

Eine analytische Berechnungsmethode für Geschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte

VON DIRK HEIDEMANN, BERGISCH GLADBACH

1. Einleitung

Als Fundamentaldiagramm eines Straßenabschnittes bezeichnet man bekanntlich den Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke, q , und Verkehrsdichte, k . Aufgrund der Gleichung $q = \bar{v}_m \cdot k$, wobei \bar{v}_m die mittlere momentane Geschwindigkeit auf der betrachteten Strecke ist, genügt die Kenntnis der \bar{v}_m - k -Beziehung zur Konstruktion des Fundamentaldiagrammes.

Im konkreten Anwendungsfall werden Fundamentaldiagramme in aller Regel durch Messungen an einem Straßenquerschnitt und Anpassung einer Ausgleichsfunktion an die Datenpunkte ermittelt. Von entscheidendem Einfluß ist dabei die Wahl des Bezugsintervalles, d. h. des Zeitintervalles, das den einzelnen Datenpunkten zugrunde gelegt wird. Zu kleine Bezugsintervalle führen zu großen statistischen Streuungen, wohingegen zu große Bezugsintervalle wegen des verstärkten Auftretens von Instationaritäten des Verkehrsablaufs innerhalb der einzelnen Intervalle in Verbindung mit der nicht-linearen Gestalt des Fundamentaldiagrammes unkontrollierbare Verschiebungen der Datenpunkte verursachen.

Außer durch Messungen kann die prinzipielle Gestalt von Fundamentaldiagrammen auch durch analytische Berechnungen ermittelt werden. Die gängigen Methoden, wie z. B. Integration der Fahrzeugfolgegleichung¹⁾, erweisen sich jedoch häufig als nicht geeignet für eine hinreichend genaue Beschreibung des komplexen Phänomens Verkehrsablauf.

Im folgenden wird vor diesem Hintergrund eine neue Methode zur Ermittlung von Fundamentaldiagrammen entwickelt. Sie leistet aber darüber hinaus wesentlich mehr, da sich nicht nur die q - k - oder \bar{v}_m - k -Beziehung ergibt, sondern die gesamte Verteilung der momentanen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Dichte. Dabei spielen die bei Messungen auftretenden Probleme keine Rolle mehr.

Vorausgesetzt wird im wesentlichen die Kenntnis

- der Verteilung momentaner Wunschgeschwindigkeiten (die ggf. leicht aus der Verteilung lokaler Wunschgeschwindigkeiten bestimmt werden kann),

Anschrift des Verfassers:

Dr. rer. nat. Dirk Heidemann
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53
5060 Bergisch Gladbach 1

1) Vgl. Leutzbach, W., Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, Berlin-Heidelberg-New York 1972.

- einer Funktion zur Beschreibung des Überholverhaltens sowie
- der Staudichte.

Dieses sind Parameter für ein System von Übergangswahrscheinlichkeiten, durch das die Veränderung der momentanen Geschwindigkeitsverteilung, die auf ein differentielles Anwachsen der Verkehrsdichte von k auf $k + dk$ zurückzuführen ist, modelliert wird. Der Modellansatz ergibt ein System von Differentialgleichungen, dessen Lösung ein implizites Gleichungssystem zur Bestimmung der momentanen Geschwindigkeitsverteilung bei beliebiger Dichte ist. Dieses Gleichungssystem ist mit Hilfe eines Computerprogrammes numerisch lösbar.

2. Theoretisches Modell

Wir betrachten grundsätzlich momentane Geschwindigkeiten und teilen das mögliche Geschwindigkeitsspektrum in n Klassen. Wenn wir die Teilpunkte mit v_0, v_1, \dots, v_n bezeichnen und $v_0 = 0, v_n = \infty$ setzen, so sei die i -te Klasse diejenige, die von v_{i-1} (einschließlich) bis v_i (ausschließlich) reicht.

Im folgenden bedeutet die Ausdrucksweise „ein Fahrzeug befindet sich im Zustand (k, i) “, daß es bei Dichte k in der Geschwindigkeitsklasse i fährt.

Sei nun $P_k(i)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß bei der Verkehrsdichte k die Geschwindigkeitsklasse i beobachtet wird. Wir werden ein System von Übergangswahrscheinlichkeiten $P_k, k + \Delta k(i, j)$ entwickeln; dabei ist $P_k, k + \Delta k(i, j)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, i) bei Zunahme der Dichte um den (kleinen) Betrag Δk in die Geschwindigkeitsklasse j gerät.

Für $P_k, k + \Delta k(i, j)$ machen wir folgenden Ansatz:

$$(1) \quad P_k, k + \Delta k(i, j) := \begin{cases} 0, & \text{falls } i < j \\ P_k(j) \cdot [h(k + \Delta k, i) - h(k, i)], & \text{falls } i > j \\ 1 - \sum_{i > 1} P_k(i) \cdot [h(k + \Delta k, i) - h(k, i)], & \text{falls } i = j. \end{cases}$$

(Der Fall „ $i = j$ “ ergibt sich aus der Forderung

$$\sum_1 P_k, k + \Delta k(i, i) = 1.)$$

Die in (1) vorkommende Funktion $h(k, i)$ wird folgendermaßen definiert:

$$(2) \quad h(k, i) := \frac{[1 - E_1(\exp(-vt_a k^*))]}{1 - [1 - E_1(\exp(-vt_p k^*))]} \cdot [P_k(i) \cdot (1 - g(k, i)) + g(k, i)]$$

Dabei ist:

k^* : $k / (1 - k/k_{St})$, wobei k_{St} die Staudichte für die betrachtete Richtungsfahrbahn

bezeichnet; k^* ist somit der Reziprokwert des mittleren Netto-Wegabstandes bei Dichte k ;

$\tau_a = \tau_a(k, i)$ ein Netto-Zeitabstand, unterhalb dessen sich ein Fahrzeug im Zustand (k, i) an die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs anpaßt, sofern dieses in einer Geschwindigkeitsklasse $j < i$ fährt und keine Überholung stattfindet;

$\tau_p = \tau_p(k, i)$ ein Netto-Zeitabstand, unterhalb dessen ein Fahrzeug im Zustand (k, i) als Folgefahrzeug im Pulk fährt; das vorausfahrende Fahrzeug befindet sich dann in der gleichen Geschwindigkeitsklasse i ;

$g(k, i)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, i) trotz Überholwunsch nicht überholt;

E_i der bedingte Erwartungswert unter der Hypothese, daß die Geschwindigkeit v in der i -ten Klasse ist.

Zur Erläuterung von (1) und (2) sei nun zunächst bemerkt, daß $1 - E_i(\exp(-v\tau_a k^*))$ die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, i) einen Netto-Zeitabstand kleiner als τ_a zum vorausfahrenden Fahrzeug hat (dabei wird eine Exponentialverteilung der Netto-Wegabstände vorausgesetzt).

Schreibt man für den Nenner in (2) abkürzend $1-p(k, i)$, so läßt sich zeigen, daß $p(k, i)$ die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, i) als Folgefahrzeug im Pulk fährt (s. u.). Der Ausdruck

$$(1-p(k, i))^{-1} = \sum_{m \geq 1} m \cdot p(k, i)^{m-1} \cdot (1-p(k, i))$$

stellt dann gerade die mittlere Pulklänge (einschließlich Pulkführer) von Fahrzeugen im Zustand (k, i) als Erwartungswert einer geometrischen Verteilung dar.

Aufgrund der gegebenen Definitionen und Erläuterungen erhält man nun mit

$$P_k(j) \cdot h(k, i) = P_k(j) \cdot [1 - E_i(\exp(-v\tau_a k^*))] \cdot g(k, i) \cdot (1-p(k, i))^{-1}$$

(für $i > j$)

die Wahrscheinlichkeit, bei Dichte k von der Geschwindigkeitsklasse i in die Geschwindigkeitsklasse j überzugehen. Diese Übergänge finden aber bereits im Gleichgewichtszustand des Verkehrsflusses, d. h. bei konstanter Dichte, statt. Eine Zunahme der Dichte um den (kleinen) Betrag Δk führt zu einer zusätzlichen, also das Gleichgewicht störenden, Wahrscheinlichkeit

$$P_k(j) \cdot [h(k + \Delta k, i) - h(k, i)] \quad (\text{für } i > j);$$

dies ist gerade die in (1) vorkommende Übergangswahrscheinlichkeit $P_{k, k+\Delta k}(i, j)$.

Nach der Modellvorstellung wird also der Gleichgewichtszustand des Verkehrsflusses bei konstanter Dichte infolge einer (geringen) Zunahme der Dichte gestört; die modellierten Störfaktoren sind die sich in Abhängigkeit von der Dichte ändernden Verteilungen der Netto-Wegabstände, Längen von Pulks in den einzelnen Geschwindigkeitsklassen sowie Überholmöglichkeiten.

Um die Begründung für (1) und (2) abzuschließen, ist noch zu zeigen, daß

$$p(k, i) = [1 - E_i(\exp(-v\tau_p k^*))] \cdot [P_k(i)(1 - g(k, i)) + g(k, i)]$$

die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, i) als Folgefahrzeug im Pulk fährt. Da $1 - E_i(\exp(-v\tau_p k^*))$ die Wahrscheinlichkeit für einen Netto-Zeitabstand kleiner als τ_p darstellt, bleibt wegen der Definition von τ_p nur noch zu begründen, daß $P_k(i)(1 - g(k, i)) + g(k, i)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß das betrachtete Fahrzeug sich im Zustand (k, i) befindet, und zwar unter der Hypothese, daß sein Abstand $\leq \tau_p$ ist. Dies sieht man so: wenn dieses Fahrzeug im Bedarfsfall überholen kann – was mit der Wahrscheinlichkeit $1 - g(k, i)$ der Fall ist – befindet es sich mit der (globalen) Wahrscheinlichkeit $P_k(i)$ in der Geschwindigkeitsklasse i ; andernfalls wird es durch das vorausfahrende Fahrzeug behindert und fährt daher wie dieses in der Geschwindigkeitsklasse i .

Läßt man nun Δk differentiell klein werden und drückt dies – wie üblich – durch die Bezeichnung dk aus, so lauten die Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$P_{k, k+dk}(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{falls } i < j \\ P_k(j) \cdot h'(k, i) \cdot dk, & \text{falls } i > j \\ 1 - \sum_{i>1} P_k(i) \cdot h'(k, i) \cdot dk, & \text{falls } i=j. \end{cases}$$

(Ableitungen nach k werden durch „'“ bezeichnet.)

Wie im Fall allgemeiner Markoff'scher stochastischer Prozesse gilt nun:

$$(3) \quad P_{k+dk}(j) = \sum_{i \geq j} P_k(i) \cdot P_{k, k+dk}(i, j).$$

Dies ist ein Differentialgleichungssystem, das nun nach $P_k(i)$ aufgelöst werden soll.

3. Lösung des Differentialgleichungssystems

Aus (3) ergibt sich im Fall $j = n$:

$$\begin{aligned} P_{k+dk}(n) &= P_k(n) \cdot P_{k, k+dk}(n, n) \\ &= P_k(n) \cdot (1 - \sum_{n>1} P_k(i) \cdot h'(k, n) \cdot dk). \end{aligned}$$

Hieraus folgt:

$$\begin{aligned} P_k'(n) &= \frac{P_{k+dk}(n) - P_k(n)}{dk} = -P_k(n) \sum_{n>1} P_k(i) \cdot h'(k, n) \\ &= -P_k(n) (1 - P_k(n)) h'(k, n). \end{aligned}$$

Dies ist eine Bernoulli'sche Differentialgleichung mit der Lösung:

$$(4) \quad P_k(n) = \frac{1}{\left(\frac{1}{P_0(n)} - 1\right) \cdot \exp(h(k, n)) + 1}$$

Dabei ist $P_0(n)$ die Wahrscheinlichkeit der n -ten Klasse der momentanen Geschwindigkeitsverteilung P_0 bei $k \approx \infty$, d. h. bei „freiem“ Verkehrsfluß. P_0 kann auch als Verteilung der momentanen Wunschgeschwindigkeiten betrachtet werden.

Da $P_k(n)$ in $h(k, n)$ vorkommt, ist (4) eine implizite Gleichung zur Bestimmung von $P_k(n)$. Sie kann aber bei vorgegebener Dichte k und bekannter „Anfangsverteilung“ $P_0(n)$ mit numerischen Methoden leicht nach $P_k(n)$ aufgelöst werden.

Im Fall $j < n$ erhält man $P_k(j)$ völlig analog dadurch, daß man bedingte Wahrscheinlichkeiten betrachtet, d. h. man ersetzt in Gleichung (4) n durch j ,

$$P_k(n) \text{ durch } \frac{P_k(j)}{1 - \sum_{i>j} P_k(i)}, \text{ und}$$

$$P_0(n) \text{ durch } \frac{P_0(j)}{1 - \sum_{i>j} P_0(i)}.$$

(Zu beachten ist, daß diese Ersetzungen auch in $h(k, n)$ vorzunehmen sind.)

Man erhält auf diese Weise schließlich für eine beliebig vorgegebene Dichte k und für jede Geschwindigkeitsklasse j von 1 bis n :

$$(5) \quad \frac{P_k(j)}{1 - \sum_{i>j} P_k(i)} = \frac{1}{\left(\frac{1 - \sum_{i>j} P_0(i)}{P_0(j)} - 1\right) \cdot \exp(\tilde{h}(k, j)) + 1}$$

mit

$$(6) \quad \tilde{h}(k, j) = \frac{[1 - E_j(\exp(-vt_a k^*))] \cdot g(k, j)}{1 - [1 - E_j(\exp(-vt_p k^*))] \cdot \left[\frac{P_k(j)}{1 - \sum_{i>j} P_k(i)} \cdot (1 - g(k, j)) + g(k, j) \right]}$$

(Es sei daran erinnert, daß t_a und t_p von k und j abhängen dürfen. Ferner ist $\sum_{i>n} P_k(i)$ als Summe über die leere Indexmenge definitionsgemäß gleich Null zu setzen.)

Dieses Gleichungssystem läßt sich sukzessiv, von „ $j = n$ “ aus startend, bis hin zu „ $j = 1$ “ nach $P_k(j)$ lösen.

$P_k(j)$ wird durch die jeweilige Gleichung implizit und eindeutig bestimmt. Die numerische Berechnung ist mit Hilfe eines Computerprogramms zur Nullstellenberechnung von Funktionen leicht durchzuführen.

Bei nicht zu großer Breite der Geschwindigkeitsklassen kann z. B. $E_j(\exp(-vt_a k^*))$ geschätzt werden durch

$\exp(-v(j)t_a k^*)$, wenn $v(j)$ den Mittelwert der Geschwindigkeit in der j -ten Klasse bezeichnet.

Schließlich darf die Breite der Geschwindigkeitsklassen auch nicht zu klein gewählt werden, da sonst der Streubereich der Geschwindigkeiten für Folgefahrzeuge im Pulk zu eng wird. Unter diesen Gesichtspunkten erscheint eine Breite der Geschwindigkeitsklassen von 5 km/h geeignet.

4. Anwendungsbeispiele

Die Gleichungen (5) und (6), die das entwickelte Modell darstellen, wurden zur Berechnung der momentanen Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte und damit auch zur Berechnung von Fundamentaldiagrammen sowohl für zweistreifige als auch für dreistreifige Richtungsfahrbahnen angewendet. Die Ergebnisse sind in den Bildern 1 bis 4 dargestellt. Die Bilder 1 und 3 enthalten als Kennwerte der momentanen Geschwindigkeitsverteilungen bei einem Lkw-Anteil von 0 % die Mittelwerte sowie die 85- und 15-Perzentile, während die Bilder 2 und 4 die Fundamentaldiagramme bei lokalen Lkw-Anteilen von 0, 10 und 20 % beinhalten.

Alle Berechnungen wurden mit den folgenden Parametern durchgeführt:

- einer Normalverteilung mit Mittelwert 130 km/h und Variationskoeffizient 0,2 für die lokalen Wunschgeschwindigkeiten der Pkw,
- einer im Intervall zwischen 85 und 90 km/h konzentrierten Verteilung für die lokalen Wunschgeschwindigkeiten der Lkw,
- $t_p = 2$ s,
- t_a = lineare Funktion der Geschwindigkeitsklasse, bestimmt durch $t_a = 2$ s für die niedrigste Klasse (von 0 bis 5 km/h) und $t_a = 8$ s für die höchste Klasse (über 200 km/h),
- $k_{St} = 100$ Fz/km für zwei- und 150 Fz/km für dreistreifige Richtungsfahrbahnen, jeweils bei 0 % Lkw-Anteil; bei positivem Lkw-Anteil wurde ein Lkw gleich zwei Pkw gesetzt, so daß eine entsprechende Abminderung von k_{St} resultierte,
- $g(k, i) = (k/k_{St})^{2/3}$.

Bei der Spezifizierung von t_a wurde berücksichtigt, daß der erforderliche Netto-Zeitabstand bei Annäherung an ein langsames Fahrzeug ohne Überholmöglichkeit mit der Geschwindigkeit des sich annähernden Fahrzeugs zunimmt; allerdings ist der Einfluß von t_a auf das Ergebnis nur gering.

Da uns für $g(k, i)$ aus der Literatur keine Ansätze bekannt sind, wurden zunächst die Randbedingungen, die diese Funktion erfüllen muß, festgestellt; dies sind:

$g(0, i) = 0$, $g(k_{St}, i) = 1$ und Isotonie (d. h. $g(k, i)$ ist monoton wachsend in k).

Der einfachste Ansatz wäre $g(k, i) = k/k_{St}$ gewesen; es zeigte sich aber, daß sich damit zu hohe Geschwindigkeiten ergaben. Daher wurde ein Exponent aufgenommen, der für

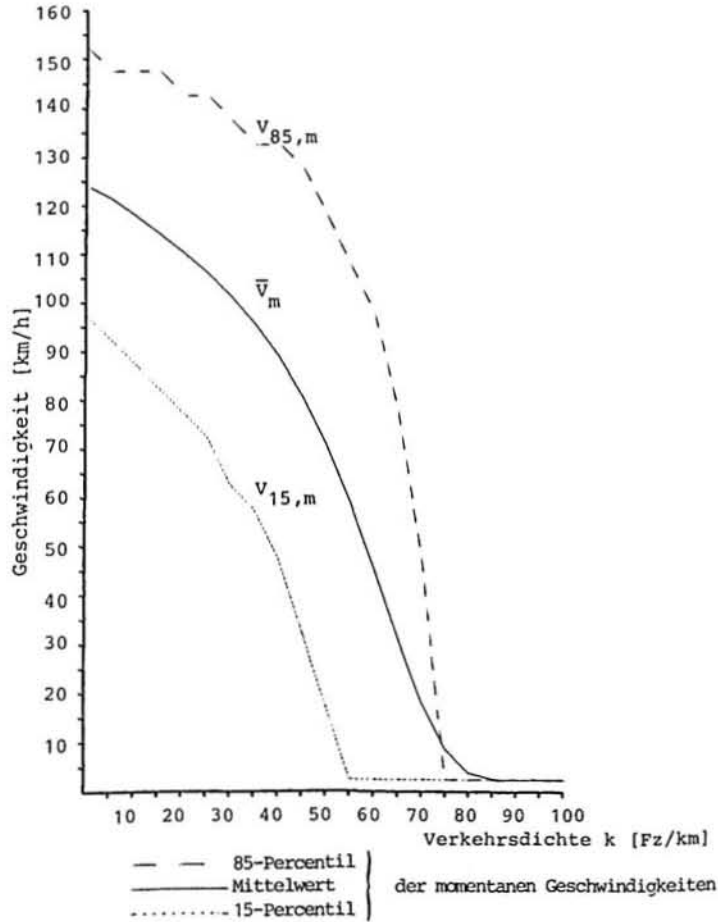


Bild 1: Kennwerte der berechneten momentanen Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte für zweistreifige Richtungsfahrbahnen (Lkw-Anteil 0 %).

den Wert $2/3$ in allen untersuchten Fällen zu Resultaten führte, die realistisch erschienen. Interessant ist in diesem Zusammenhang vielleicht die Beobachtung, daß die für $g(k, i)$ verwendete Funktion in ihrem qualitativen Verlauf für nicht zu hohe Dichten

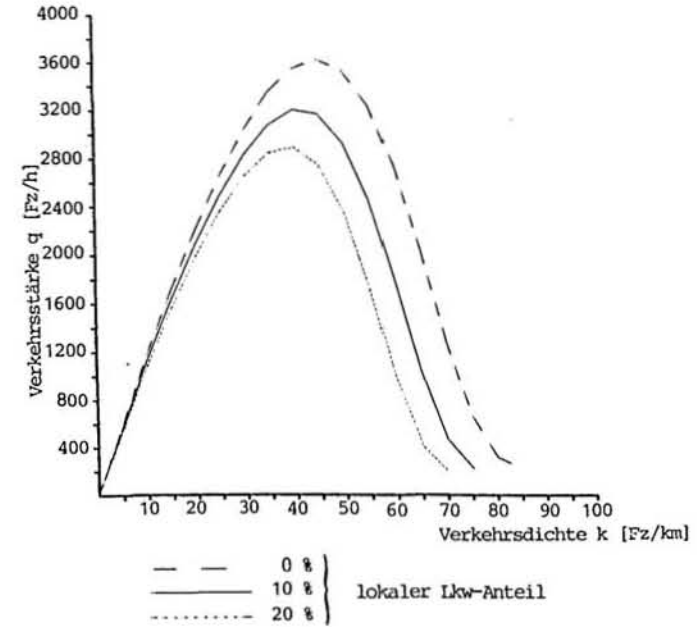


Bild 2: Berechnete Fundamentaldiagramme für zweistreifige Richtungsfahrbahnen

in etwa mit der relativen Belegung des Überholstreifens in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke übereinstimmt²⁾.

Bei der Betrachtung der Bilder 1 und 3 ist zu beachten, daß bei den dargestellten momentanen Geschwindigkeiten hohe Werte im Vergleich zu lokalen Geschwindigkeiten unter- und niedrige Werte überrepräsentiert sind. Die Umrechnungen von momentanen in lokale Geschwindigkeitsverteilungen (und umgekehrt) sind leicht durchzuführen³⁾.

In den Bildern 2 und 4 sind die je nach Lkw-Anteil auftretenden Verschiebungen im rechten Teil der Fundamentaldiagramme im wesentlichen auf die mit wachsendem Lkw-Anteil abnehmende Staudichte k_{St} zurückzuführen.

Vergleiche mit Meßergebnissen zeigen, daß die qualitativen und quantitativen Verläufe der errechneten Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte die realen Verhältnisse sehr gut wiedergeben. Allerdings kann durch die

2) Vgl. Hotop, R., Untersuchung der Verkehrsqualität auf zwei- und dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen, Bonn 1975.

3) Vgl. Leutzbach, W., Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, a.a.O.

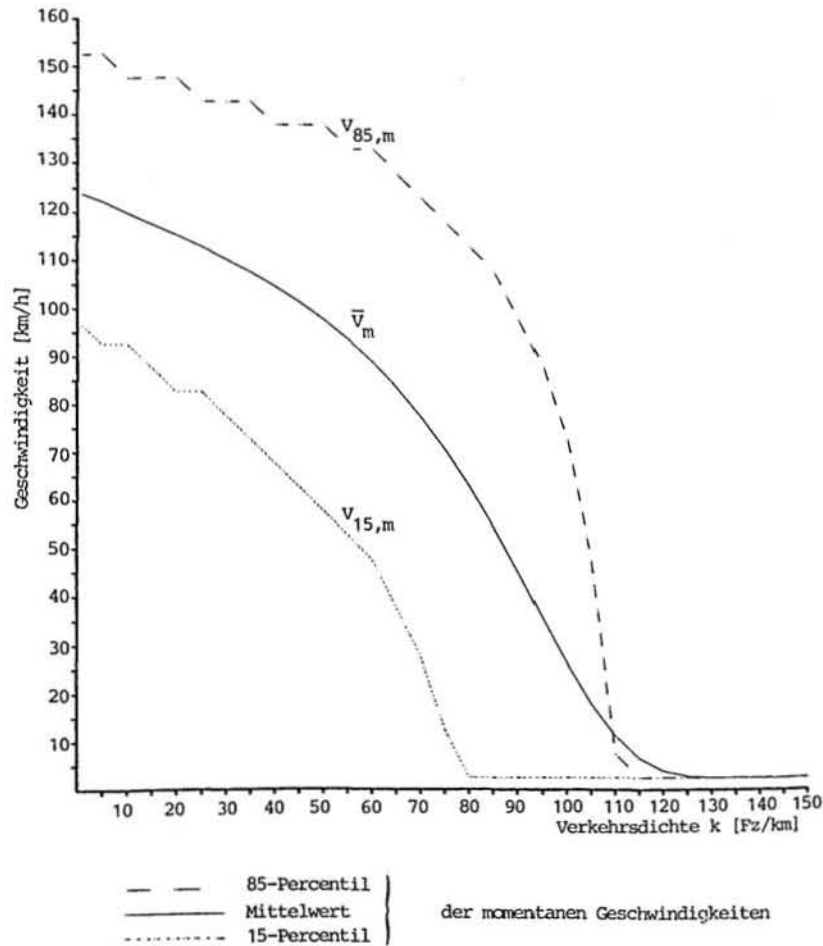


Bild 3: Kennwerte der berechneten momentanen Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte für dreistreifige Richtungsfahrbahnen (Lkw-Anteil 0 %).

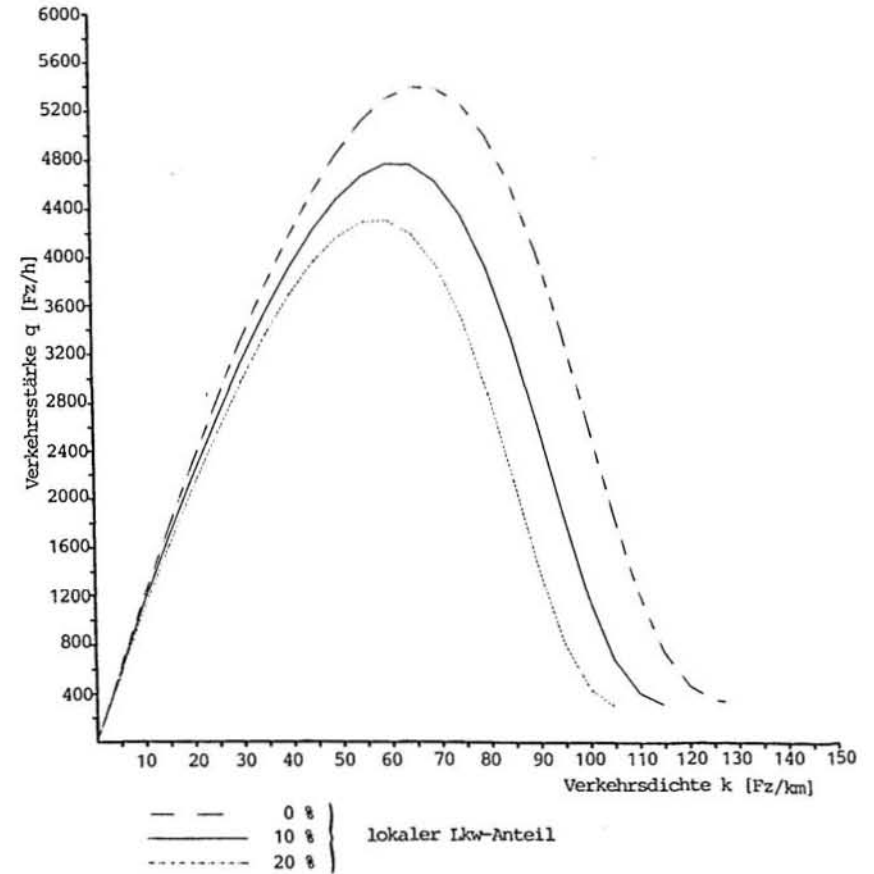


Bild 4: Berechnete Fundamentaldiagramme für dreistreifige Richtungsfahrbahnen

entwickelten Berechnungsverfahren das gesamte Dichtespektrum abgedeckt werden, wohingegen durch Messungen selten der Bereich jenseits der zur maximalen Verkehrsstärke gehörigen sogenannten „optimalen“ Dichte erreicht wird. Ferner werden Vergleiche mit Meßergebnissen durch die eingangs erwähnten Stationaritätsprobleme, die zwangsläufig mit Messungen verbunden sind, erschwert. Schließlich werden aus Messungen in aller Regel nur mittlere Geschwindigkeiten erhalten, nicht jedoch die gesamte Geschwindigkeitsverteilung, die sich aus dem Berechnungsverfahren ergibt.

5. Zusammenfassung und Schlußbemerkungen

Es wurde eine analytische Berechnungsmethode entwickelt, mit der die momentane Geschwindigkeitsverteilung bei beliebig vorgegebener Verkehrsdichte ermittelt werden kann; insbesondere kann die mittlere momentane Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke bei jeder Dichte – also das Fundamentaldiagramm – berechnet werden.

Als Eingangsparameter werden im wesentlichen benötigt

- die Geschwindigkeitsverteilung bei geringer Dichte, d. h. die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten,
- eine Funktion $g(k, i)$ zur Beschreibung des Überholverhaltens, und
- die Staudichte.

Die Anwendungen ergaben sehr gute quantitative und qualitative Übereinstimmungen mit Auswertungen auf der Basis von Messungen.

Weitere Vorteile der entwickelten Methode gegenüber den gängigen Verfahren sind:

- man erhält nicht nur mittlere Geschwindigkeiten, sondern die gesamte Geschwindigkeitsverteilung bei jeder Dichte;
- es gibt weder Probleme mit Instationaritäten des Verkehrsablaufs noch mit zu geringer Datenbasis innerhalb von Bezugsintervallen, da diese Intervalle gar nicht benötigt werden;
- man erhält auch Ergebnisse im Bereich des gebundenen Verkehrs, d. h. oberhalb der zur maximalen Verkehrsstärke gehörigen „optimalen“ Dichte.

Gewisse Schwierigkeiten bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens entstehen durch die Notwendigkeit der Spezifizierung der Funktion $g(k, i)$, die das Überholverhalten beschreibt. Über diese Funktion sind nur einige Eigenschaften bekannt, die ihren quantitativen Verlauf aber nicht eindeutig festlegen.

Als ein Nachteil des Modells mag es angesehen werden, daß nicht alle zeitlich begrenzten Geschwindigkeitsstreuungen des einzelnen Fahrzeugs berücksichtigt werden. Dieser Nachteil ist aber anscheinend nicht gravierend, weil derartige Streuungen nur dann vernachlässigt werden, wenn sie auf kleine Veränderungen der Verkehrsdichten zurückzuführen sind, nicht jedoch dann, wenn sie im Gleichgewichtszustand des Verkehrsflusses – also bei konstanter Dichte – bereits vorhanden sind.

Ein Ansatz zur Verbesserung des Modells könnte darin bestehen, die in der Übergangswahrscheinlichkeit $P_{k,k+\Delta k}(i, j)$ vorkommende Funktion $h(k, i)$ (s. Gleichung (2)) nicht nur von der Verkehrsdichte k und der Geschwindigkeitsklasse i , sondern auch von der Geschwindigkeitsklasse j abhängig zu machen. Dies würde auf ein System von n impliziten Gleichungen in den n Unbekannten $P_k(1), \dots, P_k(n)$ führen, die aber nicht mehr sukzessiv, sondern simultan gelöst werden müßten. Der damit verbundene höhere numerische Aufwand scheint aber angesichts der ohnehin bereits sehr realitätsnahen Ergebnisse kaum gerechtfertigt.

Das Modell ist prinzipiell in der Lage, auch dann eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Straßen zu ergeben, wenn – bei ansonsten gleichbleibenden Parametern – die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten bei hohen Werten „abgeschnitten“ wird. Daher würde es sich zum Beispiel zur Untersuchung der Auswirkungen von Geschwindigkeits-

beschränkungen auf die Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken in Abhängigkeit der Dichten eignen; allerdings wäre es von entscheidender Bedeutung, etwaige Änderungen der das Überholverhalten beschreibenden Funktion $g(k, i)$ infolge von Geschwindigkeitsbeschränkungen zu kennen.

Ein weiteres Beispiel für eine Anwendung des entwickelten Modells ist die Untersuchung der Einflüsse verschiedener Witterungsbedingungen auf die Geschwindigkeits-Dichte-Beziehungen. Hierzu müßten die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten, die Zeitabstände t_a und t_p sowie die Funktion $g(k, i)$ für die betrachteten Witterungsbedingungen bekannt sein.

Diese Bemerkungen deuten bereits darauf hin, daß das Berechnungsmodell im Rahmen seiner Möglichkeiten zur Lösung verschiedener Fragen und Probleme in Zusammenhang mit Geschwindigkeitsverteilungen und Fundamentaldiagrammen angewendet werden kann.

Summary

A method is developed that allows the calculation of the distribution of instantaneous speeds for any traffic density. As a special case, the relationship between traffic volume and density may be obtained. The method requires the specification of the distribution of desired speeds, a certain function describing overtaking behaviour, and the density for congested traffic. These are the parameters for a system of transition probabilities by which the change in the distribution of speeds due to a small increase in traffic density is modelled. The model yields a system of differential equations for the determination of the speed distribution as a function of density. The method is applied to two- and three-lane roadways of freeways.