

Dann löst das bislang absehbare Liberalisierungsprogramm, für sich gesehen, wesentliche Bestandteile einer solchen Politik noch nicht. Man könnte sogar befürchten, es stelle eine Erschwerung etwa für die nachhaltige finanzielle Stabilisierung der Eisenbahnen dar, ganz zu schweigen von den Warnungen hinsichtlich der Straßenbelastung, Verkehrssicherheit und Umwelt. Doch hier liegen keine Gegenargumente, sondern wohlbekannt, bislang aber nicht oder nur unvollkommen gelöste Probleme.

So ist für die Integration der Eisenbahnen in eine Wettbewerbsordnung die konzeptionelle Vorarbeit geleistet, die mit den Stichwörtern „spezifische Vergütungen für öffentliche Auflagen und Aufträge“ und „Spartenerfolgsrechnung“ angesprochen werden kann. Offene Fragen bietet aber noch die Bemessung der mit dem Konzept zu vereinbarenden Wettbewerbsspielräume besonders für die Tarifpolitik. Noch größere Schwierigkeiten bestehen für eine bedarfsgerechte Infrastrukturplanung, zumal hier eine Rückkoppelung zur Harmonisierung des Komplexes Fiskalbelastungen und Autobahnbenutzungsgebühren vorliegt. Aber auch für dieses Problemfeld kann, wie umfangreiche wissenschaftliche Vorarbeit zeigt, eine Lösung der Planungs- und Finanzierungsprobleme auf der Basis einer Marktsimulation mit Budgetvorgaben gefunden werden. Diese Hinweise bieten nicht schon die greifbaren Lösungen; sie geben aber die Richtung an, die nach der praktischen und wissenschaftlichen Erfahrung Lösungen verspricht.

Summary

The ongoing liberalization of the EC transport markets has to be seen in interrelation between structural changes in industry and in location and space economy. It is emphasized that changing demand requirements ask for more flexibility in arranging appropriate supplies for transport and logistic markets. Traditional government regulation policy turned out to be an obstacle for adjustments and was hollowed out step by step. The process of liberalization that already started some time ago, was confirmed by the European Court of Justice-sentence dated 22. 5. 1985. Topics of this examination are a theoretical discussion about government regulation and deregulation policy with regard to transport markets, striking regulatory defects of the European transport markets, the problem of harmonizing the competitive imbalance and an up-to-date transport policy-referring interpretation of contractual obligations.

Ein theoretisches Modell zur Berechnung von Zeitlückenverteilungen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte

VON DIRK HEIDEMANN, BERGISCH GLADBACH

I. Einleitung

Unter Zeitlücke versteht man den zeitlichen Abstand eines betrachteten Fahrzeugs zum auf demselben Fahrstreifen vorausfahrenden Fahrzeug; üblicherweise werden Zeitlücken lokal an einem Querschnitt erhoben. Man bezeichnet als Brutto- bzw. Nettozeitlücke den zeitlichen Abstand von der vorderen bzw. hinteren Stoßstange des vorausfahrenden bis zur vorderen Stoßstange des betrachteten Fahrzeugs.

Zeitlückenverteilungen – also die statistischen Verteilungen von Zeitlücken in einem Fahrzeugstrom – sind seit Jahrzehnten grundlegender Bestandteil von Forschungen auf dem Gebiet des Verkehrsflusses. Eine umfassende theoretisch-analytische Begründung der beobachteten Verteilungen gibt es aber bisher nicht. Vielmehr wurde in den meisten – wenn nicht in allen – einschlägigen Arbeiten versucht, in empirisches Datenmaterial unterschiedliche Verteilungstypen einzupassen und die Verteilungsparameter zu schätzen¹⁾. Offen blieb dabei die Frage, warum die jeweiligen Verteilungstypen die beobachteten Zeitlücken mehr oder weniger gut beschreiben – zumindest, wenn man von Randbedingungen wie z. B. dem Fall kleiner Verkehrsdichten, wo bekanntlich die Exponentialverteilung vorliegen muß, einmal absieht. Insbesondere ist der Einfluß z. B. der Geschwindigkeitsverteilung des betrachteten Fahrzeugstromes auf die Verteilungstypen und ihre Parameter nicht bekannt. Dies wäre aber gerade für einige wichtige Anwendungen von Zeitlückenverteilungen erforderlich. So möchte man z. B. wissen, wie sich Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Zeitlückenverteilungen auswirken können oder welchen Einfluß verkehrsbeeinflussende Maßnahmen haben. Dies ist sowohl für die Verkehrstechnik wie auch für die Beurteilung der Verkehrssicherheit von Interesse.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist vor diesem Hintergrund eine theoretisch-analytische Herleitung von Zeitlückenverteilungen als Funktion der Verkehrsdichte. Eine Einflußgröße stellt dabei die Geschwindigkeitsverteilung dar, die in einem früheren Beitrag²⁾ mit analogen mathematischen Methoden ermittelt wurde. Ebenso wie dort wird hier im wesentlichen vorausgesetzt die Kenntnis

- der Verteilung der Geschwindigkeiten bei sehr kleinen Dichten,
- einer Funktion zur Beschreibung des Überholverhaltens sowie
- der Staudichte.

Anschrift des Verfassers:

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

1) Vgl. Buckley, D. J., A Semi-Poisson Model of Traffic Flow, in: Transportation Science, Vol. 2 (1968), S. 107–133.

2) Vgl. Heidemann, D., Eine analytische Berechnungsmethode für Geschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte, in: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 57. Jg. (1986), S. 57–68.

Dieses sind Parameter für ein System von Übergangswahrscheinlichkeiten, durch das die Veränderung der bedingten Geschwindigkeitsverteilung bei gegebener Weglänge modelliert wird, soweit diese Veränderung auf ein infinitesimales Anwachsen der Verkehrsdichte von k auf $k + dk$ zurückzuführen ist. Der Modellansatz führt schließlich auf ein System von Differentialgleichungen, durch das für jede Dichte die bedingte Geschwindigkeitsverteilung bei gegebener Weglänge bestimmt werden kann (s. Abschnitt 2.1). Die Ermittlung der Zeitlückenverteilungen ist dann zwangsläufig (s. Abschnitt 2.2). Ein Anwendungsbeispiel wird in Abschnitt 3 gegeben.

2. Theoretisches Modell

2.1 Geschwindigkeitsverteilung bei gegebener Weglänge

Wir teilen das mögliche Geschwindigkeitsspektrum in n Klassen; wenn die Teilpunkte mit v_0, v_1, \dots, v_n bezeichnet werden, wobei $v_0 = 0$ und $v_n = \infty$ ist, so reicht die j -te Klasse von v_{j-1} bis v_j .

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

$P_{s, k}(j)$ sei nun die Wahrscheinlichkeit, bei Dichte k in der j -ten Geschwindigkeitsklasse zu fahren, und zwar unter der Bedingung, daß die Netto-Weglücke zum vorausfahrenden Fahrzeug $\leq s$ ist. Unser Ziel ist in diesem Abschnitt, die Verteilungen $P_{s, k}$ zu bestimmen. Die unbedingten Geschwindigkeitsverteilungen $P_k := P_{\infty, k}$ wurden bereits früher hergeleitet.³⁾

Wir benötigen die folgende Definition. Es sei

$P_{s, k, k+dk}(j, r | i)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Fahrzeug, welches bei Dichte k in der Geschwindigkeitsklasse j fährt, bei Zunahme der Dichte um den infinitesimalen Betrag dk in die Klasse r gerät, und zwar unter der Bedingung, daß das vorausfahrende Fahrzeug sich in der Geschwindigkeitsklasse i befindet und die Netto-Weglücke $\leq s$ ist.

Es wird unten gezeigt, daß gilt⁴⁾:

$$P_{s, k, k+dk}(j, r | i) = \begin{cases} h'_s(k, j) \cdot dk, & \text{falls } r=i \text{ und } j>i \\ 1-h'_s(k, j) \cdot dk, & \text{falls } r=j \text{ und } j>i \\ 1, & \text{falls } j \leq i \text{ und } r=j \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (1)$$

Die in (1) vorkommende Funktion $h'_s(k, j)$ lautet:

$$h'_s(k, j) = g(k, j) \cdot \frac{1-E_j(\exp(-\min(v \cdot t_a \cdot k^*, s \cdot k^*)))}{1-\exp(-s \cdot k^*)} + g(k, j) \cdot (1-E_j(\exp(-v \cdot t_a \cdot k^*))) \cdot \frac{P_s(k, j)}{1-p(k, j)} \quad (2)$$

3) Vgl. ebenda.

4) (Partielle) Ableitungen nach k werden mit „'“ bezeichnet.

Dabei ist:

$k^* := k/(1-k/k_{St})$, wobei k_{St} die Staudichte für den betrachteten Fahrstreifen bezeichnet; k^* ist somit der Reziprokwert der mittleren Netto-Weglücke bei Dichte k . Unter „Staudichte“ verstehen wir hier die kleinste Dichte, bei der der Fahrzeugstrom verkehrsbedingt zum Stillstand kommt. Die „mittlere Netto-Weglücke“ bei Dichte k bedeutet hier – abweichend vom üblichen Sprachgebrauch – die Differenz zwischen der mittleren Brutto-Weglücke bei Dichte k und der mittleren Brutto-Weglücke bei Staudichte.

$t_a = t_a(k, j)$ eine Netto-Zeitlücke, unterhalb derer sich ein Fahrzeug im Zustand (k, j) an die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs anpaßt, sofern dieses in einer niedrigeren Geschwindigkeitsklasse fährt und keine Überholung durchgeführt wird.

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

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

$$p(k, j) := [1-E_j(\exp(-v \cdot t_p \cdot k^*))] \cdot [P_k(j) \cdot (1-g(k, j)) + g(k, j)].$$

Bereits früher wurde gezeigt⁵⁾, daß $p(k, j)$ die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, j) als Folgefahrzeug im Pulk fährt.

$$P_s(k, j) := \frac{1-E_j(\exp(-\min(v \cdot t_p \cdot k^*, s \cdot k^*)))}{1-\exp(-s \cdot k^*)} \cdot [P_k(j) \cdot (1-g(k, j)) + g(k, j)]$$

$p_s(k, j)$ ist somit die $p(k, j)$ entsprechende Wahrscheinlichkeit, jedoch unter der Bedingung, daß die Netto-Weglücke $\leq s$ ist.

$t_p = t_p(k, j)$ eine Netto-Zeitlücke, unterhalb derer ein Fahrzeug im Zustand (k, j) ein Folgefahrzeug im Pulk ist; das vorausfahrende Fahrzeug befindet sich dann in der gleichen Klasse j .

Zur Erläuterung von (1) und (2) sei nun zunächst bemerkt, daß $1-E_j(\exp(-v \cdot t_a \cdot k^*))$ die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß ein Fahrzeug im Zustand (k, j) eine Netto-Zeitlücke $\leq t_a$ zum vorausfahrenden Fahrzeug hat. Die dabei unterstellte Exponentialverteilung der Netto-Weglücken wird im Anhang gerechtfertigt.

Der Term $p_s(k, j)/(1-p(k, j))$ in (2) läßt sich wie folgt umformen:

$$\frac{P_s(k, j)}{1-p(k, j)} = \sum_{m \geq 2} (m-1) \cdot P_s(k, j) \cdot p^{m-2}(k, j) \cdot (1-p(k, j))$$

Dies ist der Erwartungswert der Pulklänge (ausschließlich Pulkführer) von Fahrzeugen im Zustand (k, j) , und zwar unter der Bedingung, daß die Netto-Weglücke $\leq s$ ist. Dabei wurde davon ausgegangen, daß alle Pulkfahrzeuge außer dem Pulkführer die gleiche Weglänge haben wie das letzte Pulkfahrzeug.

Aufgrund dieser Definitionen und Erläuterungen erhalten wir nun im Fall $i < j$ mit $P_k(i) \cdot h'_s(k, j)$ die Wahrscheinlichkeit, bei Dichte k von der Geschwindigkeitsklasse j in die Geschwindigkeitsklasse i des vorausfahrenden Fahrzeugs überzugehen, und zwar unter der Hypothese, daß die Netto-Weglücke $\leq s$ ist. (Der erste Summand auf der rechten Seite von (2) bezieht sich auf die Pulkführer, der zweite Summand auf alle anderen Fahrzeuge.) Diese Über-

5) Vgl. Heidemann, D., Eine analytische Berechnungsmethode . . . , a.a.O., S. 57 ff.

gangswahrscheinlichkeit gilt aber im Gleichgewichtszustand des Verkehrsflusses, d. h. bei konstanter Dichte. Eine Zunahme der Dichte um den infinitesimalen Betrag dk führt zu einer zusätzlichen, also das Gleichgewicht störenden, Wahrscheinlichkeit.

$$P_k(i) \cdot h_s'(k, j) \cdot dk \quad (\text{für } i < j).$$

Dieser Ausdruck muß bei Konditionierung auf die Geschwindigkeitsklasse i des vorausfahrenden Fahrzeugs noch durch $P_k(i)$ dividiert werden. So ergibt sich die erste Zeile in (1) (Fall $r=i$ und $j>i$). Die übrigen Zeilen in (1) sind damit leicht herzuleiten.

Nach der Modellvorstellung wird also der Gleichgewichtszustand des Verkehrsflusses bei konstanter Dichte infolge eines Dichtezuwachses gestört; die modellierten Störfaktoren sind die sich mit der Dichte ändernden Verteilungen der Netto-Weglücken, Längen von Pulks in den einzelnen Geschwindigkeitsklassen sowie Überholmöglichkeiten.

Um unser Ziel – die Ermittlung der $P_{s,k}(j)$ – zu erreichen, benötigen wir noch die folgende Definition. Es sei

$P_{s,k}(j | i)$ die Wahrscheinlichkeit, bei Dichte k und Netto-Weglücke $\leq s$ in der j -ten Geschwindigkeitsklasse zu fahren, und zwar unter der Bedingung, daß das vorausfahrende Fahrzeug in der i -ten Klasse fährt.

Für alle i und r gilt dann die folgende Differentialgleichung:

$$P_{s,k+d_k}(r | i) = \sum_{j=1}^n P_{s,k}(j | i) \cdot P_{s,k,k+d_k}(j, r | i).$$

Die Anfangsbedingung lautet⁶⁾:

$$P_{s,0}(j | i) = P_0(j) \quad \text{für alle } i \text{ und } j.$$

Damit erhalten wir als Lösung dieses Differentialgleichungssystems:

$$P_{s,k}(j | i) = \begin{cases} P_0(j), & \text{falls } j < i \\ P_0(j) \cdot \exp(-h_s(k, j)), & \text{falls } j > i \\ 1 - \sum_{r < i} P_0(r) - \sum_{r > i} P_0(r) \cdot \exp(-h_s(k, r)), & \text{falls } j = i. \end{cases} \quad (3)$$

Nun lassen sich die $P_{s,k}(j)$ bestimmen aus

$$P_{s,k}(j) = \sum_{i=1}^n P_k(i) \cdot P_{s,k}(j | i) \quad \text{für alle } j. \quad (4)$$

2.2 Zeitlückenverteilung

Sei nun Q_k die Verteilung der Brutto-Zeitlücken bei Dichte k , und sei F_k die Verteilung der Netto-Weglücken bei Dichte k . Für F_k kann die Exponentialverteilung mit Parameter $k^* = k/(1-k/k_{St})$ vorausgesetzt werden (s. Anhang). Es folgt nun:

$$Q_k(t \leq t_0) = \int_0^{\infty} P_k(v \geq \frac{s+1/k_{St}t}{t_0} | s) dF_k(s).$$

6) p_0 bezeichnet die Geschwindigkeitsverteilung bei sehr kleinen Dichten.

Der Integrand bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, die Brutto-Weglücke $s + 1/k_{St}$ in einer Zeit $\leq t_0$ zu durchfahren, und zwar unter der Bedingung, daß die Netto-Weglücke gleich s ist. Nach einiger Umformung (unter Verwendung des integraltheoretischen Satzes von Fubini) erhalten wir schließlich bei hinreichend engen Geschwindigkeitsklassen mit Mittelwerten \bar{v}_j :

$$Q_k(t \leq t_0) = \sum_{j=1}^n P_s(j, t_0, k) \cdot (1 - \exp(-s(j, t_0) \cdot k^*)), \quad (5)$$

$$\text{mit } s(j, t_0) := \bar{v}_j \cdot t_0 - 1/k_{St}.$$

Auch für die Berechnung von Netto-Zeitlücken ist diese Gleichung geeignet; hierfür muß lediglich $s(j, t_0) = \bar{v}_j \cdot t_0 - 1/k_{St} + L$ gesetzt werden, wenn L die Fahrzeuglänge ist.

Es läßt sich mathematisch zeigen, daß Gleichung (5) bei sehr kleinen Dichten auf die Exponentialverteilung für die Zeitlücken führt.

3. Anwendungsbeispiel

Die Gleichungen (5) und (4), die das entwickelte Modell darstellen, wurden zur Berechnung der Zeitlückenverteilungen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte auf einem Einzelfahstreifen einer mehrstreifigen Richtungsfahrbahn angewendet. Die Ergebnisse sind in den Bildern 1 und 2 dargestellt. Es handelt sich sowohl um Brutto- wie auch um Nettozeitlücken. Es wurden nur Zeitlücken bis 6 s berücksichtigt, da größere Werte für denkbare Anwendungszwecke (Verkehrsbeeinflussung, Verkehrssicherheit) weniger interessant sind.

Das Geschwindigkeitsspektrum wurde in 40 Klassen der Breite 5 km/h eingeteilt, beginnend bei $v_0 = 0$ km/h; zusätzlich wurde die Überlaufklasse ab 200 km/h definiert. Die Berechnungen wurden mit den folgenden Parametern durchgeführt:

- einer Normalverteilung mit Mittelwert 130 km/h und Variationskoeffizient 0,2 für die lokalen Wunschgeschwindigkeiten
- t_a = lineare Funktion der Geschwindigkeit, 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)
- $t_p = 2$ s
- $k_{St} = 50$ Fz/km für den betrachteten Einzelfahstreifen
- Lkw-Anteil 0 %
- $L = 5$ m
- $g(k, j) = (k/k_{St})^{2/3}$.

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.

Für $g(k, j)$ wurde der gleiche Ansatz gewählt wie früher⁷⁾.

Die $P_k(i)$, die in (2) und in (4) eingehen, wurden nach der bereits entwickelten Methode berechnet⁸⁾, und zwar entsprechend der hier interessierenden Anwendung als lokale Geschwin-

7) Vgl. Heidemann, D., Eine analytische Berechnungsmethode..., a.a.O., S. 57 ff.

8) Vgl. ebenda.

Bild 1: Verteilung von Brutto-Zeitlücken. Ergebnisse des theoretischen Modells mit Parametern gemäß Abschnitt 3.

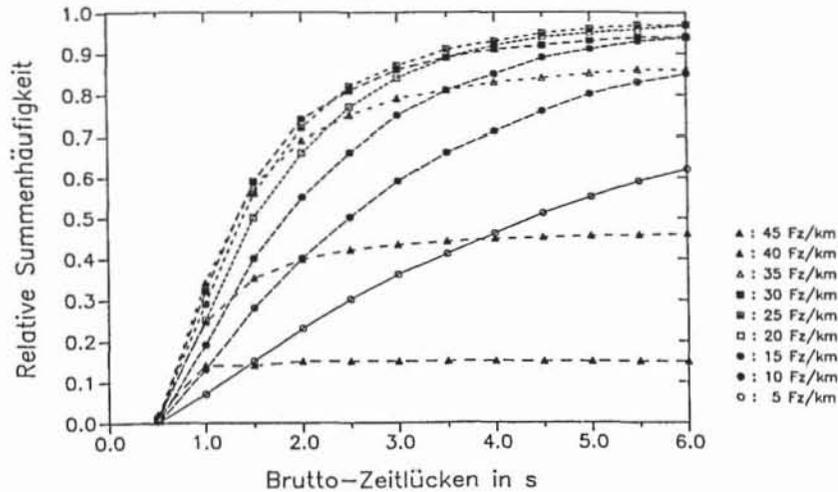
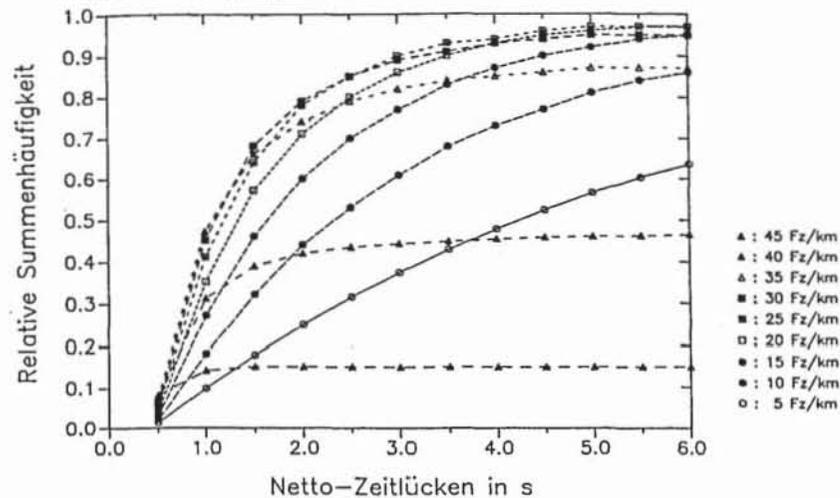


Bild 2: Verteilung von Netto-Zeitlücken. Ergebnisse des theoretischen Modells mit Parametern gemäß Abschnitt 3.



digkeitsverteilungen für den Einzelfahrstreifen. (Wären sie als momentane Geschwindigkeitsverteilungen ermittelt worden, so hätte man momentane Zeitlückenverteilungen entlang der Strecke erhalten.)

Die mit den so spezifizierten Parametern erhaltenen Ergebnisse des theoretischen Modells sollen nun verglichen werden mit empirischen Daten. Dazu sind die folgenden Überlegungen vorzuschicken.

Bei Auswertungen empirischer Daten ist es in der Regel nicht zu vermeiden, daß sich innerhalb der einzelnen Beobachtungsintervalle unterschiedliche Zeitlückenverteilungen (oder auch nur Teilbereiche solcher Verteilungen) auf unkontrollierbare Weise überlagern; dies liegt daran, daß die Stationarität der beobachteten und den empirischen Verteilungen zugrunde gelegten stochastischen Prozesse mehr oder weniger stark verletzt ist. Für die Beurteilung der empirischen Ergebnisse bedeutet dies, daß eine zusätzliche Streuungskomponente in die Verteilungen hineingerät, die zu einer Überschätzung des Anteils kleiner (und des Anteils großer) Zeitlücken im Vergleich zu den stationär Verteilungen bei gleichen Verkehrsstärken führt. Dieser Verzerrungseffekt, der also bei empirischen Verteilungen in der Regel latent vorhanden ist, muß bei Vergleichen mit den theoretischen Verteilungen – die rein stationäre Verhältnisse beschreiben – stets berücksichtigt werden.

Für den Vergleich mit dem theoretischen Modell wurden die von Buckley⁹⁾ präsentierten empirischen Zeitlückenverteilungen ausgewählt. Die Daten wurden in Australien im Raum Sydney auf einem mittleren Fahrstreifen einer sechsstreifigen Autobahn erhoben; die Verkehrsstärken wurden in 1-Minuten-Intervallen ermittelt und in sieben Klassen eingeteilt, für die dann jeweils die Zeitlückenverteilungen bestimmt wurden.

Es gibt sicherlich Einschränkungen hinsichtlich der Eignung dieser Daten für einen Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen. So ist z. B. im einzelnen nicht bekannt, inwieweit die für das Anwendungsbeispiel in diesem Abschnitt spezifizierten Parameter für die australischen Daten zutreffen. Der Vorteil dieser Daten ist jedoch, daß sie ein breites Verkehrsstärkespektrum abdecken und vor allem, daß die einzelnen empirischen Verteilungen wohl als relativ stationäre betrachtet werden können, so daß der oben beschriebene Verzerrungseffekt wenig ausgeprägt sein dürfte.

Der Vergleich der theoretischen mit den empirischen Ergebnissen ist in Bild 3 veranschaulicht. Die von Buckley¹⁰⁾ in Klassen der Breite 0,2 s grafisch dargestellten Zeitlückenverteilungen wurden hier in Klassen der Breite 0,5 s gerastert, wobei erforderlichenfalls innerhalb einzelner Klassen linear interpoliert wurde. Den theoretischen Verteilungen wurden Verkehrsstärken zugrunde gelegt, die in etwa den empirischen entsprechen.

Aus Bild 3 ergibt sich für mittlere und hohe Verkehrsstärken eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Empirie. Lediglich bei den Verkehrsstärken ~ 700 und ~ 400 Kfz/h ist die Übereinstimmung etwas schlechter; dies kann aber durchaus auf den oben beschriebenen Verzerrungseffekt bei den empirischen Ergebnissen oder auf die gewählten Eingangsparameter des theoretischen Modells zurückzuführen sein. Ferner wird in manchen Fällen im Bereich sehr kleiner Zeitlücken die Realität nicht sehr genau abgebildet. Dies könnte darauf hinweisen, daß das Modell das Fahrerverhalten bei sehr dichtem Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug nur unscharf beschreibt. Bei Weiterentwicklungen wäre daher zu prüfen, ob Korrekturen

9) Vgl. Buckley, D. J., A Semi-Poisson Model..., a.a.O., S. 107 ff.

10) vgl. ebenda.

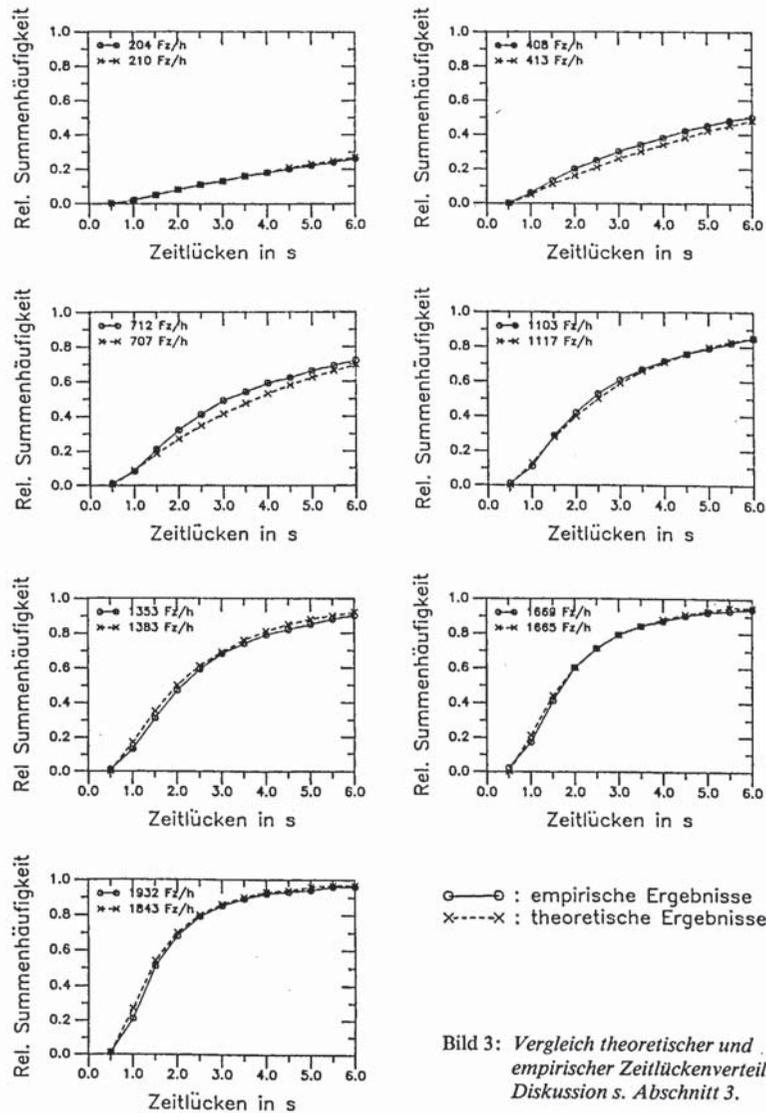


Bild 3: Vergleich theoretischer und empirischer Zeitlückenverteilungen. Diskussion s. Abschnitt 3.

für besonders riskantes oder vorsichtiges Fahren bei sehr kleinen Zeitlücken berücksichtigt werden sollten. Die insgesamt gute Verträglichkeit der theoretischen und der empirischen Zeitlückenverteilungen ist umso bemerkenswerter, als keinerlei statistische Anpassung des theoretischen Modells an die empirischen Daten vorgenommen wurde (wenn man von der Herstellung etwa gleicher Verkehrsstärken absieht).

4. Zusammenfassung und Schlußbemerkungen

Es wurde ein theoretisches Modell zur analytischen Berechnung von Zeitlückenverteilungen in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte entwickelt. Das methodische Vorgehen baut auf dem bereits beschriebenen auf¹¹⁾.

Als Eingangsparameter werden im wesentlichen benötigt:

- die Geschwindigkeitsverteilung bei sehr kleinen Dichten,
- eine Funktion zur Beschreibung des Überholverhaltens sowie
- die Staudichte.

Ein Anwendungsbeispiel, in dem auch theoretische mit empirischen Ergebnissen verglichen werden, wird angegeben. Es zeigt sich, daß die theoretischen Zeitlückenverteilungen insgesamt gut mit den empirischen übereinstimmen, auch wenn der Vergleich Einschränkungen unterliegt.

Ein Vorteil des entwickelten Modells ist es, daß nur ein Minimum an Parametern des Verkehrsablaufs benötigt werden und dennoch Ergebnisse für das ganze Spektrum vom freien Verkehrsfluß bis hin zum Stau erhalten werden. Der Einfluß z. B. von Geschwindigkeitsverteilungen (in denen sich wiederum die Überholmöglichkeiten niederschlagen) auf die resultierenden Zeitlückenverteilungen ist explizit im Modell sichtbar; allein hiermit eröffnen sich bereits interessante Anwendungsmöglichkeiten, auf die in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen wird.

Schließlich sei darauf hingewiesen, daß die in Abschnitt 2.1 für jede Dichte hergeleitete bedingte Geschwindigkeitsverteilung bei gegebener Netto-Weglücke von eigenem Interesse ist, da damit die Grundlage für die Analyse gemeinsamer Verteilungen von Geschwindigkeiten und Zeit- oder Weglücken gegeben ist.

Anhang (Herleitung der Exponentialverteilung für Netto-Weglücken

Wir denken uns die Netto-Weglücken aneinandergeschoben, so daß auf einer Strecke der Länge s bei Verkehrsdichte k im Mittel $s \cdot k^*$ dieser Abstände vorhanden sind, wobei

$$k^* = k / (1 - k/k_{St}) \text{ mit } k_{St} = \text{Staudichte}$$

ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Netto-Weglücke kleiner oder gleich s infolge eines infinitesimalen Zuwachses dk^* entsteht, ist dann gleich $s \cdot dk^*$.

Sei nun $Q_{k^*}(s)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Netto-Weglücke bei Dichte k kleiner oder gleich s ist. Dann kann man leicht sehen, daß folgende Differentialgleichung erfüllt sein muß:

$$Q_{k^*+dk^*}(s) = Q_{k^*}(s) + (1 - Q_{k^*}(s)) \cdot s \cdot dk^*$$

Die Lösung dieser Gleichung ist die Exponentialverteilung:

$$Q_{k^*}(s) = 1 - \exp(-s \cdot k^*)$$

Sie gilt nach dieser Herleitung bei allen Dichten, also nicht etwa nur im freien Verkehrsfluß.

11) Vgl. Heidemann, D., Eine analytische Berechnungsmethode..., a.a.O., S. 57 ff.

Summary

A method is developed that allows the determination of time headway distributions for any given traffic density. The model is based on another one that yields speed distributions and has previously been published. Just as for that model, the specification of the speed distribution for very small densities, a certain function describing overtaking behaviour, and the jam density are assumed to be known. For these are the parameters of a system of differential equations from which the two-dimensional distributions of speeds and space gaps at any given density are obtained. Then the time headway distribution is derived. For a specific set of parameter values, the theoretical results for a single lane of a multilane unidirectional roadway are presented and compared with empirical distributions.

Die Transportentfernung als Bestimmungsgröße für die Frachtenbildung auf einem freien Verkehrsmarkt

VON FRITZ DENGLER, MÜNCHEN

I. Einführung

1.) Mit der Schlagzeile „Zum 1. Oktober kommt das Ingrid-Preissystem“ hatte die Deutsche Verkehrs-Zeitung vom 13. September 1984 manchen Leser verblüfft. Der Meldung war zu entnehmen, daß nach einem Tarif dieses Namens für den Seehafen-Container-Verkehr der Transfracht Deutsche Transportgesellschaft mbH die Bundesrepublik Deutschland mit „144 Grids (etwa gleichgroße Planquadrate bzw. liegende Rechtecke) überzogen wird.“ ... „Die Grids sind Preiszonen, d. h. von und zu jeder Empfangs- und Versandstation innerhalb eines Grids gelten im Verkehr von und zu den in Betracht kommenden norddeutschen Seehäfen die gleichen Angebotspreise.“ Als Unterschrift zu einem beigegefügt Bild mit Container-Brücken wurde weiter mitgeteilt: „Im Seehafenverkehr verspricht sich Transfracht von dem Ingrid-Preissystem eine einfache Frachtermittlung.“

Die Bahntochter Transfracht durchbruch mit dieser von den Transportwegen weitgehend abgekoppelten Tarifkonzeption¹⁾ das Prinzip der transportentfernungsabhängigen Frachtenbildung. Die Bundesbahn selbst hatte sich darauf noch vor einigen Jahren bei der grundlegenden Überarbeitung ihres Entfernungswerkes ausdrücklich als marktkonform berufen²⁾. Auch bei der Schaffung des arteiligen, neuen Entfernungswerkes für den Straßengüterfernverkehr spielte das Prinzip eine ausschlaggebende Rolle³⁾. Die Einführung des „Ingrid-Systems“ kann deshalb

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Kfm. Fritz Dengler
Ministerialrat in der
Bayerischen Staatskanzlei
Nelkenweg 18
8028 Taufkirchen

1) o. Verf., Transfracht – Zum 1. Oktober kommt das Ingrid-Preis-System, in: DVZ vom 13. September 1984, S. 6; *Heinici, T.*, Transfracht-System „InGrid“ – So netto wie nur möglich sollten die Preise sein, in: DVZ vom 29. September 1984, S. 6.

2) Vgl. *Jaumann, A.*, Die Sanierung der Deutschen Bundesbahn und ihre zukünftige Tarifpolitik, in: Internationales Verkehrswesen, 29. Jg. (1977), S. 73 ff.

3) Verordnung Nr. 4/86 vom 21. Mai 1986, Bundesanzeiger vom 3. Juni 1986, S. 1; o. Verf., Neues RKT-Entfernungswerk – Bundesverkehrsministerium plant Start zum 1. Juli 1987, in: DVZ vom 29. September 1984, S. 2; *Solter, W.*, Das neue RKT-Entfernungswerk – gespannte Erwartungshaltung im Lkw-Güterverkehr, in: DVZ vom 24. Oktober 1981, S. 2; o. Verf., RKT-Tariferhöhung 1982 und Einführung eines neuen RKT-Entfernungswerkes verschoben, in: Der Spediteur, 32. Jg. (1981), S. 14; *Dengler, F.*, Macht die „Maßstabsvergrößerung“ der Arbeitsteilung im europäischen Integrationsraum eine Neubewertung der Verkehrstarifpolitik erforderlich?, in: Wirkungen der europäischen Verflechtung auf die Raumstruktur in der Bundesrepublik Deutschland (= Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Referate und Diskussionsberichte anlässlich der 20. Wissenschaftlichen Plenarsitzung 1981 in Freiburg i. Br., Forschungs- und Sitzungsberichte, Band 147), Hannover 1983, S. 65, S. 74; sowie Rückschau im DVZ-Kommentar, o. Verf., „Blick in die Zukunft“, in: DVZ vom 18. März 1986, S. 1.

Nahezu zeitgleich vertritt allerdings der Bundesverband des Deutschen Güterfernverkehrs (BDF) in einem Diskussionsbeitrag zur Neuordnung des Ordnungsrahmens für die Verkehrswirtschaft in der Folge des Urteils des Europäischen Gerichtshofes vom 22. Mai 1985 aufgrund der Klage des Europäischen Parlaments gegen den Europäischen Rat wegen Untätigkeit beim Vollzug des EWG-Vertrages in der Verkehrspolitik die Auffassung, daß nur 30 % der Kosten eines Verkehrsunternehmens entfernungsabhängig sind, vgl. BDF, Pflichtenheft für die Entwicklung und Gestaltung eines DEUTSCHEN GÜTERKRAFTVERKEHRSTARIFS (DGT), Frankfurt a. M., 1985, S. 7.