß) liefert die Lösung der Differentialgleichung.

Zu beachten ist bei der Berechnung der Fahrzeugfolgegleichung allerdings, daß die Geschwindigkeiten  $\dot{x}$  um  $\tau$  gegenüber der Beschleunigung  $\ddot{x}$  zeitverschoben sind. Da bei einem Analogrechner (im Gegensatz zum Digitalrechner) eine Funktion nicht gespeichert werden kann, muß  $\tau$  durch eine sogenannte Totzeitschaltung nachgebildet werden. Dabei wird eine Funktion  $f(t)$  näherungsweise um  $\tau$  verschoben. Abb. A1.3 zeigt das Prinzipschaltbild zur Lösung von Gl. (2.1) für zwei Fahrzeuge.

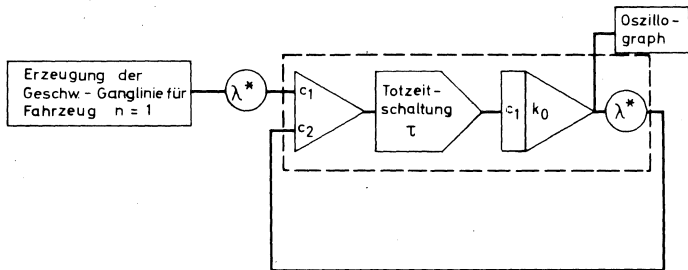
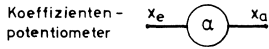


Abb. A1.3

Die verwendeten Symbole haben die in Abb. A1.4 dargestellte Bedeutung.

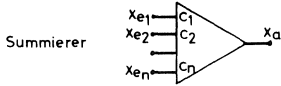
In Abb. A1.3 sind die hintereinander geschalteten Rechenelemente zur Bestimmung von  $\dot{x}(t)$  des Folgefahrzeugs wegen der Ähnlichkeit dieses Schaltbildes mit dem Regelkreis aus Abb. A1.2 gestrichelt umrandet, weil sie dem dort eingezeichneten Block  $G_1$  entsprechen.

Die durch eine eigene Schaltung gewonnene Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs ( $n = 1$ ), z. B. eine Sinusfunktion, wird mit  $\lambda_{0,0}$  multipliziert (wobei allerdings am Koeffizientenpotentiometer nicht der Wert  $\lambda_{0,0}$  eingestellt wird, sondern die normierte Größe  $\lambda^*$ , die sich aus dem

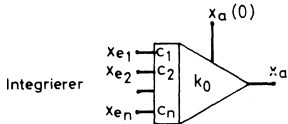


$$x_a(t) = \alpha \cdot x_e(t)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$



$$x_a(t) = - \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_{e_i}(t)$$



$$x_a(t) = - (x_a(0) + k_0 \int_0^t \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_{e_i}(t) dt)$$

Quelle : nach [13]

Abb. A1.4

Zusammenhang zwischen Problem- und Maschinengrößen ergibt; dieser Zusammenhang ist z. B. von SCHWARZ in (13) erläutert), durchläuft einen Summierer und wird in der Totzeitschaltung um  $\tau$  verschoben. Somit liefert die Totzeitschaltung die Funktion

$$\lambda_{0,0} \dot{x}_1(t-\tau)$$

Die höchste auftretende Ableitung der Fahrzeugfolgleichung ist  $\ddot{x}_2(t)$ . Der Integrierer bildet daraus die Geschwindigkeitsfunktion  $-\dot{x}_2(t)$ , die mit  $\lambda^*$  multipliziert ebenfalls den Summierer und die Totzeitschaltung durchläuft. Vor dem Integrierer wird also die gesamte rechte Seite der Fahrzeugfolgleichung mit  $\ddot{x}(t)$  gleichgesetzt. Damit ist die Gleichung

$$\ddot{x}_2(t) = \lambda_{0,0} [\dot{x}_1(t-\tau) - \dot{x}_2(t-\tau)]$$

erfüllt.

Bei einer Totzeitnachbildung wird, wie oben erwähnt, eine Funktion um ein gewisses Zeitintervall verschoben (Abb. A1.5).



Abb. A1.5

Die Laplace-Transformierten der hierbei auftretenden Zeitfunktionen sind

$$\mathcal{L}\{x_e(t)\} = X_e(s) \quad (A1.4)$$

$$\mathcal{L}\{x_a(t)\} = X_a(s) \quad (A1.5)$$

Nach dem Verschiebungssatz der Laplace-Transformation (siehe Absch.2) gilt:

$$\mathcal{L}\{f(t-a)\} = e^{-a s} F(s) \quad (A1.6)$$

Gl. (A1.6) auf Gl. (A1.4) angewendet, liefert:

$$x_a(t) = x_e(t-\tau) \iff e^{-\tau s} X_e(s) = X_a(s) \quad (A1.7)$$

und damit

$$\frac{X_a(s)}{X_e(s)} = e^{-\tau s} = F(s) \quad (A1.8)$$

Eine Näherungsfunktion für  $e^{-\tau s}$  lautet:

$$F(s) = \frac{a_0 - a_1 s \tau + a_2 s^2 \tau^2 - \dots}{a_0 + a_1 s \tau + a_2 s^2 \tau^2 + \dots} \quad (A1.9)$$

Die in Gl.(A1.9) auftretenden Koeffizienten  $a_i$  können durch eine Padé-Approximation (siehe (14)) näherungsweise ermittelt werden.



Je nachdem, welche Genauigkeit bei der Totzeitnachbildung erreicht werden soll, bricht man die Reihe nach Gl. (A1.9) an einer entsprechenden Stelle ab. Für eine Padé-Approximation erster Ordnung gilt

$$F(s) = \frac{a_0 - a_1 s \tau}{a_0 + a_1 s \tau} \quad (\text{A1.10})$$

Durch inverse Laplace-Transformation und anschließende mehrfache Integration erhält man aus Gl. (A1.10) die zeitabhängige Gleichung

$$\dot{x}_a(t) = -x_e(t) + \frac{2}{\tau} \cdot \int_0^t [x_e(t) - x_a(t)] dt \quad (\text{A1.11})$$

die auf dem Analogrechner geschaltet, eine erste Totzeit-Annäherung erlaubt.

Für die Lösung der Fahrzeugfolgleichung

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \lambda_{0,0} [\dot{x}_n(t-\tau) - \dot{x}_{n+1}(t-\tau)]$$

mit

$$\dot{x}_1(t) = 5 \sin 0,4t$$

wurde eine Padé-Approximation zweiter Ordnung gewählt. (Eine Padé-Approximation erster Ordnung bildet die Totzeit in diesem Fall zu ungenau nach, während eine Approximation vierter Ordnung keine wesentlichen Verbesserungen aufweist). Dazu wurde die in Abb. A1.6 aufgezeichnete Schaltung benutzt.

In den Abb. A1.7 und A1.8 sind die Geschwindigkeitsganglinien dreier Fahrzeuge für die beiden Fälle

a)  $\tau = 1$  [sec]       $\lambda_{0,0} = 1$  [1/sec]      (Abb. A1.7)

b)  $\tau = 0,5$  [sec]       $\lambda_{0,0} = 1$  [1/sec]      (Abb. A1.8)

aufgezeichnet, wobei die Geschwindigkeiten mit einer Konstanten  $v_0$  als Anfangsgeschwindigkeiten addiert wurden, um negative Geschwindigkeiten

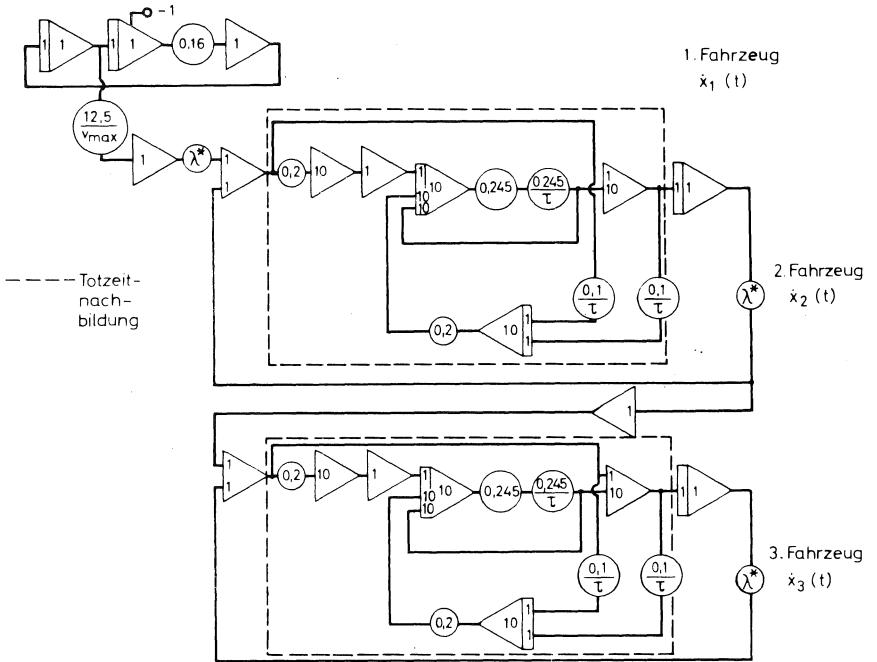


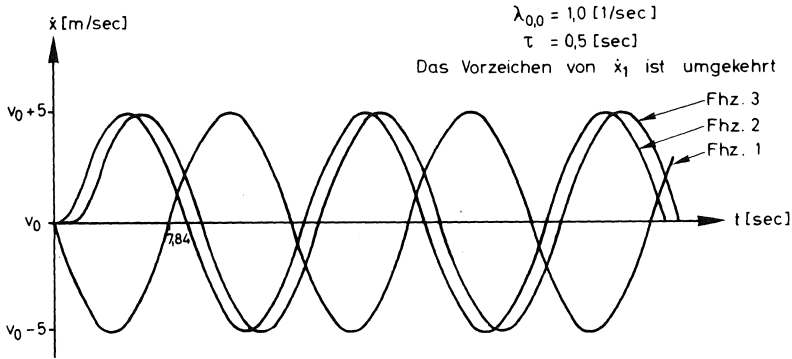
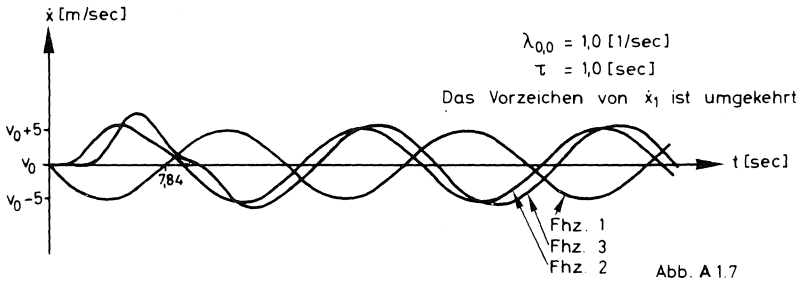
Abb A1.6

auszuschließen. Diese Konstante ist in der Schaltung nicht berücksichtigt. Außerdem ist zu beachten, daß sich die Maßstäbe der Ordinaten in den beiden Abbildungen unterscheiden.

#### 4. Lösung mit Z-Transformation

Es ist auch denkbar, daß die Bewegungsgleichung des Führungsfahrzeuges (oder dessen Geschwindigkeitsganglinie) nur zu diskreten Zeitpunkten  $i$  bekannt ist. Dann können die Bewegungsgleichungen der Folgefahrzeuge ebenfalls nur als diskrete Funktionen ermittelt werden. Als Lösungsmöglichkeit für diesen Fall bietet sich die Z-Transformation an.

Die Z-Transformation läßt sich aus der Laplace-Transformation ableiten (vgl. dazu DOETSCH (12)), indem statt der Transformationsvariablen  $s$  der



Laplace-Transformation eine neue Variable  $z$  durch die Substitution  $e^s = z$  eingeführt wird. Damit ergibt sich für die Transformation der diskreten Funktion  $f_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) (statt der kontinuierlichen Funktion  $f(t)$  bei der Laplace-Transformation)

$$F(z) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i z^{-i}$$

(vgl. Absch. 2.).

Statt der Fahrzeugfolgegleichung in Form einer Differentialgleichung (Gl. (A1.2)) wird nun eine diskrete Funktion

$$\frac{1}{\lambda_{0,0}} \dot{v}_{n+1,i} = v_{n,i-k} - v_{n+1,i-k}$$

mit  $i$  = Nummer des Zeitschrittes mit der Länge  $A$

$\tau$  = Reaktionszeit als ganzzahliges Vielfaches des Zeitschrittes

$$A (\tau = k \cdot A)$$

betrachtet.

Wie die Laplace-Transformation für Differentialgleichungen ist die Z-Transformation für die Lösung von Differenzgleichungen besonders geeignet. Aus der diskretisierten Fahrzeugfolgegleichung muß also eine Differenzgleichung gebildet werden, indem der Differentialquotient durch einen Differenzenquotienten ersetzt wird:

$$\frac{1}{\lambda_{o,o}} \cdot \frac{v_{n+1,i+1} - v_{n+1,i}}{A} = v_{n,i-k} - v_{n+1,i-k}$$

Nach entsprechenden aus der Laplace-Transformation ableitbaren Regeln wird nun diese Differenzgleichung in eine von z abhängige Gleichung transformiert. Es ergibt sich

$$V_{n+1}(z) = \frac{\lambda_{o,o} A z^{-t}}{(z-1) + \lambda_{o,o} A z^{-t}} V_n(z)$$

(vgl. Gl.(A1.3)), wenn auch hier die Anfangsbedingung  $v_{n+1}(0) = 0$  gesetzt wird. Aus dieser Gleichung erhält man durch Rücktransformation eine Lösung für die Geschwindigkeitsganlinie des Fahrzeugs n+1 als Funktion von i, wenn die Geschwindigkeitsganlinie des Fahrzeugs n bekannt ist, d.h.: die Zahlenwerte der Geschwindigkeitsganlinie des Fahrzeugs n+1 können damit für die diskreten Zeitpunkte i ermittelt werden. Weil aber auch hier wegen der Schwierigkeiten bei der Rücktransformation die Anwendbarkeit dieses Verfahrens beeinträchtigt ist, wird nicht weiter darauf eingegangen.

##### 5. Graphische Lösung nach TAYLOR (15)

Die Beschleunigung eines Folgefahrzeugs n+1 zum Zeitpunkt t kann graphisch ermittelt werden als die Steigung einer Geraden, die in einem Koordinatensystem mit der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Fahrzeugen n+1 und n als Ordinate und der Zeit als Abszisse vom Ursprung aus zu einem Punkt auf der Geraden verläuft, die parallel zur  $(\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1})$ -Achse durch den Punkt  $t = \frac{1}{\lambda_{o,o}}$  geht (Abb. A1.9).

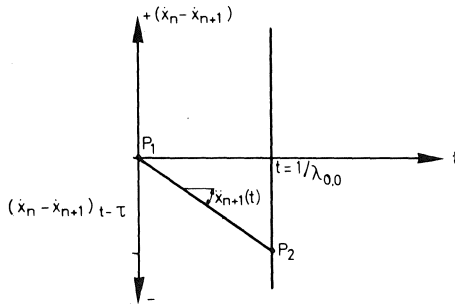


Abb. A1.9

Dabei hat dieser Punkt von der Zeitachse den Abstand, der durch die Geschwindigkeitsdifferenz zum Zeitpunkt  $t - \tau$  gegeben ist.

Für die Gerade gilt allgemein die Gleichung

$$y = ax + b;$$

mit

$$y = \dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}$$

wird daraus

$$\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1} = at + b$$

Durch Einsetzen der Koordinaten der zwei Punkte

$$P_1 = (0 / c)$$

$$P_2 = \left( \frac{1}{\lambda_{0,0}} / (\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1})_{t-\tau} \right)$$

können die unbekanntenen Konstanten  $a$  und  $b$  bestimmt werden:

$$(\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1})_{t-\tau} = a \frac{1}{\lambda_{0,0}}$$

Daraus wird

$$a = \lambda_{0,0} (\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1})_{t-\tau} \quad (A1.12)$$

Da  $a$  die Steigung der Geraden angibt und vorausgesetzt wurde, daß die Steigung der Beschleunigung des Fahrzeugs  $n+1$  zum Zeitpunkt  $t$  entspricht, muß gelten:

$$a = \dot{\ddot{x}}_{n+1}(t) \quad (A1.13)$$

Gl.(A1.12) in Gl.(A1.13) eingesetzt, liefert

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \lambda_{0,0} (\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1})_{t-\tau}$$

Das ist aber genau die Fahrzeugfolgegleichung.

Die so ermittelte Beschleunigung  $\ddot{x}_{n+1}(t)$  wird - ebenso wie bei der numerischen Berechnung - über ein Zeitintervall  $\Delta t$  konstant gehalten.

Durch Parallelverschieben der Geraden in ein  $\dot{x}$ - $t$ -Koordinatensystem (Abb. A1.10) erhält man für das Zeitintervall  $\Delta t$  den Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs  $n+1$ .

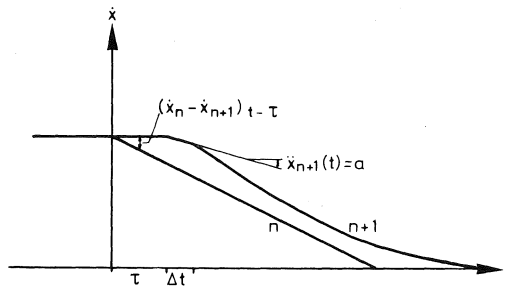


Abb. A1.10

Auch bei diesem Verfahren hängt die Genauigkeit von der Größe des Zeitintervalls  $\Delta t$  (entspricht dem Zeitintervall  $A$  bei der numerischen Berechnung) ab.

Anhang 2

Algol-Programm zur Berechnung der Fahrzeugfolgegleichung mit  $l = m = 0$

PROGRAM

```
⊕
*BEGIN**COMMENT*FAHRZEUGFOLGEGLEICHUNG 4;
*INTEGER*N, O, Z, I;
*REAL*A, DELTA, L;
*ARRAY*V, B[1:5, 0:550];
*PROCEDURE*NL;
OUTLINE(**SYSPRINT**, 1);
*PROCEDURE*FIXT(N, M, X);
*VALUE*N, M, X;
*INTEGER*N, M;
*REAL*X;
OUTNUMBER (**SYSPRINT **, 0, 27, 27, M, X, 0, X);
READ(N, A);
OUTDATA (**SYSPRINT**, **
```

```
ANZAHL DER ZEITSCHRITTE **:N, **GROSSE DES ZEITSCHRITTES IN SEC **:);
FIXT(5, 1, A);
OUTDATA(**SYSPRINT**, **
```

```
GESCHWINDIGKEIT DES FUEHRUNGSFAHRZEUGES FUER JEDE SEKUNDE**);NL;
*FOR*I:=0*STEP*1*UNTIL*N*DO*
```

```
*BEGIN*
*IF*I*LESS*100*THEN*
V[1, I]:=-15-5*X*SIN(.4*I*A)
*ELSE*
```

```
V[1, I]:=-18.79;
*END*;
*FOR*I:=0*STEP*10*UNTIL*N*DO*
```

```
*BEGIN*
FIXT(2, 0, I*A);
FIXT(6, 2, V[1, I]);NL;
*END*;
```

```
ANFANG:
READ(DELTA, O, L);
OUTDATA(**SYSPRINT**, **
```

```
VERAENDERLICHE DATEN: **);
```

```
NL;
FIXT(5, 2, DELTA);
FIXT(5, 2, O);
FIXT(5, 2, L);NL;
OUTDATA(**SYSPRINT**, **
```

```
GESCHWINDIGKEITEN DER FOLGEFAHRZEUGE FUER JEDE SEKUNDE**);NL;
```

```
*FOR*Z:=-2*STEP*1*UNTIL*O*DO*
```

```
*FOR*I:=0*STEP*1*UNTIL*N*DO*
```

```
*BEGIN*
*IF*I*A*GREATER*(Z-1)*DELTA*THEN*
```

```
*BEGIN*
V[Z, I]:=-4*B[Z, I-1]+V[Z, I-1];
```

```
*GOTO*M1;
```

```
*END*
```

```
*ELSE**BEGIN*V[Z, I]:=-15;*END*;
```

```
M1: B[Z, I+DELTA/A:-L*(V[Z-1, I]-V[Z, I]);
*END*;
*END*;
*FOR I:-0*STEP*10*UNTIL* N*DO*
*BEGIN*
NL;
FIXT(2,0, I*A);
*FOR Z:-2*STEP*1*UNTIL* 0*DO*
FIXT(5,2, V[Z, I]);
*END*;
*GOTO* ANFANG;
*END*;
⊕
END
⊕
```



Anhang 3

Algol-Programm zur Berechnung der Fahrzeugfolgegleichung mit beliebigen Exponenten

```

PROGRAM
*BEGIN* COMMENT *FAHRZEUGFOLGLEICHUNG 8;
*INTEGER* N, Q, Z, I, V0, X0, I1, I0, Z1;
*REAL* A, DELTA, LLM, L, M;
*ARRAY* V, B, X[1:3, 0:900];
*PROCEDURE* NL;
OUTLINE( **SYSPRINT** , 1);
*PROCEDURE* FIXT(N, M, X);
*VALUE* N, M, X;
*INTEGER* N, M;
*REAL* X;
OUTNUMBER( **SYSPRINT** , 0, 27, N, M, 0, X);
READ(N, A, V0, X0, Q, L, M);
OUTDATA( **SYSPRINT** , **
AUSGANGSGE- ANZAHL DER GROSSE DES AUSGANGS- ANZAHL DER EXPO- EXPO-
SCHWINDIGK. ZEITSCHRITTE ZEITSCHRITTES ABSTAND FAHRZEUGE EXPO- EXPO-
V0[M/SEC] N A[SEC] X0[M] Q[FHZ] L MENT MENT
**); NL;
FIXT(4, 2, V0);
FIXT(11, 0, N);
FIXT(9, 2, A);
FIXT(9, 2, X0);
FIXT(10, 0, Q);
FIXT(10, 2, L);
FIXT(6, 2, M); NL; NL;
OUTDATA( **SYSPRINT** , **
GESCHWINDIGKEIT , POSITION UND
BESCHLEUNIGUNG DES FUHRUNGSFAHRZEUGES FUER JEDE SEKUNDE
TESEC] V(1,T)[M/SEC] X(1,T)[M] B(1,T)[M/SECSEC]**); NL;
*FOR* I: -0 *STEP* 1 *UNTIL* N *DO*
*BEGIN*
*IF* I *LESS* 500 *THEN*
*BEGIN*
V[1, I]: -V0 - 5 * SIN(.4 - I - A);
B[1, I]: -5 - 4 * COS(.4 - I - A);
X[1, I]: -(Q - 1) * X0 - 12.5 * V0 - I * A + 12.5 * COS(.4 - I - A);
*GOTO* M1; *END*
*ELSE* *BEGIN*
V[1, I]: -V0 + 3.79;
B[1, I]: -0.00;
X[1, I]: -A - V[1, I - 1] * X[1, I - 1];
*END*;
M1: *END*;
*FOR* I: -0 *STEP* 50 *UNTIL* N *DO*
*BEGIN*
FIXT(3, 0, I - A);
FIXT(8, 2, V[1, I]);
FIXT(10, 2, X[1, I]);
FIXT(9, 2, B[1, I]); NL;
*END*;
ANFANG:
READ(DELTA, LLM); NL; NL; NL;
OUTDATA( **SYSPRINT** , **
VERAENDERLICHE DATEN:
DELTA[SEC] LLM[-]**); NL;
FIXT(3, 2, DELTA);
FIXT(8, 2, LLM); NL;
OUTDATA( **SYSPRINT** , **
GESCHWINDIGKEITEN, POSITIONEN UND
BESCHLEUNIGUNGEN DER FOLGEFAHRZEUGE FUER ALLE 0.5 SEKUNDEN
TESEC] V(2,T) V(3,T) X(2,T) X(3,T) B(2,T) B(3,T)**); NL;

```

```
*FOR'2:-2'STEP'1'UNTIL'Q'DO'  
*BEGIN'  
Z1:=-Z-1;  
X[Z,0]:=(Q-Z)-XB;  
V[Z,0]:=-VB;  
B[Z,0]:=-B.00;  
*FOR'1:-1'STEP'1'UNTIL'N'DO'  
*BEGIN'  
I1:=-I-1;  
ID:=-DELTA/A;  
*IF'I-A'NOTGREATER'(Z1)-DELTA'THEN'  
*BEGIN'  
V[Z,1]:=-VB;  
X[Z,1]:=-A-V[Z,11]+X[Z,11];  
B[Z,1]:=-B;  
*END'  
*ELSE'*BEGIN'  
V[Z,1]:=-A-B[Z,11]+V[Z,11];  
X[Z,1]:=-.5*A-A-B[Z,11]+A-V[Z,11]+X[Z,11];  
B[Z,1]:=-LLM-(V[Z,1]*POWER'(M))/((X[Z1,10]-X[Z,10])*POWER'(L))-(V[Z1,10]-V[Z,10]);  
*END';  
*END';  
*END';  
*FOR'1:-8'STEP'25'UNTIL'N'DO'  
*BEGIN'NL;  
FIXT(2,2,1-A);  
FIXT(4,2,V[2,1]);  
FIXT(4,2,V[3,1]);  
FIXT(4,2,X[2,1]);  
FIXT(4,2,X[3,1]);  
FIXT(4,2,B[2,1]);  
FIXT(4,2,B[3,1]);  
*END';  
*GO TO'ANFANG;  
*END';  
*  
END  
*  
*
```

Anhang 4

Algol-Programm zur Berechnung der Grenzkurven

```

PROGRAMM
*BEGIN**COMMENT*FAHRZEUGFOLGEGLEICHUNG 7 STABILITAETSBERECHNUNG;
*INTEGER*N,Q,Z,Z1,I,I1,LD,ZD1;
*REAL*A,DELTA,LD,VB,XB,ZD,L,M,LMIN,KRIT1,KRIT2,DL,LMAX,KRMAX,AM,FR;
*ARRAY*V,B,X[1:3,0:600];
*ARRAY*KRIT,DMIN,LMAX[1:3];
*PROCEDURE*HL;
OUTLINE(**SYSPRINT**,1);
*PROCEDURE*FIXT(N,H,X);
*VALUE*N,H,X;
*INTEGER*N,H,B;
*REAL*X;
OUTNUMBER(**SYSPRINT**,B,Z7,Z7,H,H,0,X);
ANFANG:
READ(N,A,VB,XB,Q,L,M,LMIN,KRIT1,KRIT2,DL,LMAX,AM,FR);
OUTDATA(**SYSPRINT**,**
ANSGANGSGE- ANZAHL DER GROSSE DES AUSGANGS- ANZAHL DER EXPO- EXPO-
SCHWINDIGK. ZEITSCHRITTE ZEITSCHRITTES ABSTAND FAHRZEUGE NENT NENT
VB[M/SEC] N A[SEC] XB[M] B[HZ] L H**);NL;
FIXT(4,2,VB);
FIXT(11,0,N);
FIXT(9,2,A);
FIXT(9,2,XB);
FIXT(10,0,Q);
FIXT(0,2,L);
FIXT(4,2,H);
FIXT(4,2,AM);
FIXT(4,2,FR);HL;NL;
OUTDATA(**SYSPRINT**,**
STOERFUNKTION : VC1,1]:=VB - AM + AM-COS( FR-T )**);NL;
*FOR*I:=0*STEP*1*UNTIL'H*DO*
*BEGIN*
VC1,1]:=VB-AM+AM-COS(FR-I-A);
BE1,1]:=-AM-FR-SIN(FR-I-A);
XC1,1]:=(Q-I)*XB*(VB-AM)-I*A*(AM/FR)-(SIN(FR-I-A));
H1:=END;
OUTDATA(**SYSPRINT**,**
DATEN ZUR BERECHNUNG DER STABILITAETSRENZFAELLE
L0=LMIN;
M21=DELTA:-B.1;
M22:*FOR*Z:=2*STEP*1*UNTIL*Q*DO**BEGIN*
Z1:=Z-1;
XEZ,H]:=(Q-Z)*XB;
VEZ,H]:=VB;
ZD:=(Z-1)-DELTA;
BEZ,H]:=B;
*FOR*I:=1*STEP*1*UNTIL*N*DO*
*BEGIN*
I1:=I-1;
LD:=I-DELTA/A;
*IF*I-A*GREATER*ZD*THEN*
*BEGIN*
VEZ,1]:=A-BEZ,11]+VEZ,11];
*IF*VEZ,1]*NOTGREATER*2*INEN**BEGIN*

```

```
VCZ, I ]:-# .1;
XCZ, I ]:=XCZ, I I];
BCZ, I ]:-#;
*END**ELSE**BEGIN*
XCZ, I ]:=-.5-A-A*#CZ, I I]+A-VCZ, I I]*XCZ, I I];
*IF*(XCZ1, I D]-XCZ, I D)]*NOTGREATER*#*THEN*
XCZ, I D ]:-XCZ1, I D]-# .1;
BCZ, I ]:-L#-(VCZ, I ]*POWER*(M))/((XCZ1, I D]-XCZ, I D)]*POWER*(L))-VCZ1, I D]-VCZ, I D)]; *END*;
*END*
*ELSE**BEGIN*
VCZ, I ]:-V#;
XCZ, I ]:-A-VCZ, I I]*XCZ, I I];
BCZ, I ]:-#;
*END*;
*END*;
*FOR*I:=-ZD/A.#*STEP*1*UNTIL*N*DO**BEGIN*
*IF*BCZ, I ]*GREATER*BCZ, I -1]*THEN**BEGIN*
BMINCZ ]:-BCZ, I I];
*GOTO*M23;
*END*; *END*;
M23:ZD1:=-ZD/A.#M;
M231:*IF*BCZ, ZD1]*LESS*#.#*THEN**BEGIN*
ZD1:=-ZD1.#5#;
*GOTO*M231;
*END**ELSE**BEGIN*
I:=-ZD1;
M232:*IF*BCZ, I ]*LESS*BCZ, I -1]*THEN**BEGIN*
TEZ ]:-I-A;
BMAXCZ ]:-BCZ, I I];
*GOTO*M24;
*END**ELSE**BEGIN*
*IF*I*EQUAL*N*THEN**BEGIN*
TEZ ]:-N-A;
BMAXCZ ]:-#CZ, N I];
*GOTO*M24;
*END**ELSE**BEGIN*
I:=-I+1;
*GOTO*M232;
*END*; *END*; *END*;
M24:*FOR*I:=-ZD/A.#2*STEP*1*UNTIL*N*DO*
*BEGIN*
*IF*(XCZ1, I ]]-XCZ, I I)]*GREATER*(XCZ1, I -1]-XCZ, I -1)]*THEN*
*BEGIN*
KRITCZ ]:-L#-DELTA#-(VCZ, I +DELTA/A)*POWER*(M))/((XCZ1, I ]]-XCZ, I I)]*POWER*(L));
FIXT(2, 2, L#);
FIXT(4, 2, DELTA);
FIXT(5, #, Z);
FIXT(5, 2, I-A);
FIXT(4, 2, (XCZ1, I ]]-XCZ, I I]));
FIXT(5, 2, VCZ, I +DELTA/A)];
FIXT(7, 3, KRITCZ)];
FIXT(7, 2, BMINCZ)];
FIXT(6, 2, BMAXCZ)];
FIXT(4, 2, TEZ)]; NL;
*GOTO*M3;
*END*; *END*;
M3:*END*;
```

```
*IF KRI T Q J * GREATER * KRI T Q - 1 J * THEN *  
KRMAX: = KRI T Q J  
*ELSE *  
KRMAX: = KRI T Q - 1 J;  
*IF KRMAX * GREATER * KRI T 1 * THEN *  
DELTA: = DELTA * 0, 02  
*ELSE *  
DELTA: = DELTA * 0, 1;  
*IF KRMAX * LESS * KRI T 2 * THEN *  
*GOTO * M 22  
*ELSE * BEGIN *  
L0: = L0 * DL;  
*IF L0 * GREATER * LMAX * THEN * *GOTO * M 4  
*ELSE * *GOTO * M 21;  
M4: * END *;  
*GOTO * ANFANG;  
*END *;  
*  
END *  
* *  
* *
```

Anhang 5

Ergebnis Ausdruck

AUSGANGSGE- SCHNUNDEIGEN- VE[M/SEC]	ANZAHL DER ZEITSCHRITTE N	GRÖSSE DES ZEITSCHRITTES A[SEC]	AUSGANGS- ABSTAND XO[M]	ANZAHL DER FAHRZEUGE Q[FMZ]	EXPO- NENT L	EXPO- NENT M	2.50	0.40
20.00	500	0.02	20.00	3	1.00	1.00		

STÖRFUNKTION :  $V[1,0] := VO - AM + AM \times \cos( FRAT )$

DATEN ZUR BERECHNUNG DER STABILITÄTSGRENZFAELLE

LO	DELTA	Z	T[DXM]	DXMIN	VMIN	KRIT[EZ]	BMIN	BMAX	T[BMAX]
0.40	0.10	2	9.44	10.52	15.47	0.059	-0.96	0.69	12.00
0.40	0.10	3	11.16	11.29	15.91	0.056	-0.75	20.00	24.12
0.40	0.20	2	9.36	10.44	15.42	0.119	-0.89	0.69	12.00
0.40	0.20	3	11.10	11.14	15.82	0.114	-0.78	20.00	24.12
0.40	0.30	2	9.28	10.35	15.37	0.178	-0.90	0.70	12.00
0.40	0.30	3	11.06	10.98	15.73	0.172	-0.82	20.00	24.12
0.40	0.40	2	9.20	10.26	15.31	0.239	-0.92	0.71	12.00
0.40	0.40	3	11.00	10.40	15.63	0.232	-0.85	0.22	12.00
0.40	0.50	2	9.12	10.15	15.25	0.300	-0.94	0.72	12.00
0.40	0.50	3	10.92	10.61	15.52	0.293	-0.89	0.22	12.00
0.40	0.52	2	9.10	10.13	15.24	0.313	-0.95	0.72	12.00
0.40	0.52	3	10.92	10.57	15.50	0.305	-0.90	40.00	12.10
0.40	0.54	2	9.08	10.11	15.22	0.325	-0.95	0.73	12.00
0.40	0.54	3	10.90	10.53	15.47	0.317	-0.91	40.00	12.10
0.40	0.56	2	9.06	10.09	15.21	0.338	-0.96	0.73	12.00
0.40	0.56	3	10.88	10.49	15.45	0.330	-0.92	20.00	24.12
0.40	0.58	2	9.06	10.07	15.20	0.350	-0.96	0.73	12.00
0.40	0.58	3	10.88	10.44	15.42	0.343	-0.93	20.00	24.12
0.40	0.60	2	9.04	10.05	15.18	0.363	-0.97	0.73	12.00
0.40	0.60	3	10.86	10.40	15.40	0.355	-0.94	20.00	24.12
0.40	0.62	2	9.02	10.02	15.17	0.375	-0.97	0.74	12.00
0.40	0.62	3	10.84	10.36	15.37	0.368	-0.95	20.00	24.12
0.40	0.64	2	9.00	10.00	15.16	0.388	-0.98	0.74	12.00
0.40	0.64	3	10.84	10.31	15.34	0.381	-0.96	20.00	24.12
0.40	0.66	2	8.98	9.98	15.14	0.401	-0.99	0.74	12.00
0.40	0.66	3	10.82	10.26	15.31	0.394	-0.97	20.00	24.12
0.40	0.68	2	8.96	9.95	15.13	0.413	-0.99	0.75	12.00
0.40	0.68	3	10.80	10.21	15.29	0.407	-0.98	20.00	24.12
0.40	0.70	2	8.96	9.93	15.11	0.426	-0.99	0.75	12.00
0.40	0.70	3	10.80	10.17	15.26	0.420	-0.99	20.00	24.12
0.40	0.72	2	8.94	9.91	15.10	0.439	-1.00	0.75	12.00
0.40	0.72	3	10.78	10.12	15.22	0.433	-1.00	20.00	24.12
0.40	0.74	2	8.92	9.88	15.08	0.452	-1.00	0.76	12.00
0.40	0.74	3	10.76	10.06	15.19	0.447	-1.01	20.00	24.12
0.40	0.76	2	8.90	9.85	15.07	0.465	-1.01	0.76	12.00
0.40	0.76	3	10.76	10.01	15.16	0.460	-1.02	20.00	24.12
0.40	0.78	2	8.88	9.83	15.05	0.479	-1.02	0.76	12.00
0.40	0.78	3	10.74	9.96	15.13	0.474	-1.04	20.00	24.12
0.40	0.80	2	8.86	9.80	15.03	0.491	-1.02	0.77	12.00
0.40	0.80	3	10.72	9.90	15.09	0.488	-1.05	20.00	24.12
0.40	0.82	2	8.86	9.78	15.02	0.504	-1.03	0.77	12.00
0.40	0.82	3	10.72	9.84	15.06	0.502	-1.06	20.00	24.12
0.40	0.84	2	8.84	9.75	15.00	0.517	-1.03	0.78	12.00
0.40	0.84	3	10.70	9.78	15.02	0.516	-1.07	20.00	24.12

0.40	0.86	2	8.82	9.72	14.98	0.530	-1.04	0.78	12.00
0.40	0.86	3	10.70	9.72	14.99	0.530	-1.09	0.26	12.00
0.40	0.88	2	8.80	9.69	14.97	0.544	-1.05	0.78	12.00
0.40	0.88	3	10.68	9.66	14.95	0.545	-1.10	0.26	12.00
0.40	0.90	2	8.78	9.66	14.95	0.557	-1.05	0.79	12.00
0.40	0.90	3	10.68	9.60	14.91	0.559	-1.12	0.27	12.00
0.40	0.92	2	8.76	9.63	14.93	0.570	-1.06	0.79	12.00
0.40	0.92	3	10.66	9.53	14.87	0.574	-1.13	0.27	12.00
0.60	0.90	2	9.70	12.79	15.29	0.072	-0.90	0.78	12.00
0.60	0.90	3	10.46	13.18	15.57	0.071	-0.82	0.43	12.00
0.60	0.92	2	9.02	12.73	15.25	0.144	-0.92	0.79	12.00
0.60	0.92	3	10.40	13.07	15.49	0.142	-0.85	0.44	12.00
0.60	0.93	2	8.44	12.67	15.21	0.216	-0.94	0.80	12.00
0.60	0.93	3	10.34	12.95	15.41	0.214	-0.88	0.45	12.00
0.60	0.94	2	8.86	12.60	15.16	0.289	-0.96	0.81	12.00
0.60	0.94	3	10.26	12.82	15.31	0.287	-0.92	0.46	12.00
0.60	0.95	2	8.76	12.53	15.11	0.362	-0.98	0.83	12.00
0.60	0.95	3	10.18	12.68	15.22	0.360	-0.95	0.47	12.00
0.60	0.95	2	8.76	12.52	15.10	0.376	-0.98	0.83	12.00
0.60	0.95	3	10.18	12.65	15.19	0.375	-0.96	0.47	12.00
0.60	0.95	2	8.74	12.50	15.08	0.391	-0.99	0.83	12.00
0.60	0.95	3	10.16	12.62	15.17	0.389	-0.97	0.48	12.00
0.60	0.95	2	8.72	12.49	15.07	0.406	-0.99	0.84	12.00
0.60	0.95	3	10.14	12.59	15.15	0.404	-0.98	0.48	12.00
0.60	0.95	2	8.70	12.47	15.06	0.420	-1.00	0.84	12.00
0.60	0.95	3	10.12	12.56	15.13	0.419	-0.99	0.48	12.00
0.60	0.95	2	8.68	12.46	15.05	0.435	-1.00	0.84	12.00
0.60	0.95	3	10.10	12.53	15.11	0.434	-1.00	0.49	12.00
0.60	0.95	2	8.66	12.44	15.04	0.450	-1.01	0.84	12.00
0.60	0.95	3	10.10	12.50	15.08	0.449	-1.01	0.49	12.00
0.60	0.95	2	8.64	12.42	15.03	0.464	-1.01	0.85	12.00
0.60	0.95	3	10.08	12.47	15.06	0.464	-1.02	0.50	12.00
0.60	0.95	2	8.62	12.41	15.02	0.479	-1.02	0.85	12.00
0.60	0.95	3	10.06	12.43	15.04	0.479	-1.03	0.50	12.00
0.60	0.95	2	8.60	12.39	15.01	0.494	-1.02	0.85	12.00
0.60	0.95	3	10.04	12.40	15.01	0.494	-1.04	0.51	12.00
0.60	0.95	2	8.58	12.38	14.99	0.509	-1.03	0.85	12.00
0.60	0.95	3	10.02	12.37	14.99	0.509	-1.05	0.51	12.00
0.60	0.95	2	8.56	12.36	14.98	0.524	-1.03	0.86	12.00
0.60	0.95	3	10.00	12.33	14.96	0.524	-1.06	0.52	12.00
0.60	0.95	2	8.54	12.34	14.97	0.538	-1.04	0.86	12.00
0.60	0.95	3	9.98	12.29	14.93	0.539	-1.07	0.52	12.00
0.60	0.95	2	8.52	12.32	14.96	0.553	-1.04	0.86	12.00
0.60	0.95	3	9.46	12.26	14.91	0.555	-1.09	0.53	12.00
0.60	0.95	2	8.52	12.31	14.94	0.568	-1.05	0.87	12.00
0.60	0.95	3	9.94	12.22	14.89	0.570	-1.10	0.53	12.00
0.80	0.90	2	8.98	14.19	15.20	0.086	-0.93	0.85	12.00
0.80	0.90	3	10.02	14.41	15.39	0.085	-0.87	0.58	12.00
0.80	0.90	2	8.80	14.15	15.16	0.171	-0.94	0.86	12.00
0.80	0.90	3	9.94	14.33	15.32	0.171	-0.89	0.59	12.00
0.80	0.90	2	8.72	14.10	15.12	0.257	-0.96	0.88	12.00
0.80	0.90	3	9.86	14.24	15.24	0.257	-0.92	0.61	12.00
0.80	0.90	2	8.62	14.05	15.08	0.343	-0.98	0.89	12.00
0.80	0.90	3	9.80	14.15	15.16	0.343	-0.95	0.62	12.00
0.80	0.90	2	8.60	14.04	15.07	0.361	-0.98	0.89	12.00
0.80	0.90	3	9.78	14.13	15.14	0.360	-0.96	0.62	12.00
0.80	0.90	2	8.60	14.03	15.06	0.378	-0.98	0.89	12.00
0.80	0.90	3	9.76	14.11	15.12	0.377	-0.97	0.63	12.00
0.80	0.90	2	8.58	14.02	15.05	0.395	-0.99	0.90	12.00
0.80	0.90	3	9.74	14.09	15.11	0.395	-0.97	0.63	12.00
0.80	0.90	2	8.56	14.01	15.04	0.412	-0.99	0.90	12.00
0.80	0.90	3	9.72	14.06	15.09	0.412	-0.98	0.63	12.00
0.80	0.90	2	8.54	14.00	15.04	0.430	-0.99	0.90	12.00
0.80	0.90	3	9.72	14.04	15.07	0.429	-0.99	0.64	12.00
0.80	0.90	2	8.52	13.99	15.03	0.447	-1.00	0.91	12.00

0.80	0.52	3	9.70	14.02	15.05	0.447	-1.00	0.64	12.00
0.80	0.54	2	8.50	13.98	15.02	0.464	-1.00	0.91	12.00
0.80	0.54	3	9.68	14.00	15.03	0.464	-1.00	0.64	12.00
0.80	0.56	2	8.48	13.97	15.01	0.481	-1.01	0.91	12.00
0.80	0.56	3	9.66	13.98	15.02	0.481	-1.01	0.65	12.00
0.80	0.58	2	8.46	13.96	15.00	0.499	-1.01	0.91	12.00
0.80	0.58	3	9.64	13.96	15.00	0.499	-1.02	0.65	12.00
0.80	0.60	2	8.44	13.95	14.99	0.516	-1.02	0.92	12.00
0.80	0.60	3	9.62	13.94	14.98	0.516	-1.03	0.65	12.00
0.80	0.62	2	8.42	13.94	14.98	0.533	-1.02	0.92	12.00
0.80	0.62	3	9.60	13.91	14.96	0.533	-1.04	0.66	12.00
0.80	0.64	2	8.40	13.93	14.97	0.550	-1.02	0.92	12.00
0.80	0.64	3	9.60	13.89	14.94	0.551	-1.05	0.66	12.00
0.80	0.66	2	8.38	13.92	14.96	0.568	-1.03	0.93	12.00
0.80	0.66	3	9.58	13.87	14.92	0.568	-1.06	0.67	12.00
1.00	0.40	2	8.72	15.14	15.14	0.100	-0.94	0.90	12.00
1.00	0.40	3	9.70	15.28	15.28	0.100	-0.89	0.69	12.00
1.00	0.20	2	8.64	15.11	15.11	0.200	-0.96	0.91	12.00
1.00	0.20	3	9.62	15.21	15.21	0.200	-0.92	0.70	12.00
1.00	0.30	2	8.56	15.07	15.07	0.300	-0.97	0.93	12.00
1.00	0.30	3	9.54	15.15	15.14	0.300	-0.94	0.72	12.00
1.00	0.40	2	8.46	15.04	15.04	0.400	-0.99	0.94	12.00
1.00	0.40	3	9.46	15.07	15.07	0.400	-0.97	0.74	12.00
1.00	0.42	2	8.44	15.03	15.03	0.420	-0.99	0.94	12.00
1.00	0.42	3	9.44	15.06	15.06	0.420	-0.98	0.74	12.00
1.00	0.44	2	8.42	15.02	15.02	0.440	-0.99	0.94	12.00
1.00	0.44	3	9.42	15.04	15.04	0.440	-0.98	0.75	12.00
1.00	0.46	2	8.40	15.01	15.01	0.460	-0.99	0.95	12.00
1.00	0.46	3	9.42	15.03	15.03	0.460	-0.99	0.75	12.00
1.00	0.48	2	8.38	15.01	15.01	0.480	-1.00	0.95	12.00
1.00	0.48	3	9.40	15.01	15.01	0.480	-1.00	0.75	12.00
1.00	0.50	2	8.38	15.00	15.00	0.500	-1.00	0.95	12.00
1.00	0.50	3	9.38	15.00	14.99	0.500	-1.00	0.76	12.00
1.00	0.52	2	8.36	14.99	14.99	0.520	-1.00	0.96	12.00
1.00	0.52	3	9.36	14.98	14.98	0.520	-1.01	0.76	12.00
1.00	0.54	2	8.34	14.98	14.98	0.540	-1.01	0.96	12.00
1.00	0.54	3	9.34	14.97	14.96	0.540	-1.02	0.76	12.00
1.00	0.56	2	8.32	14.98	14.97	0.560	-1.01	0.96	12.00
1.00	0.56	3	9.32	14.95	14.95	0.560	-1.02	0.77	12.00
1.00	0.58	2	8.30	14.97	14.97	0.580	-1.01	0.96	12.00
1.00	0.58	3	9.32	14.93	14.93	0.580	-1.03	0.77	12.00
1.20	0.40	2	8.62	15.83	15.11	0.115	-0.95	0.94	12.00
1.20	0.40	3	9.46	15.92	15.21	0.115	-0.91	0.77	12.00
1.20	0.20	2	8.52	15.80	15.07	0.229	-0.97	0.95	12.00
1.20	0.20	3	9.38	15.87	15.15	0.229	-0.93	0.79	12.00
1.20	0.30	2	8.44	15.78	15.04	0.343	-0.98	0.96	12.00
1.20	0.30	3	9.30	15.81	15.09	0.343	-0.96	0.81	12.00
1.20	0.32	2	8.42	15.77	15.04	0.365	-0.98	0.96	12.00
1.20	0.32	3	9.28	15.80	15.07	0.366	-0.96	0.81	12.00
1.20	0.34	2	8.40	15.76	15.03	0.389	-0.93	0.96	12.00
1.20	0.34	3	9.25	15.79	15.06	0.389	-0.97	0.81	12.00
1.20	0.36	2	8.38	15.75	15.02	0.412	-0.99	0.97	12.00
1.20	0.36	3	9.24	15.78	15.05	0.412	-0.97	0.82	12.00
1.20	0.38	2	8.36	15.75	15.02	0.435	-0.99	0.97	12.00
1.20	0.38	3	9.24	15.77	15.03	0.435	-0.98	0.82	12.00
1.20	0.40	2	8.34	15.75	15.01	0.458	-0.99	0.97	12.00
1.20	0.40	3	9.22	15.76	15.02	0.458	-0.98	0.83	12.00
1.20	0.42	2	8.32	15.74	15.00	0.480	-0.99	0.97	12.00
1.20	0.42	3	9.20	15.74	15.01	0.480	-0.99	0.83	12.00
1.20	0.44	2	8.30	15.74	15.00	0.503	-1.00	0.98	12.00
1.20	0.44	3	9.18	15.73	14.99	0.503	-0.99	0.83	12.00
1.20	0.46	2	8.28	15.73	14.99	0.526	-1.00	0.98	12.00
1.20	0.46	3	9.16	15.72	14.98	0.526	-1.00	0.84	12.00
1.20	0.48	2	8.26	15.72	14.98	0.549	-1.00	0.98	12.00
1.20	0.48	3	9.14	15.71	14.97	0.549	-1.00	0.84	12.00



Anhang 6

Vergleich der maximalen Verkehrsstärken

Die Gln. (4.3) bis (4.7) können mit den folgenden von HOEFS (20) errechneten Beziehungen zu Funktionen von  $\lambda_{1,m}$  umgeformt werden:

$$\begin{matrix} 1 < 1 \\ m < 1 \\ (m < 1) \end{matrix} \quad \lambda_{1,m} = \frac{1-m}{1-m} \bar{v}_{m,opt} \quad k_{max}^{1-m} \quad 1-1 \quad (A6.1)$$

$$\begin{matrix} 1 = 1 \\ m < 1 \end{matrix} \quad \lambda_{1,m} = \bar{v}_{m,opt} \quad 1-m \quad (A6.2)$$

$$\begin{matrix} 1 > 1 \\ m < 1 \end{matrix} \quad \lambda_{1,m} = \frac{1-1}{1-m} \cdot \frac{\bar{v}_{m,w}^{1-m}}{k_{max}^{1-1}} \quad (A6.3)$$

$$\begin{matrix} 1 > 1 \\ m = 1 \end{matrix} \quad \lambda_{1,m} = \frac{1}{k_{opt}^{1-1}} \quad (A6.4)$$

$$\begin{matrix} 1 > 1 \\ m > 1 \\ (m < 1) \end{matrix} \quad \lambda_{1,m} = \frac{1-1}{1-m} \frac{1}{\bar{v}_{m,w}^{m-1} k_{opt}^{1-1}} \quad (A6.5)$$

Werden die Gln. (A6.1) bis (A6.5) nach  $\bar{v}_{m,opt}$  bzw.  $\bar{v}_{m,w}$  aufgelöst und in die Gln. (4.3) bis (4.7) eingesetzt, erhält man die makroskopischen Beziehungen als Funktionen von  $\lambda_{1,m}$ .

Damit lassen sich für beliebige 1-m-Kombinationen die maximalen Verkehrsstärken  $q_{max}$  errechnen. Der Vergleich der maximalen Verkehrsstärken kann natürlich für beliebige  $\lambda_{1,m}$ -Werte durchgeführt werden. Interessant sind aber vor allem solche Werte, die auf einer Grenzkurve zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität liegen. Da jedoch ein Vergleich der einzelnen  $q_{max}$  in Abhängigkeit von  $\lambda_{1,m}$  nicht sehr anschaulich ist, zu jedem Wert von  $\lambda_{1,m}$  aber ein Wert der Reaktionszeit  $\tau$  gehört (weil eben nur Wertepaare auf der Grenzkurve betrachtet werden), können für beliebige 1-m-Kombinationen die maximalen Verkehrsstärken in Abhängigkeit von  $\tau$  ermittelt werden.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die folgenden Bedingungen zugrunde gelegt:

1. Die Geschwindigkeitsganglinie des Führungsfahrzeugs  $\dot{x}_1(t)$  ist für alle l-m-Kombinationen gleich.
2. Ausgangsabstand  $\Delta x_0$  und Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  sind für jede l-m-Kombination gleich.

Mit dem in Absch. I.3.2.2 erläuterten Algol-Programm können Grenzkurven zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität als Funktion von  $\lambda_{1,m}$  und  $\tau$  ermittelt werden (vgl. Absch. I.3.2.3 und Abb. 15a). Über diese Kurven lassen sich für beliebige Reaktionszeiten  $\tau$  die zugehörigen Konstanten  $\lambda_{1,m}$  bestimmen, die, in die makroskopischen Gleichungen eingesetzt, Funktionen  $q = q(k)$  liefern, aus denen die maximalen Verkehrsstärken  $q_{\max}$  abgelesen und als Funktion von  $\tau$  aufgetragen werden können.

Für ein Beispiel sei dieses Verfahren erläutert. Hierbei und in allen weiteren Fällen wurde  $k_{\max} = 0,167$  [Fhz/m] gewählt - das entspricht einem Bruttoabstand der Fahrzeuge bei Stillstand von 6[m].

Für  $l = 1, m = 0$  liefert Gl.(4.4) die makroskopische Beziehung

$$q = \bar{v}_{m,opt} k \ln \frac{k_{\max}}{k}$$

Mit Gl. (A6.2) ergibt sich

$$\bar{v}_{m,opt} = \lambda_{1,0}$$

und somit

$$q = \lambda_{1,0} k \ln \frac{k_{\max}}{k}$$

Aus der Grenzkurve (Abb. A6.1) kann für jeden  $\lambda_{1,0}$ -Wert der dazugehörige  $\tau$ -Wert abgelesen werden.

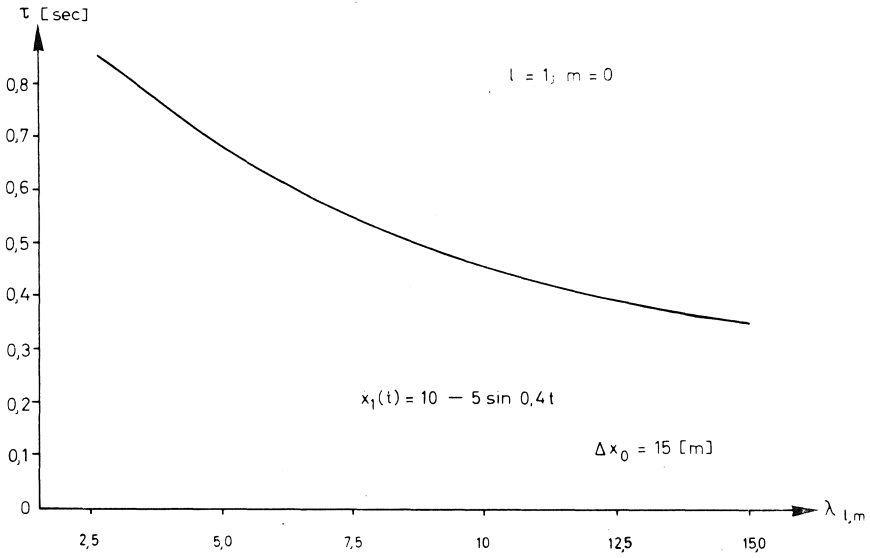
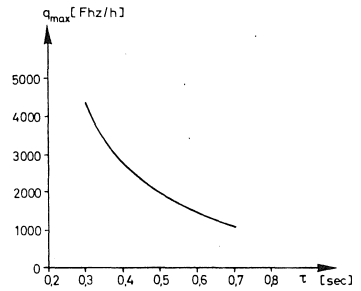
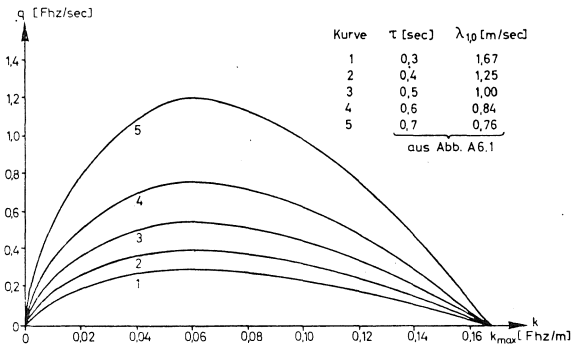


Abb. A6.1



a)

b)

Abb. A6.2

Jede  $\lambda_{1,0}$ - $\tau$ -Kombination liefert also ein Fundamentaldiagramm, aus dem die maximale Verkehrsstärke in Abhängigkeit von  $\tau$  abgelesen werden kann (Abb. A6.2).

An Abb. A6.2b erkennt man, daß mit abnehmender Reaktionszeit die maximale Verkehrsstärke  $q_{\max}$  schnell zunimmt. Während im heutigen Verkehr maximale Verkehrsstärken zwischen 1200 und 2000 Fahrzeugen pro Stunde und Spur je nach Straßentyp beobachtet werden (wobei diese Werte in aller Regel nur über kürzere Zeitintervalle als eine Stunde auftreten), kann z. B. durch eine auf der Fahrzeugfolgegleichung mit  $l = 1$  und  $m = 0$  beruhende automatische Abstandshaltung, bei der kleinere Reaktionszeiten möglich sind, die maximale Verkehrsstärke stark angehoben werden, wenn vorausgesetzt wird, daß bei den Fahrzeugeigenschaften keine Unterschiede auftreten (z. B. gleiche Verzögerungseigenschaften aller Fahrzeuge).

In Kap. I.4 wurden die Exponenten  $l$  und  $m$  wie folgt abgegrenzt:

$$0,5 \leq l \leq 2,8$$

$$0,2 \leq m \leq 0,8$$

Nur Exponenten innerhalb dieser Bereiche sind wirklichkeitstreu. Das bedeutet, daß nur die Gl. (4.3) bis (4.5) bzw. (A6.1) bis (A6.3) zur Ermittlung der  $q_{\max}$  herangezogen werden müssen, weil sie sich auf den Teilbereich der  $l$ - $m$ -Ebene beziehen, für den  $m < l$  ist.

Abb. A6.3 zeigt für  $l = 0,5$  und  $m < 0,5$ , also für ein Beispiel von  $l$ - $m$ -Kombinationen, deren makroskopische Beziehung  $q = q(k)$  von Gl. (4.3) angegeben wird, die Zusammenhänge zwischen der maximalen Verkehrsstärke  $q_{\max}$ , dem Exponenten  $m$  und der Reaktionszeit, wobei die gleichen Bedingungen wie bei Abb. A6.2 zugrunde gelegt wurden.

Abb. A6.4 zeigt für  $l = 1$  und  $m < 1$ , also für alle  $m$ - $l$ -Kombinationen, deren makroskopische Beziehung  $q = q(k)$  aus Gl. (4.4) abgeleitet werden kann, ebenfalls die gleichen Zusammenhänge. Dabei ist die Kurve der Abb. A6.2b als spezieller Fall gestrichelt eingezeichnet.

In Abb. A6.5 schließlich ist für ein Beispiel von aus Gl. (4.5) ableitbaren Funktionen  $q = q(k)$ , nämlich für  $l = 2$  und  $m < 1$  die gleiche Abhängigkeit dargestellt.

An diesen Abbildungen erkennt man, daß  $q_{\max}$  dann die größten Werte annimmt, wenn die Reaktionszeit  $\tau$  klein und der Exponent  $m$  groß sind. Mit wachsender Reaktionszeit bei gleichem  $m$  fällt  $q_{\max}$  ab. Dagegen kann, hauptsächlich bei höheren Werten von  $\tau$ , das Maximum von  $q_{\max}$  auch schon bei kleineren Werten von  $m$  auftreten, so daß die Kurve bei konstantem  $\tau$  für größer werdendes  $m$  wieder abfällt.

Zu allen drei Abbildungen sind außerdem die über die Gln. (A6.1) bis (A6.3) errechenbaren Parameter  $\bar{v}_{m,opt}$  (für die Gln. (A6.1) und (A6.2) ) bzw.  $\bar{v}_{m,w}$  (für Gl. (A6.3) ) in der  $\tau$ - $m$ -Ebene eingetragen. Man erkennt, daß diese Parameter anwachsen, wenn  $m$  größer und  $\tau$  kleiner werden. Verbindet man Punkte gleicher optimaler Geschwindigkeiten bzw. gleicher Wunschgeschwindigkeiten, so erhält man Linien gleicher optimaler Geschwindigkeiten bzw. gleicher Wunschgeschwindigkeiten, die es erlauben, aus dem gesamten Bereich der  $\tau$ - $m$ -Ebene jeweils einen Teilbereich herauszuheben, in dem realistische Werte von  $\bar{v}_{m,opt}$  bzw.  $\bar{v}_{m,w}$  auftreten, der also überhaupt nur als realistischer Bereich angesehen werden kann.

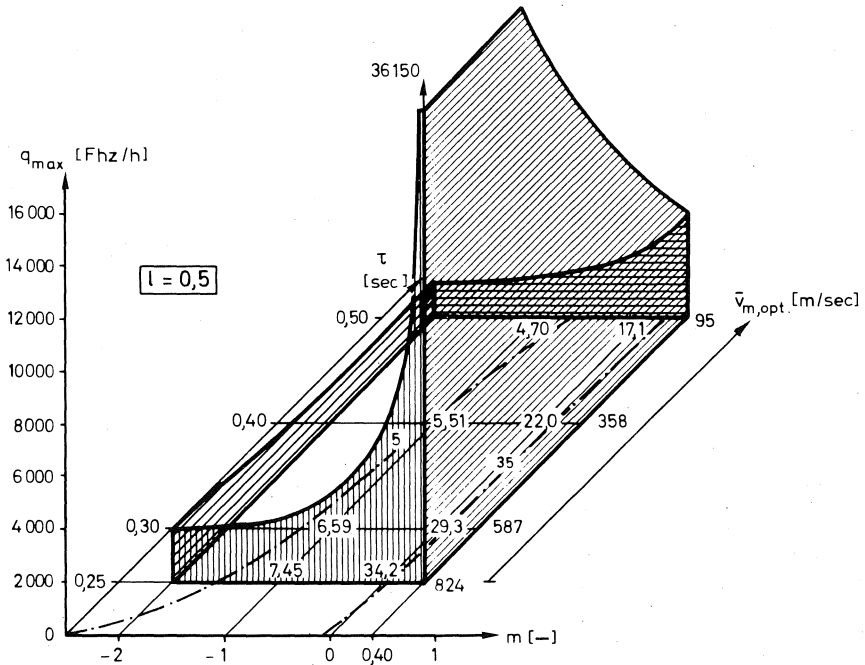


Abb. A 6.3

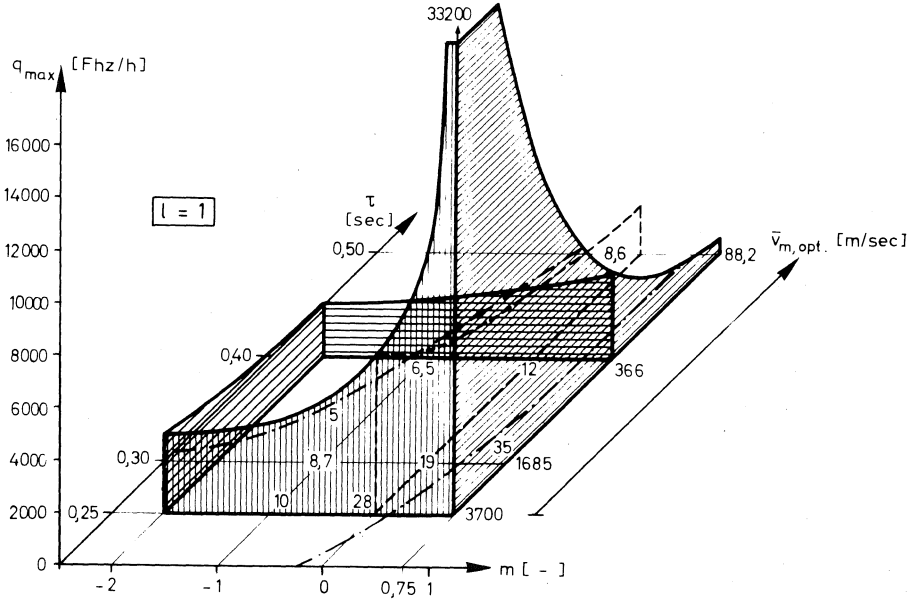


Abb. A6.4

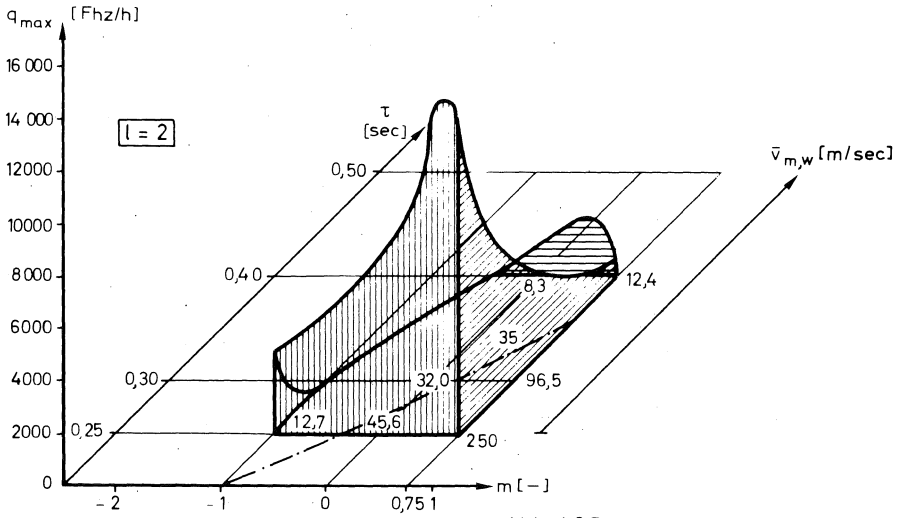


Abb. A6.5

In den Abb. A6.3 bis A6.5 wurden als Kriterium für einen realistischen Bereich optimale Geschwindigkeiten bzw. Wunschgeschwindigkeiten vorausgesetzt, die innerhalb der Grenzen von 5 [m/sec] und 35 [m/sec] liegen. Diese beiden Linien jeweils gleicher optimaler Geschwindigkeiten bzw. Wunschgeschwindigkeiten sind in allen drei Abbildungen als strichpunktierte Kurven eingezeichnet.

In den Abb. A6.3-5 wurden die maximalen Verkehrsstärken in Abhängigkeit von den Exponenten  $l$  und  $m$  und der Reaktionszeit  $\tau$  dargestellt. Die Art der Störfunktion spielte nur insofern eine Rolle, weil durch sie die Größen  $v_{\min}$  und  $\Delta x_{\min}$  (vgl. Gl. (3.11)) bestimmt werden (wobei ja viele verschiedene Störfunktionen mit jeweils gleichen Werten für  $v_{\min}$  und  $\Delta x_{\min}$  denkbar sind).

In der folgenden Betrachtung werden dagegen keine maximal erreichbaren Verkehrsstärken ermittelt. Errechnet man sich nämlich über die Fahrzeugfolgegleichung bei einer vorgegebenen Störfunktion des Führungsfahrzeugs die kinematischen Größen mehrerer Folgefahrzeuge, so können damit über eine räumlich-zeitliche Betrachtungsweise die Verkehrsstärke  $q$ , die Verkehrsdichte  $k$  und die mittlere momentane Geschwindigkeit  $\bar{v}_m$  einer Kolonne ermittelt werden.

Auch an diesen Ergebnissen läßt sich erkennen, wie sich die Verkehrsstärke bei Variation der Exponenten ändert. Zur Berechnung der Größen  $q$ ,  $k$  und  $\bar{v}_m$  bietet sich die räumlich-zeitliche Betrachtungsweise von EDIE (24) an (vgl. dazu auch LEUTZBACH (22) und COERS (25)). Hierbei wird aus der  $x$ - $t$ -Ebene, in der die Bewegungslinien der Fahrzeuge liegen, ein Flächenelement entsprechend Abb. A6.6 herausgetrennt, so daß die Geraden, deren Steigungen die Reisegeschwindigkeiten des ersten und letzten Fahrzeugs der betrachteten Kolonne sind, zwei gegenüberliegende Begrenzungslinien dieses Flächenelementes bilden. Die beiden anderen Begrenzungslinien werden durch die Summe der Ausgangsabstände  $\Delta x_o$  zum Zeitpunkt  $t_o$  und die Summe der Endabstände  $\Delta x_e$  zum Zeitpunkt  $t_o + T$  gebildet. In dem hier betrachteten Fall wurde das Element so groß gewählt, daß bei allen Fahrzeugen die Störung innerhalb des betrachteten Weg-Zeit-Intervalls wieder abgeklungen ist, sich also ein zwischen allen Fahrzeugen gleichgroßer Endabstand eingestellt hat (der nicht mit dem Ausgangsabstand übereinzustimmen braucht). Die Störfunktion spielt hierbei also insofern eine Rolle, als durch sie die Größe dieses Endabstandes bestimmt wird.

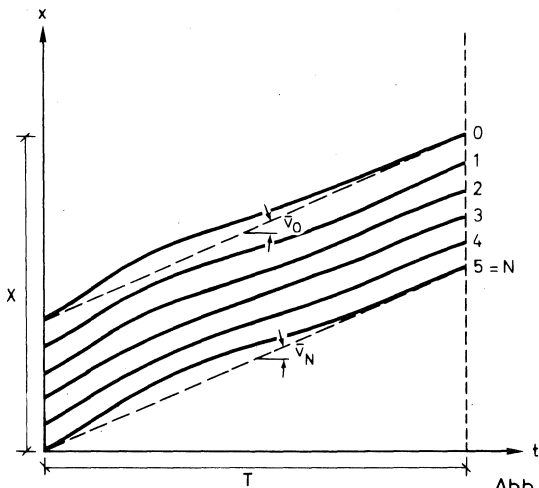


Abb. A6.6

Die gesuchten Größen  $q$ ,  $k$  und  $\bar{v}_m$  erhält man über die folgenden Gleichungen:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{v}_i}{X - \frac{T}{2} (\bar{v}_0 + \bar{v}_N)} \quad (\text{A6.6})$$

$$k = \frac{N}{X - \frac{T}{2} (\bar{v}_0 + \bar{v}_N)} \quad (\text{A6.7})$$

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{v}_i}{N} \quad (\text{A6.8})$$

(mit  $\bar{v}_i = \frac{\Delta x_i}{T}$ ).

Mit einer Störfunktion der Art

$$\dot{x}_1(t) = 10 - 5 \sin 0,4 t$$

und mit  $\Delta x_0 = 15$  [m],  $\tau = 0,35$  [sec] und  $\lambda_{1,m}$ -Werten, die in allen betrachteten Fällen auf der Grenzkurve zwischen Kolonnenstabilität und -instabilität liegen, ergeben sich über die Gln. (A6.6) bis (A6.8) die folgenden Werte in Abhängigkeit von den Exponenten  $l$  und  $m$ :



	q [Fhz/sec]	k [Fhz/m]	$\bar{v}_m$ [m/sec]
l = 0.5, m = 0.4	0.833	0.0623	13.36
l = 0.5, m = 0	0.810	0.0610	13.27
l = 0.5, m = -1	0.668	0.0530	12.60
l = 1, m = 0.5	0.821	0.0617	13.31
l = 1, m = 0	0.762	0.0583	13.08
l = 1, m = -1	0.610	0.0503	12.12
l = 2, m = 0,5	0.775	0.0590	13.12
l = 2, m = 0	0.656	0.0524	12.50

Man erkennt, daß der Verlauf von q in Abhängigkeit von l und m qualitativ jeweils mit den in den Abbn. A6.3 bis A6.5 aufgezeichneten Verläufen übereinstimmt.

Anhang 7

Algol-Programm zur Berechnung der Bewegung von Fahrzeugkolonnen

```

COMPILED BY NU ALGOL LEVEL 4.2/172073 04 03 JAN 74 AT 16:33:03
1 *BEGIN*
2 *INTEGER*N,Q,NA,MP,VO,X0,(A1);
3 *REAL*A,Z0;
4 ANFANG;
5 READ(N,C,A,VO,X0,NA,MP, FMT1);
6 *BEGIN*
7 *REAL**ARRAY*VP,X0,RP,EXP(1.0,0:(N/10+2));
8 *STRING*(19(10));
9 *BEGIN*
10 *INTEGER*Z;
11 *REAL**ARRAY*VV,XX,V,X,RR,(0:N);
12 *PROCEDURE*SPRICH (V,VV,X,XX,R,RR,N);
13 *INTEGER*N;
14 *REAL**ARRAY*V,VV,X,XX,R,RR;
15 *BEGIN*
16 *INTEGER*I;
17 *FOR*I:=(0,1,N)*DO*
18 *BEGIN*
19 VV(I):=V(I);
20 XX(I):=X(I);
21 RR(I):=R(I);
22 *END*
23 *END*SPRICH;
24 *PROCEDURE*FZ1(V,X,R,N);
25 *INTEGER*N;
26 *REAL**ARRAY*V,X,B;
27 *BEGIN*
28 *INTEGER*I,11;
29 V(0):=VO;
30 X(0):=X0+(0-1);
31 B(0):=0;
32 *FOR*I:=(1,1,(0-1)*2/A-1)*DO*
33 B(I):=0;
34 *FOR*I:=
35 ((0-1)*2/A,1,219)*DO*
36 B(I):=-1.5;
37 *FOR*I:=(220,1,239)*DO*
38 B(I):=-2.0;
39 *FOR*I:=(240,1,259)*DO*
40 B(I):=-2.5;
41 *FOR*I:=(260,1,299)*DO*
42 B(I):=-2.0;
43 *FOR*I:=(300,1,379)*DO*
44 B(I):=0;
45 *FOR*I:=(380,1,419)*DO*
46 B(I):=1.5;
47 *FOR*I:=(420,1,519)*DO*
48 B(I):=0;
49 *FOR*I:=(520,1,559)*DO*
50 B(I):=-1.5;
51 *FOR*I:=(560,1,59)*DO*
52 B(I):=0;
53 *FOR*I:=(1,1,91)*DO*
54 *BEGIN*
55 I1:=I-1;
56 V(I):=A*B(I1)+V(I1);
57 X(I):=0.5*A*A*B(I1)+A*V(I1)+X(I1);
58 *END*
59 WRITE(<<X4,'I',X10,'A',X10,'V',X12,'X',X12,'B',A1.I>>);
60 WRITE('-----');
61 *FOR*I:=(0,10,N)*DO*

```

```

62 *WRITE(<<I4,D13.1,D12.2,X2,D10.2,Y2,D10.2,A1>>,1,1)*A,V(1),X(1),B(1);
63 *FJOB*I:=(0,1,100)*D0;
64 *BEGIN;
65 V(1,1):=V(10*1);
66 X(1,1):=X(10*1);
67 B(1,1):=B(10*1);
68 *END;
69 *WRITE(<<F1>>);
70 *END*FZ1;
71 *PROCEDURE*EFF(VV,XX,RR,V,X,R,N,ZD);
72 *INTEGER*N;
73 *REAL*ZD;
74 *REAL*ARRAY*VV,XX,V,X,RR,R;
75 *BEGIN;
76 *INTEGER*I,K,LD,12,11,FALL,OKK; V(AM,KA,FALLA,HKA,BA,BR;
77 *REAL*ZF,ZFF,ZK; ZF2,BMIN,BMAX,BF,D,DL,ZFA,ZFA,L,M,BREMS,AB;
78 GR1,GR2,GR11,GR22,BM1,BMA;
79 *INTEGER*ARRAY*DD1(1:4,1:3),FA,RR(0:N);
80 *REAL*ARRAY*DX, DELTA,IA(0:N);
81 *REAL*ARRAY*KRIT(0:N),LL(1:4,1:3),DE(1:3),DD(1:4,1:3,0:1);
82 *PROCEDURE*GEN(ZF);
83 *REAL*ZF;
84 *BEGIN;
85 *INTEGER*IR,ZGEN;
86 *FOR*IB:=1,1,3*DO;
87 *BEGIN;
88 NB:=NB*3;
89 MAXB: *IF*NB*GREATER*19912309*THEN;
90 *BEGIN;
91 NB:=NB-19912309;
92 *GOTO*MAXB;
93 *END*END;
94 ZGEN:=LNTIER(NB/19912309)+5;
95 *FOR*IB:=1,2,3*DO;
96 *BEGIN;
97 NA:=NA*3;
98 MAXA: *IF*NA*GREATER*19912309*THEN;
99 *BEGIN;
100 NA:=NA-19912309;
101 *GOTO*MAXA;
102 *END*END;
103 ZF:=NA/19912309;
104 *END*GEN;
105 BA:=0; BR:=0;
106 K:=1;
107 VE:=0;
108 MU;
109 GEN(ZFA);
110 *IF*ZFA*LESS*0.2*THEN;
111 *BEGIN;
112 D:=(ZFA+0.286)/0.572;
113 DL:=(ZFA+0.356)/0.712;
114 *GOTO*H11; *END;
115 *IF*ZFA*LESS*0.57*THEN;
116 *BEGIN;
117 D:=(ZFA+1.33)/1.8;
118 DL:=(ZFA+0.356)/0.712;
119 *GOTO*H11; *END;
120 *IF*ZFA*LESS*0.65*THEN;
121 *BEGIN;
122 D:=(ZFA+1.33)/1.8;
123 DL:=(ZFA+0.99)/1.2;
124 *GOTO*H11; *END;

```

```

18 125 *IF*ZF*A*LESS*0.41*THEN*
126 *BEGIN*
127 D:=(ZFA-0.01)/0.543;
128 DL:=(ZFA+0.99)/1.2;
18 129 *GOTO*M11;*END*
130 *ELSE*
19 131 *BEGIN*
132 D:=(ZFA-0.01)/0.543;
19 133 DL:=(ZFA-0.335)/0.317;*FN*;;
134 M11;
135 DE(1):=D;
136 LL(K,1):=DL/D;
137 GEN(ZF5);
138 *IF*ZF*B*LESS*0.3*THEN*
20 139 *BEGIN*
140 D:=(ZFB+0.375)/0.75;
141 DL:=(ZFB+0.54)/0.09;
20 142 *GOTO*M12;*END*;;
143 *IF*ZFB*LESS*0.7*THEN*
21 144 *BEGIN*
145 D:=(ZFB+2.1)/2.67;
146 DL:=(ZFB+0.54)/0.09;
21 147 *GOTO*M12;*END*;;
148 *IF*ZFB*LESS*0.81*THEN*
22 149 *BEGIN*
150 D:=(ZFB-0.127)/0.545;
151 DL:=(ZFB+0.54)/0.09;
22 152 *GOTO*M12;*END*
153 *ELSE*
23 154 *BEGIN*
155 D:=(ZFB-0.127)/0.545;
23 156 DL:=(ZFB-0.625)/0.019;*FN*;;
157 M12;
158 DE(2):=D;
159 LL(K,2):=DL/D;
160 M1;
161 GEN(ZF);
24 162 *IF*ZF*LESS*0.5*THEN* *BEGIN*
163 D:=(ZF+0.3)/1.5;
164 DL:=(ZF+0.0715)/0.00286;
24 165 *GOTO*M10;*END*;;
166 *IF*ZF*LESS*0.75*THEN*
25 167 *BEGIN*
168 D:=(ZF+0.3)/1.5;
169 DL:=(ZF-0.25)/0.00125;
25 170 *GOTO*M10;*END*
171 *ELSE*
26 172 *BEGIN*
173 D:=(ZF-0.313)/0.625;
174 DL:=(ZF-0.25)/0.00125;
26 175 *END*;;
176 M10;
177 DE(3):=D;
178 LL(K,3):=DL/D;
179 *IF*DE(2)*GREATER*1.5*DE(1)*THEN* *GOTO*M0
180 *ELSE*
181 *IF*DE(2)*LESS*0.55*DE(1)*THEN* *GOTO*M0;
182 *IF*DE(3)*GREATER*0.45*DE(1)*AND*DE(3)*GREATER*
183 0.85*DE(2)*THEN* *GOTO*M1;
184 WRITE(<<E1>>);
185 WRITE(<< *DATEN DES NAECHSTEN FAHRZUGES* ,A1>>);
186 WRITE(<< *NA=*,D10.4,X5,*NB=*,D10.4,X5,
187 *ZF=*,D10.4,X5,*ZFA=*,D10.4,X5,*ZFB=*,D10.4,X5,A1>> *NA,NB

```

```

188 7F,7FA
189 ,ZFB);
190 WRITE(«K1»);
191 *FOR*FALL:=1,2,3*DO*
192 *BEGIN*
193 *FOR*K:=(1,1,4)*DO**BEGIN*
194 DD(K,FALL):=ENTER((DE(FALL)*100)*(1,1-0.1*K));
195 DKK:=(ENTER(DD(K,FALL)/10))*10;
196 *IF*DD1(K,FALL)*LESS* DKK+2.5*THEN*
197 *BEGIN*
198 DD(K,FALL,VF):=DKK/100;*GOTO*M4;*END*;
199 *IF*DD1(K,FALL)*LESS*DKK+7.5*THEN*
200 *BEGIN*
201 DD(K,FALL,VF):=(DKK+5)/100;*GOTO*M4;*END*;
202 *IF*DD1(K,FALL)*NOT*LESS*DKK+7.5*THEN*
203 *BEGIN*
204 DD(K,FALL,VF):=(DKK+10)/100;*END*;
205 M4:
206 *END*;
207 *END*;
208 *FOR*K:=2,3,4*DO**BEGIN*
209 DC(K,3,VE):=DD(1,3,VE);LL(K,3):=LL(1,3);*END*;
210 *FOR*K:=2,3,4*DO**BEGIN*
211 *FOR*FALL:=1,2*DO**BEGIN*
212 *IF*DD(K,FALL,VE)*LESS*DD(1,3,VE)*THEN*
213 DD(K,FALL,VF):=DD(1,3,VF);
214 *IF*DD(K,FALL,VE)*LESS*0.5*THEN*DD(K,FALL,VE):=0.5;
215 *END**END*;
E33
216 *FOR*FALL:=1,2 *DO**BEGIN*
217 *FOR*K:=(2,1,4)*DO**BEGIN*
218 LL(K,FALL):=((1-0.08*LL(1,FALL))/DD(1,FALL,0)*0.25*
219 DD(1,FALL,0))*(DD(K,FALL,0)
220 *DD(K,FALL,0)-2*DD(1,FALL,0)+DD(K,FALL,0)+
221 DD(1,FALL,0)*DD(1,FALL,0))+LL(1,FALL);
E35
222 V(0):=V0;
223 X(0):=(Q-Z)*XD;
224 B(0):=0;
225 BREMS:=7FA+0.5;
226 BMI:=-7.5-(3*ZF-1.5);
227 BMA:=4.5+(2*ZF-1);
228 *IF*BB(0)*LESS*-BREMS*THEN*
229 *BEGIN*
230 FALL:=3;
231 L:=2.5;
232 M:=0.2;
233 *GOTO*M2;*END*;
234 *IF*VV(0)-V(0)*NOT*LESS*0*THEN*
235 *BEGIN*
236 FALL:=1;
237 L:=0.5;
238 M:=0.2;
239 *GOTO*M2;*END*;
240 *IF*VV(0)-V(0)*LESS*0*THEN*
241 *BEGIN*
242 FALL:=2;
243 L:=1.5;
244 M:=0.4;
245 *GOTO*M2;*END*;
246 M2:
247 K:=1;
248 FA(0):=FALL;
249 KA:=1; FALLA:=FALL;

```

```
251 DELTA(0) := DD(K, FALL, VE);
252 LA(0) := LL(K, FALL);
253 *IF *2 *EQUAL *2 *1 *1 *0
254 Z0 := DD(K, FALL, VE) * ELSE * Z0 := Z0 + DD(K, FALL, VE);
255 *FOR *1 := (1, 1, N) * DO
10 256 *BEGIN
257 I1 := 1 - I;
258 *IF *FALLA *EQUAL *3 *AND *BR(I1) *LESS * -BREMS
11 259 *THEN *BEGIN
260 AN := R;
11 261 *GOTO *M13; *END;
262 *IF *FALLA
263 *EQUAL *3 *AND *VV(I1) - V(I1) *NOTLESS * 0
12 264 *THEN *BEGIN
265 AN := 1;
12 266 *GOTO *M15; *END;
267 *IF *FALLA
268 *EQUAL *3 *AND *VV(I1) - V(I1) *LESS * 0
13 269 *THEN *BEGIN
270 AN := 2;
13 271 *GOTO *M14; *END;
272 *IF *FALLA
273 *EQUAL *2 *AND *BR(I1) *LESS * -BREMS
14 274 *THEN *BEGIN
275 AN := 0;
14 276 *GOTO *M13; *END;
277 *IF *FALLA
278 *EQUAL *2 *AND *VV(I1) - V(I1) *NOTLESS * 0
15 279 *THEN *BEGIN
280 AN := 3;
15 281 *GOTO *M15; *END;
282 *IF *FALLA
283 *EQUAL *2 *AND *VV(I1) - V(I1) *LESS * 0
16 284 *THEN *BEGIN
285 AN := 0;
16 286 *GOTO *M14; *END;
287 *IF *FALLA
288 *EQUAL *1 *AND *BR(I1) *LESS * -BREMS
17 289 *THEN *BEGIN
290 AN := 0;
17 291 *GOTO *M13; *END;
292 *IF *FALLA
293 *EQUAL *1 *AND *VV(I1) - V(I1) *NOTLESS * 0
18 294 *THEN *BEGIN
295 AN := 0;
18 296 *GOTO *M15; *END;
297 *IF *FALLA
298 *EQUAL *1 *AND *VV(I1) - V(I1) *LESS * 0
19 299 *THEN *BEGIN
300 AN := 4;
19 301 *GOTO *M14; *END;
302 M13: L := 2.5;
303 M := 0.2;
304 FALL := 3; VE := 0; *GOTO *M166;
305 M14:
306 L := 1.5;
307 M := 0.4;
308 FALL := 2; *GOTO *M17;
309 M15:
310 L := 0.5;
311 M := 0.2;
312 FALL := 1;
313 M17:
```

```
314 *IF*VE*EQUAL*1*THEN**GOTO*MM1*ELSE**GOTO*MM2;
315 MM2;
316 *IF*AN*GREATER*0
317 *THEN**GOTO*MM3*ELSE**GOTO*M166;
318 MM3;
319 *IF*DD(K,FALL,0)*GREATER*DD(K,FALLA,0)+0.2*THEN**BEGIN*
320 DD(K,FALL,1):=DD(K,FALLA,0);
321 VE:=1;
322 *GOTO*MM1;
323 *END**ELSE**GOTO*M166;
324 MM1;
325 *IF*
326 *IF*DD(K,FALLA,1)
327 *+0.01*NOTLESS*DD(K,FALL,0)*THEN**BEGIN*
328 VE:=0;
329 *GOTO*M166;
330 *END**ELSE*
331 DD(K,FALL,1):=DD(K,FALLA,1)+0.05;
332 *END**ELSE**BEGIN*
333 VE:=0;
334 *GOTO*M166;
335 *END*;
336 M166;
337 *IF*FALL*EQUAL*1*OR*FALL*EQUAL*2*THEN**BEGIN*
338 *IF*DD(K,FALL,VE)*LESS*DD(1,3,0)*THEN*
339 DD(K,FALL,VE):=DD(1,3,0);*END*;
340 DELTA(I):=DD(K,FALL,VE);
341 FA(I):=FALL;
342 LA(I):=LL(K,FALL);
343 ID:=1-DD(K,FALL,VE)/A;
344 *IF*I*A*NOTGREATER*ZD*THEN*
345 *BEGIN*
346 V(I):=V(0);
347 X(I):=A*V(I1)+X(I1);
348 DX(I):=XX(I1)-X(I);
349 R(I):=0;
350 *END**ELSE*
351 *BEGIN*
352 V(I):=A*B(I1)+V(I1);
353 X(I):=0.5*A*A*B(I1)+A*V(I1)+X(I1);
354 DX(I):=XX(I1)-X(I);
355 *IF*V(I)*GREATER*45*THEN*
356 *BEGIN*
357 V(I):=44.99;
358 X(I):=A*V(I1)+X(I1);
359 DX(I):=XX(I1)-X(I);
360 *GOTO*M5;
361 *END*;
362 *IF*V(I)*NOTGREATER*0.0*THEN**BEGIN*
363 *IF*VV(ID)
364 *LESS*0.01*THEN**BEGIN*
365 V(I):=0;
366 X(I):=X(I1);
367 DX(I):=XX(I1)-X(I);*END**ELSE**BEGIN*
368 V(I):=1;
369 X(I):=0.5*A*A*B(I1)+A*V(I1)+X(I1);
370 DX(I):=XX(I1)-X(I);
371 *END*;
372 *END*;
373 *IF*DX(I)*LESS*6.5*AND*DX(I)*LESS*DX(I1)
374 *AND*V(I)*LESS*1.5*AND*VV(ID)*LESS*0.2*THEN**BEGIN*
375 V(I):=0;
376 X(I):=X(I1);
```

```

377 DX(I):=XX(I)-X(I);
378 *END*;
379 *IF*DX(I)*NOTGREATER*5
380 *THEN*
52 381 *BEGIN*
382 I2:=I;
383 *FOR*I:=(I2,I,N)*DO*
53 384 *BEGIN*
385 V(I):=0;
386 X(I):=X(I2);
387 DX(I):=XX(I)-X(I);
388 B(I):=0;
53 389 *END*;
390 *GOTO*MR;
52 391 *END*;
392 MS:
393 BE:=LL(K,FALL)*V(I)*POWER*(DX(ID)-5)*POWER*L;
394 B(I):=BE*(VV(ID)-V(ID));
395 *IF*V(I)*GREATER*44.98*THEN*
396 B(I):=0;
397 BMIN:=BMIN+0.0655*V(I);
398 BMAX:=BMAX-0.085*V(I);
399 *IF*B(I)*GREATER*BMAX*THEN*
400 B(I):=BMAX;
401 *IF*B(I)*LESS*BMIN*THEN*
402 B(I):=BMIN;
403 KRIT(I):=BE*DO(K,FALL,VF);
404 *IF*ENTI*EQUAL*1*THEN*GOTO*MK8*ELSE*GOTO*MK6;
405 MK6:
406 *IF*I*LESS*(Q-1)/A*THEN*GOTO*MK8*ELSE*GOTO*MK66;
407 MK66:
408 GR1:=V(I)*POWER*0.2/(DX(I)-5)*POWER*0.5;
409 *IF*GR1*NOTGREATER*0.311*THEN*
54 410 *BEGIN*
411 K:=1;
412 *IF*K*NOTEQUAL*KA*THEN*HKA:=1*ELSE*HKA:=0;
413 *GOTO*HK7;
54 414 *END*ELSE*
55 415 *BEGIN*
416 GR2:=V(I)*POWER*0.4/(DX(I)-5)*POWER*1.5;
417 *IF*GR2*NOTGREATER*0.0296*THEN*
56 418 *BEGIN*
419 *IF*GR1*1.1*LESS*GR1
57 420 *THEN*BEGIN*K:=2;
421 *IF*K*NOTEQUAL*KA*THEN*HKA:=1*ELSE*HKA:=0;
57 422 *GOTO*HK7*END*
58 423 *ELSE*BEGIN*K:=3;
424 *IF*K*NOTEQUAL*KA*THEN*HKA:=1*ELSE*HKA:=0;
58 E66 425 *GOTO*MV0*END*END*
59 426 *ELSE*BEGIN*K:=4;
427 *IF*K*NOTEQUAL*KA*THEN*HKA:=1*ELSE*HKA:=0;
428 *IF*J1*GR2*LESS*GR22*THEN*GOTO*MV0
429 *ELSE*GOTO*MV1;
59 E65 *END*END*;
431 MVO:
432 *IF*VV(ID)-V(ID)*NOTLESS*
433 0.*AND*FALL*NOTEQUAL*3*THEN*
70 434 *GOTO*HK7*ELSE*BEGIN*
435 *IF*VV(ID)-V(ID)*GREATER*0.*AND*FALL*EQUAL*3*THEN*
71 436 *BEGIN*
437 *IF*B(I)*LESS*BB(I)*THEN*GOTO*MK7*ELSE*
72 438 *BEGIN*
72 E71 ZK:=K/4;*GOTO*MV2*END*END*

```



```

440 *ELSE**BEGIN*
441 *IF*FALL*EQUAL*3*THEN**BEGIN*
442 *IF*B(I)*EQUAL*BB(I)*THEN**BEGIN*
443 B(I):=B(I)-K/R*(0.5*ZFR+0.75);
444 *GOTO*MK7;*END*
445 *ELSE**BEGIN*
446 ZK:=K/2;*GOTO*MV2;*END*
447 *END*
448 *ELSE**BEGIN*
449 ZK:=K/4;*GOTO*MV2;*END*;
E70 *END**END*;
451 MV1:
452 *IF*V(ID)*NOT*LESS*15*AND*V(ID)-V(ID)*LESS*0*AND*DX(ID)
453 *NOT*GREATER*20
454 *AND*BB(I)*NOT*GREATER*0*AND*B(I)*NOT*LESS*-.5*THEN**BEGIN*
455 B(I):=BMIN;*GOTO*MK7;*END*
456 *ELSE**BEGIN*
457 *IF*FALL*EQUAL*3*THEN**BEGIN*
458 *IF*B(I)*LESS*BB(I)*THEN**BEGIN*
459 B(I):=B(I)-K/4*(0.5*ZFR+0.75);
460 *GOTO*MK7;*END*
461 *ELSE**BEGIN*
2 ZK:=1.00*K;*GOTO*MV2;*END**END*
3 463 *ELSE**BEGIN*
3 E79 ZK:=K/2;*GOTO*MV2;*END**END*;
465 MV2:
4 466 *IF*B(I)*NOT*GREATER*0.25*THEN**BEGIN*
467 B(I):=B(I)-ZK/2*(0.5*ZFR+0.75);
4 468 *GOTO*MK7;*END*
469 *ELSE**BEGIN*
5 470 B(I):=B(I)*(10-ZK)/10;*GOTO*MK7;*END* ;
471 MK7:
472 *IF*B(I)*LESS*BMIN*THEN*B(I):=BMIN;
473 MK7:
474 *IF*BR*EQUAL*1*THEN**GOTO*MK8;
475 *IF*BA*GREATER*0*THEN**GOTO*K1*ELSE**GOTO*K2;
476 K2:
6 477 *IF*I*GREATER*(Q-1)*2/A+100*THEN**BEGIN*
478 *IF*V(I)*NOT*GREATER*V(I-80)+0.25*AND*V(I)*NOT*LESS*V(I-80)-0.25
479 *AND*V(I)*GREATER*5*AND*
480 B(I)*LESS*0.031*AND*B(I)*GREATER*
481 -0.031*AND*B(I-80)*LESS*0.031*AND*
482 B(I-80)*GREATER*-.031;
7 483 *THEN**BEGIN*
484 *IF*K*EQUAL*2*OR*K*EQUAL*3*THEN*
485 BA:=1;
7 E86 *IF*K*EQUAL*4*THEN*BA:=2;*END**END*;
487 K1:
488 *IF*BA*GREATER*0*THEN*B(I):=-BA*(ZFA*0.4+0.8)*ELSE**GOTO*MK8;
8 489 *IF*K*EQUAL*1*THEN**BEGIN*
490 B(I):=0;
8 491 BA:=0;BR:=1;*GOTO*MK8;*END*;
6 492 *END*;
493 MK8:
9 494 *IF*PNT1*EQUAL*1*THEN*BER(I):=0*ELSE**BEGIN*
495 *IF*(Q-1)/A*GREATER*20/A*THEN*ZFF:=(Q-1)/A*ELSE*ZFF:=20/A;
0 E90 496 *IF*I*NOT*GREATER*ZFF*THEN*BER(I):=0*ELSE*
*BEGIN**IF*K*EQUAL*3*THEN*BER(I):=2*ELSE*BER(I):=K;*END*;
498 GR11:=GR11GR22:=GR2;
9 499 *END*;
0 500 FALLA:=FALL; KA:=K;
501 *END*;
502 M8:

```

```

503 WRITE(<<'HREMS='',D10.4,X6,      ''V(0)='',D10.4,X5,
504 ''X(0)='',D10.4,X5,A1.1>>,HREMS,      V(0),X(0))!
505 WRITE(<<'X',I'',X6, ''I=A'',X6, ''V'',X9, ''X'',X9,
506 ''B'',X9, ''D'X'',X9,
507 ''DV'',X6, ''KRIT'',X6, ''DELTA'',X6, ''LAMDA'',X3, ''FALL
508 '',X2, ''BERFICH''
509 ,A1.1>>);
510 WRITE('-----');
511 -----);
512 *FOR*I:=(0,10,N)'DO'
513 *BEGIN'
514 WRITE(<<'I6,DB.1,8D10.2,2I6,A1>>,I,I*A,V(I),X(I),B(I),
515 XX(J)-X(I),VV(I)-V(I),KRIT(I),DELTA(I),LA(I),FA(I),BER(I));
516 DXP(Z,I/10):=DX(I);
517 BP(Z,I/10):=B(I);
518 XP(Z,I/10):=X(I);
519 VP(Z,I/10):=V(I);
520 *END';
521 *END*FF;
522 WRITE(<<'E1>>);
523 WRITE(<<'VD(M/SEC)''X5, ''N''X7, ''A(SEC)''X4, ''X0(M)''
524 X5, ''Q(FHZ)''
525 A1>>);
526 WRITE(<<'15,I10,D12.2,I8,I10,      A1.1>>,VD,N,A,X0,Q);
527 FZ1(V,X,B,N);
528 SPEICH(V,VV,X,XX,B,BB,N);
529 *FOR*Z:=(2,1,Q)'DO'
530 *BEGIN'
531 FF(VV,XX,BB,V,X,B,N,ZD);
532 SPEICH(V,VV,X,XX,B,BB,N);
533 *END';
534 *BEGIN'
535 *INTEGER*I;
536 *REALI''ARRAY'
537 VP2,VP3,VP4,VP5,VP6,XP2,XP3,XP4,XP5,XP6,BP2,BP3,BP4,BP5,BP6,
538 VP1,XP1,BP1,
539 DXP2,DXP3,DXP4,DXP5,DXP4(0;N/10*2);
540 *REALI''ARRAY'ZFIT(0;10);
541 *EXTERNAL''FORTRAN''PROCEDURE'PLOTS,PLOT,AXIS,FLINE;
542 *EXTERNAL''FORTRAN''PROCEDURE'LINE;
543 *FOR*I:=(0,1,100)'DO'
544 *BEGIN'
545 VP1(I):=VP(1,I);
546 XP1(I):=XP(1,I);
547 BP1(I):=BP(1,I);
548 VP2(I):=VP(2,I);
549 VP3(I):=VP(3,I);
550 VP4(I):=VP(4,I);
551 VP5(I):=VP(5,I);
552 VP6(I):=VP(6,I);
553 XP2(I):=XP(2,I);
554 XP3(I):=XP(3,I);
555 XP4(I):=XP(4,I);
556 XP5(I):=XP(5,I);
557 XP6(I):=XP(6,I);
558 BP2(I):=BP(2,I);
559 BP3(I):=BP(3,I);
560 BP4(I):=BP(4,I);
561 BP5(I):=BP(5,I);
562 BP6(I):=BP(6,I);
563 DXP2(I):=DXP(2,I);
564 DXP3(I):=DXP(3,I);
565 DXP4(I):=DXP(4,I);

```

```
56A DXP5(1):=DYP(5,1);
567 DXP6(1):=DYP(6,1);
568 *END*;
569 *FOR*I:=(0,1,100)*DO*
570 ZEIT(1):=1/2;
571 ZEIT(101):=0.0;
572 ZEIT(102):=2.0;
573 BP2(101):=BP3(101):=BP4(101):=BP5(101):=BP6(101):=0.0;
574 BP2(102):=BP3(102):=BP4(102):=BP5(102):=BP6(102):=1.0;
575 VP2(101):=VP3(101):=VP4(101):=VP5(101):=VP6(101):=0.0;
576 VP2(102):=VP3(102):=VP4(102):=VP5(102):=VP6(102):=2.0;
577 BP1(101):=VP1(101):=0.0;
578 BP1(102):=1.0;
579 VP1(102):=2.0;
580 XP1(101):=XP2(101):=XP3(101):=XP4(101):=XP5(101):=XP6(101):=0.0;
581 XP1(102):=XP2(102):=XP3(102):=XP4(102):=XP5(102):=XP6(102):=100.00;
582 DXP2(101):=DXP3(101):=DXP4(101):=DXP5(101):=DXP6(101):=0.0;
583 DXP2(102):=DXP3(102):=DXP4(102):=DXP5(102):=DXP6(102):=3.0;
584 PLOTS(13,30.0);
585 PLOT(2.0,2.0,-3);
586 AXIS(0.0,0.0,**          T (SEC)**,-17.25,0.0,0.0,0.2,0);
587 AXIS(0.0,0.0,**          X (M)** ,15,20.0,90.0,0.0,100.0);
588 FLINE(ZEIT,XP1,-101,1,0.0);
589 PLOT(0.0,0.0,3);
590 FLINE(ZEIT,XP2,-101,1,0.0);
591 PLOT(0.0,0.0,3);
592 FLINE(ZEIT,XP3,-101,1,0.0);
593 PLOT(0.0,0.0,3);
594 FLINE(ZEIT,XP4,-101,1,0.0);
595 PLOT(0.0,0.0,3);
596 FLINE(ZEIT,XPS,-101,1,0.0);
597 PLOT(0.0,0.0,3);
598 FLINE(ZEIT,XP6,-101,1,0.0);
599 PLOT(0.0,0.0,999);
600 PLOTS(13,30.0);
601 PLOT(2.0,2.0,-3);
602 AXIS(0.0,0.0,**          T (SEC)**,-17.25,0.0,0.0,0.2,0);
603 AXIS(0.0,0.0,**          V (M/SEC)** ,19,16.0,90.0,0.0,2.0);
604 FLINE(ZEIT,VP1,-101,1,0.0);
605 PLOT(0.0,0.0,3);
606 FLINE(ZEIT,VP2,-101,1,0.0);
607 PLOT(0.0,0.0,3);
608 FLINE(ZEIT,VP3,-101,1,0.0);
609 PLOT(0.0,0.0,3);
610 FLINE(ZEIT,VP4,-101,1,0.0);
611 PLOT(0.0,0.0,3);
612 FLINE(ZEIT,VPS,-101,1,0.0);
613 PLOT(0.0,0.0,3);
614 FLINE(ZEIT,VP6,-101,1,0.0);
615 PLOT(0.0,0.0,999);
616 PLOTS(13,30.0);
617 PLOT(2.0,2.0,-3);
618 AXIS(0.0,0.0,**          T (SEC)**,-17.25,0.0,0.0,0.2,0);
619 AXIS(0.0,0.0,**          DX (M)** ,16,20.0,90.0,0.0,3.0);
620 PLOT(0.0,DXP2(0),3);
621 FLINE(ZEIT,DXP2,-101,1,0.0);
622 PLOT(0.0,DXP3(0),3);
623 FLINE(ZEIT,DXP3,-101,1,0.0);
624 PLOT(0.0,DXP4(0),3);
625 FLINE(ZEIT,DXP4,-101,1,0.0);
626 PLOT(0.0,DXP5(0),3);
627 FLINE(ZEIT,DXP5,-101,1,0.0);
628 PLOT(0.0,DXP6(0),3);
```

```
629 FLINE(ZEIT,DXPA,-101.1,0.0);
630 PLOT(0.0,0.0,999);
631 PLOTS(13,30.0);
632 PLOT(3.0,12.0,-3);
633 AXIS(0.0,0.0,'T (SEC)','-17.25,0.0,0.0,2.0);
634 AXIS(0.0,-8.0,'R (M/SEC*SEC)','-21.16,0.90,0.0,-8.0,1.0);
635 FLINE(ZEIT,RP1,-101.1,0.0);
636 PLOT(0.0,0.0,3);
637 FLINE(ZEIT,RP2,-101.1,0.0);
638 PLOT(0.0,0.0,3);
639 FLINE(ZEIT,RP3,-101.1,0.0);
640 PLOT(0.0,0.0,3);
641 FLINE(ZEIT,RP4,-101.1,0.0);
642 PLOT(0.0,0.0,3);
643 FLINE(ZEIT,RP5,-101.1,0.0);
644 PLOT(0.0,0.0,3);
645 FLINE(ZEIT,RP6,-101.1,0.0);
646 PLOT(0.0,0.0,3);
647 PLOT(0.0,0.0,999);
73 648 *END*;
3 649 *END*;
2 650 *END*BLOCK2;
1 651 *GOTO*ANFANG;
652 *END*BLOCK1;
```

COMPILATION COMPLETE.

NO ERRORS WERE FOUND

V. Literaturverzeichnis

- (1) Reuschel, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug  
(Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Jahrgang 95, 1950, 73 - 77)
- (2) Pipes, L. A.: A proposed Dynamic Analogy of Traffic  
(Institute of Transportation and Traffic Engineering, Special Study, University of California, Los Angeles, 1950)
- (3) Chandler, E.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following  
Herman, R.  
Montroll, E. W. (Operations Research, Vol. 6, No. 2, 1958, 165 - 184)
- (4) Gazis, D. C.: Car Following Theory of Steady-State  
Herman, R. Traffic Flow  
Potts, R. B. (Operations Research, Vol. 7, No. 4, 1959, 499 - 505)
- (5) Gazis, D. C.: Nonlinear Follow-The-Leader-Models of  
Herman, R. Traffic Flow  
Rothery, R. W. (Operations Research, Vol. 9, No. 4, 1961, 545 - 567)
- (6) Bexelius, S.: An extended model for car-following  
(Vorläufiger Bericht Nr. 6, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1965)
- (7) Todosiev, E. P.: The Action-Point-Model of the Driver-Vehicle-System  
(Ohio State University, Engineering Experiment Station, Rept. No. 202 A-3, 1963)
- (8) Michaels, R. M.: Perceptual Factors in Car Following  
(Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Traffic Flow, London 1963, Paris: OECD 1965, 44 - 59)
- (9) Wiedemann, R.: Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen  
(Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 74, 1968)

- (10) Landgraf, Ch.: Elemente der Regelungstechnik  
Schneider, G. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,  
New York, 1970)
- (11) Drew, D. R.: Traffic Flow Theory and Control  
(Mc-Graw-Hill Book Company, New York, 1968)
- (12) Doetsch, G.: Anleitung zum praktischen Gebrauch der  
Laplace-Transformation und der Z-Transforma-  
tion  
(R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1967)
- (13) Schwarz, H.: Elektronische Analogrechner  
(Franck'sche Verlagsbuchhandlung, Stutt-  
gart, 1962)
- (14) Giloi, W.: Analogrechnen  
Lauber, R. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,  
Göttingen, 1963)
- (15) Taylor, W. J.: Traffic Flow Solution: Graphical Method  
(Australian Road Research, Vol. 4, No. 2,  
Melbourne, 1969, 77 - 81)
- (16) Herman, R.: Traffic Dynamics: Analysis of Stability in  
Montroll, R. W. Car Following  
Potts, R. B. (Operations Research, Vol. 7, No. 1, 1959,  
Rothery, R. W. 86 - 106)
- (17) Magnus, K.: Schwingungen  
(B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stutt-  
gart, 1961)
- (18) Treiterer, J.: Some Aspects of the Stability of Traffic  
Flow  
(Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses,  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik,  
Heft 86, 1969, 8 - 13)
- (19) Fox, Ph.: Safety in Car Following - A Computer  
Lehmann, F. G. Simulation  
(Newark College of Engineering, Newark, 1967)
- (20) Hoefs, D. H.: Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahr-  
zeugkolonnen  
(Straßenbau und Straßenverkehrstechnik,  
Heft 140, 1972)

- (21) Edie, L. C.: Car-Following and Steady-State Theory  
for Noncongested Traffic  
  
(Operations Research, Vol. 9, No. 1,  
1961, 66 - 76)
- (22) Leutzbach, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses  
  
(Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,  
New York, 1972)
- (23) May, A. D.: Non-Integer Car Following Models  
Keller, H. E. M.  
  
(Highway Research Record, Nr. 199,  
Washington, 1967, 19 - 32)
- (24) Edie, L. C.: Discussion of Traffic Stream Measurements  
and Definitions  
  
(Proceedings of the Second International  
Symposium on the Theory of Traffic Flow,  
London 1963, Paris: OECD 1965, 139 - 154)
- (25) Coers, H. G.: Die internationale Forschungsentwicklung  
und das räumlich-zeitliche Prinzip mikro-  
skopischer und makroskopischer Untersuchungen  
des Verkehrsflusses  
  
(Die Straße, Berlin, Nr. 7, 1970, 368 - 375)
- (26) Hoefs, D. H.: Mitteilung an den Verfasser  
(April 1972)
- (27) May, A. D.: Evaluation of Single- and Multi-Regime  
Keller, H. E. M. Traffic Flow Models  
  
(Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses,  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik,  
Heft 86, 1969, 37 - 48)
- (28) Leutzbach, W.: Zusammenhang zwischen Verkehrsunfällen und  
Brilon, W. Verkehrsbedingungen auf Bundesautobahnen  
  
(Forschungsauftrag des Bundesministers für  
Verkehr, Institut für Verkehrswesen, Univer-  
sität Karlsruhe, 1973)
- (29) Leutzbach, W.: Über den Zusammenhang zwischen Verkehrs-  
Siegener, W. unfällen und Verkehrsbelastung auf einem  
Wiedemann, R. deutschen Autobahnabschnitt  
  
(Accident Analysis and Prevention, Pergamon  
Press, Oxford, Vol. 2, No. 2, 1970, 93 - 102)

- (30) Montroll, E. W.: Acceleration noise and Clustering Tendency of Vehicular Traffic  
(Theory of Traffic Flow, Elsevier, New York, 147 - 157, 1961)
- (31) Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses  
(Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974)
- (32) Duckstein, L.: Variable Perception Time in Car Following and its Effect on Model Stability  
Unwin, E. A.  
Boyd, E. T.  
(IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol. MMS-11, No. 3, 149 - 156, 1970)
- (33) Hartwich, E.: Längsdynamik und Folgebewegung der Straßenfahrzeuge und ihr Einfluß auf das Verhalten der Fahrzeugschlange  
(Dissertation TH Darmstadt, 1971)
- (34) Kometani, E.: Dynamic Behaviour of Traffic with a Non-linear Spacing-Speed Relationship  
Sasaki, T.  
(Theory of Traffic Flow, Elsevier, New York, 105 - 119, 1961)
- (35) Leutzbach, W.: Probleme der Kolonnenfahrt  
Bexelius, S.  
(Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 44, 1966)
- (36) Leutzbach, W.: Stabilitätsuntersuchungen einiger deterministischer Fahrzeugfolgegleichungen  
Köhler, U.  
(Unveröffentlichter Forschungsbericht Le 157/5 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1972)
- (37) Newell, G. F.: Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following  
(Operations Research, Vol. 9, No. 2, 209 - 229, 1961)
- (38) Newell, G. F.: Theories of Instability in Dense Highway Traffic  
(Journal of the Opns. Res. Soc. of Japan, Tokio, Vol. 5, No. 1, 1962, 9 - 54)



- (39) Rockwell, K.: Sensing and Communication between Vehicles  
Treiterer, J.  
(National Cooperative Highway Research  
Program, Washington, Report No. 51, 1968)
- (40) Rule, R. G. On the Effects of State Information on  
Fenton, R. E. Driver Vehicle Performance in Car Following  
(IEEE Transactions on Systems, Man and  
Cybernetics, Vol. SMC-2, Vol. 5, 630 - 637,  
1972)
- (41) White, W.: Backward Waves in Highway Traffic Jams  
(Proceedings of the IRE, CATS Research News,  
Vol. 1, No. 8, 1957, 11 - 13)
- (42) Wallner, F.: Zum Einfluß konstruktiver Maßnahmen am Fahr-  
zeug auf das Folgeverhalten einzelner Fahr-  
zeuge und auf das dynamische Verhalten von  
Fahrzeugkolonnen  
(Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum-Verlag,  
Bonn-Bad Godesberg, Heft 6, 1969, 177 - 184)

Verlage und Verlagsorte häufig erwähnter Zeitschriften:

Operations Research: Waverly Press, Baltimore

Straßenbau und Straßenverkehrstechnik: Kirschbaum-Verlag, Bonn-Bad Godesberg

## 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 Signalzeitplänen; 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

### 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

### Vorläufige Berichte des Instituts

- Nr. 1: Leutzbach, W., Koehler, R.: Binnenwasserstraßenverkehr als Zufallsverteilung; 1964
- Nr. 2: Eick, P.: Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALD; 1964
- Nr. 3: Bexelius, S.: Größen der Verkehrstheorie - ihre Definition und Anwendung; 1965
- Nr. 4: Leutzbach, W., Ernst, R.: Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierung auf das Verhalten der Fahrzeuglenker; 1965
- Nr. 5: Gullón Löw, M.: Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes; 1965
- Nr. 6: Bexelius, S.: An extended Model for Car Following; 1965
- Nr. 7: Bexelius, S.: Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschiedene Arten von Engpässen; 1965
- Nr. 8: Leutzbach, W., Lenz, K.-H.: Wartezeitverluste an Schleusen; 1966
- Nr. 9: Martin, W.: Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stuttgart; 1967
- Nr. 10: Droste, M.: Parkraumerhebungen in Intervallen; 1968
- Nr. 11: Leutzbach, W.: Bewegung als Funktion von Zeit und Weg; 1968 (reprinted in Transportation Research, Vol. 3 (1969) 421-428)
- Nr. 12: Droste, M.: Die Berechnung optimaler Signalzeitenpläne als Problem der ganzzahligen linearen Programmierung; 1969
- Nr. 13: Ludes, K., Siegener, W.: Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes Fahrverhalten; 1969
- Nr. 14: Haight, F.A.: Problems in Transport Safety; 1970
- Nr. 15: Dilling, J.: Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik; 1970
- Nr. 16: Coblenz, 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

## 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: Möglichkeiten des Einsatzes eines Kabinen-Taxi-Systems (CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe; Seminarbericht SS 1971
- Nr. 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau - ein Optimierungsbeispiel; Seminarbericht WS 1971/72