

Jahrbuch der Schweizerischen Verkehrswirtschaft 2003 / 2004

## Methoden und Techniken der Bemessung von Verkehr

M Bernard

Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung

235  
Juni 2004

## **Methoden und Techniken der Bemessung von Verkehr**

M. Bernard  
IVT  
ETH  
CH-8093 Zürich

Telefon: +41 1 633 66 94  
Telefax: +41 1 633 10 57  
bernard@ivt.baug.ethz.ch

Juni 2004

### **Kurzfassung**

Die Bemessung von Verkehr ist eine der zentralen Fragen im Verkehrsingenieurwesen. Es werden verschiedene Konzepte zur Bestimmung der Kapazität von Verkehrswegen vorgestellt, wobei die zeitliche Entwicklung der Ansätze exemplarisch aufgezeigt wird. Elementare Bemessungsmethoden, frühe Bemessungsansätze, darauf aufbauende Modelle und aktuelle Forschungsergebnisse werden behandelt. Die Veröffentlichung soll die Grundlagen von Methoden der Praxis beschreiben und weiterführende Modelle vorstellen.

### **Schlagworte**

Bemessung, Verkehr, Kapazität, Belastung, Quality of Service, Verkehrsflussmodelle

### **Zitierungsvorschlag**

Bernard, M. (2004) Methoden und Techniken zur Bemessung von Verkehr

# 1 Einleitung

Die Bemessung von Verkehrswegen ist seit dem frühen 19. Jahrhundert Gegenstand der Ingenieurwissenschaften. Das Hauptaugenmerk liegt in den frühen Ansätzen auf der Bestimmung der Kapazität von Fernstrassen, angetrieben von ständig wachsenden Verkehrsmengen. In der Gesellschaft wurde mehr und mehr angenommen, dass der Bau von Strassen für die wirtschaftliche Entwicklung notwendig ist. Ziel war es ursprünglich, den vorhandenen Verkehr frei fließen zu lassen. Um den Verkehrsfluss zu optimieren, müssen Messwerte erhoben und ausgewertet werden. Diese werden verallgemeinert und der Verlauf anhand von Kenngrößen beschrieben. Erste Bemessungen folgten Methoden aus anderen Ingenieurwissenschaften. Einem Widerstand – der Kapazität der Strasse – wird das Verkehrsaufkommen als Belastung gegenübergestellt. Problematisch gestaltet sich die Ermittlung einer maximalen Kapazität einer Strasse, da sie sich nicht unabhängig von der Nachfrage beschreiben lässt, da örtliche und zeitliche Verlagerungseffekte i. d. R. nicht ausgeschlossen werden können. Zudem kann keine genaue Verkehrsmenge definiert werden, die einen Zusammenbruch infolge Kapazitätsüberlastung nach sich zieht.

Die zentrale Frage der Kapazität unter gegebenen Umständen und somit die Bestimmung der Bemessungsgrundlage ist ein stets aktuelles Thema in der Literatur, dessen Entwicklung hier anhand von Beispielen betrachtet werden soll.

## 2 Elementare Bemessungsmethode im Verkehrswesen

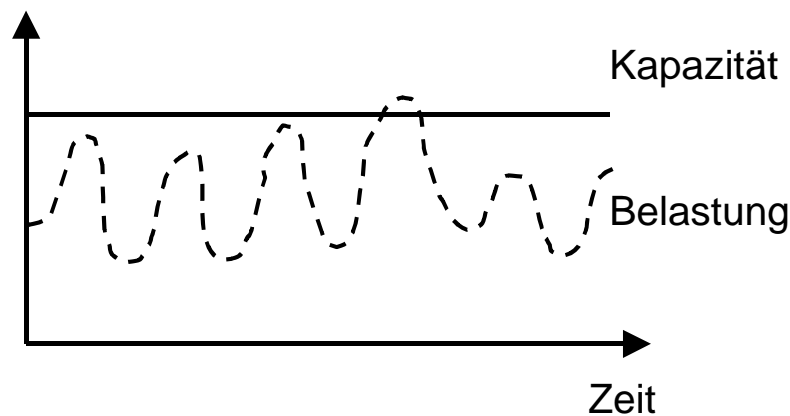
Das Hauptaugenmerk der Veröffentlichungen bis etwa 1950 liegt in der Beschreibung des Verkehrsablaufs. Fundamentale Zusammenhänge wie Zeitlücken und Verkehrsstärken abhängig von der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit wurden anhand des vorherrschenden Verkehrs erklärt. Mit der Errichtung von automatischen Zählstellen wurden die Ergebnisse deutlich detaillierter, und Unterschiede zwischen verschiedenen Strassen- und Knotentypen konnten aufgelöst werden.

Mit den vorhandenen Fundamentaldiagrammen konnte beispielsweise für gegebene Strassentypen die maximal mögliche Kapazität bestimmt werden, der die Belastung aus den ermittelten Ganglinien gegenübergestellt werden konnte. Die aus anderen Ingenieurwissenschaften

übernommene klassische Bemessung, bei der der Widerstand (Kapazität) der Belastung standhalten muss, zeigte sich jedoch in dieser Form als nicht praktikabel (Abbildung 1).

Abbildung 1 Elementares Modell: Widerstand (Kapazität) und Belastung

---



---

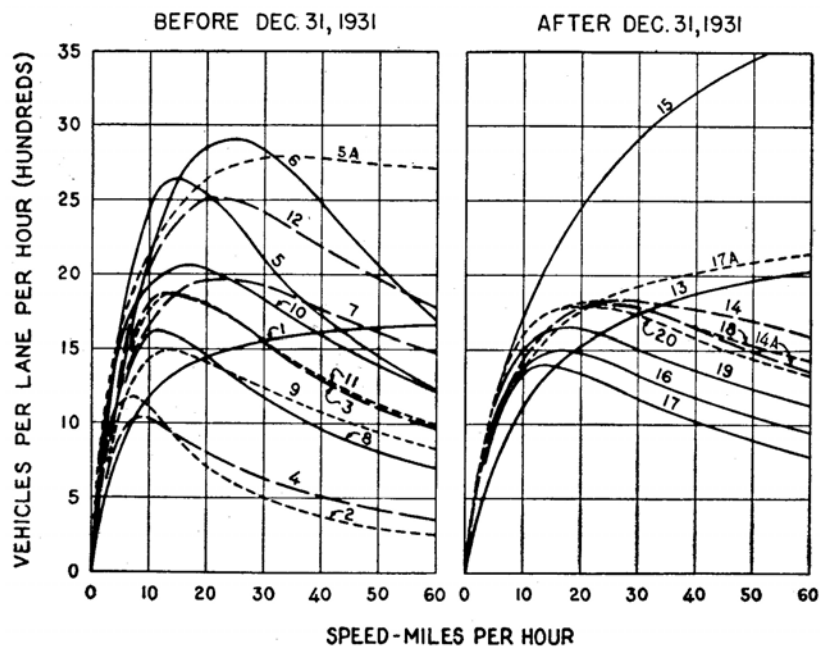
Das immer grösser werdende Verkehrsaufkommen hatte dazu geführt, dass eine Auslegung auf die maximal zu erwartenden Verkehrsstärke wegen hoher Bau- und Unterhaltungskosten nicht ökonomisch vertretbar war. Steigende Verkehrsaufkommen beeinflussen die Nachhaltigkeit von Projekten, so dass aufgrund vielfältiger Unsicherheiten ein Kompromiss gefunden werden muss. Als Mass für die zugelassene Überschreitung der Kapazität wurde eine Anzahl der höchst belasteten Stunden eines Jahres gewählt, deren Zweckmässigkeit vielfältig argumentiert wird.

Die Kapazität wird über gemessene Belastungen gemessen. Anders als in anderen Ingenieurwissenschaften wird ein Zusammenbruch im Verkehrswesen nicht allein durch die Belastung hervorgerufen, da die Kapazität nicht als konstant angesehen werden kann. Beispielsweise zeigen Licht- und Wetterverhältnisse signifikante Einflüsse.

### 3 Bemessungsansätze bis 1950

In Bureau of Public Roads (1950) wird die Kapazitätsbemessung von Schnellstrassen mit „der Effektivität, den Verkehrsfluss zu unterstützen“, verglichen. Zudem sollen die Strassenform und der Verlauf, die Eigenschaften der Fahrer mit ihren Fahrzeugen und verkehrsbeeinflussende Massnahmen berücksichtigt werden. Qualitätskriterien gehen ein über die Variablen Fahrtgeschwindigkeit, relative Behinderung der Fahrzeuge untereinander und die Anzahl an Fahrzeugen, die einen Querschnitt in einem Zeitintervall passieren. Die meisten Studien in der Zeit bis 1950 definieren die Kapazität einer Fahrspur über die Fahrgeschwindigkeit und den Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen (Tabelle 1 und Abbildung 2). Problematisch erscheinen die teilweise grossen Unterschiede der ermittelten maximalen Kapazitäten, so dass sich Bemessungsanwendungen schwierig gestalteten.

Abbildung 2 Berechnete Kapazitäten der Zeitlückenmodelle



Quelle: Bureau of Public Roads (1950)

Tabelle 1 Frühe Ansätze zur Beschreibung von Kapazitäten

Nr. (vgl. Abbildung 2)	Autor	Jahr	Sicherheitsabstand in Fuss, Geschwindigkeiten in Meilen/Stunde			Re- aktions- zeit	Geschw. in Meilen bei $q_{\max}$	Max Kapazität in PWs/h
1	Schwanter	1924	2.933v+ 14.7			2.00	$\infty$	1800
2	French periodical	1924	0.337v <sup>2</sup> +	14.7		0	6.6	1190
3	Lewis	1925	0.0742v <sup>2</sup> +	0.733v+	14.7	0.50	14.1	1870
4	Schaar	1925	0.213v <sup>2</sup> +	1.47v+	14.7	1.00	8.3	1050
5	Johnson	1926	0.0667v <sup>2</sup> +	15		0	15.0	2640
5a	"	1928	0.5v <sup>2.3</sup> +	15		0	34.3	2800
6	Kelker	1926	17.6			-	25.0	2900
7	Highway Research	1927	0.0366v <sup>2</sup> +	1.10v+	17	0.75	21.5	1970
8	Weninger	1929	0.109v <sup>2</sup> +	0.733v+	14.7	0.50	11.6	1610
9	Ehlgotz	1929	0.0773v <sup>2</sup> +	1.47v+	14.7	1.00	14.2	1490
10	Daugherty	1930	0.0556v <sup>2</sup> +	0.733v+	15	0.50	16.4	2060
11	New York Regional	1931	0.072v <sup>2</sup> +	0.733v+	15	0.50	14.4	1870
12	Allan	1931	0.0333v <sup>2</sup> +	0.733v+	14	0.50	20.5	2520
13	Johannesson	1933	2.20v+ 25			1.50	$\infty$	2400
14	Massachusetts WPA	1934	0.025v <sup>2</sup> +	1.47v+	20	1.00	28.3	1830
14a	"	1934	0.0102v <sup>2.3</sup> +	1.47v+	20	1.00	24.1	1800
15	Greenshields	1935	1.10v+ 21			0.75	$\infty$	4800
16	Birula	1935	0.0635v <sup>2</sup> +	1.47v+	16.4	1.00	15.8	1500
17	Nevins	1939	0.0833v <sup>2</sup> +	1.47v+	16	1.00	13.9	1400
17a	"	1939	2.20v+ 16			1.50	$\infty$	2400
18	Clayton	1941	0.0333v <sup>2</sup> +	1.47v+	15	1.00	21.2	1830
19	"	1941	0.05v <sup>2</sup> +	1.47v+	15	1.00	17.3	1650
20	Gulstad	1941	0.0373v <sup>2</sup> +	1.47v+	15	1.00	19.8	1790

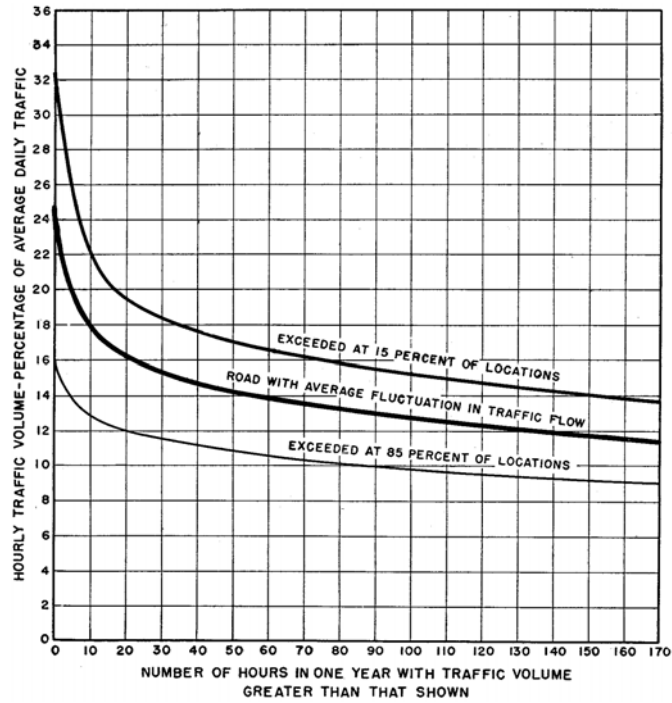
nach Bureau of Public Roads (1950)

Für das Highway Capacity Manual (1950) (Bureau of Public Roads (1950)) fanden erstmals umfangreichere Messungen statt, die automatisiert werden konnten. Schon hier wird bemerkt, dass sich die Kapazität der Strassen allein durch Verkehrsbeeinflussungen und geändertes Fahrverhalten in einem Zeitrahmen von wenigen Jahren erhöht. Der eingehaltene Fahrzeugabstand wurde kürzer, was auf fahrzeugtechnische Verbesserungen wie die Vierradbremse zurückgeführt wird. Es wird zudem angemerkt, dass ein Teil der Fahrer (28% der gemessenen Fahrzeuge) einen Auffahrunfall bei starkem Bremsen des Vorausfahrenden nicht hätte vermeiden können. Der Unterschied von nötigem Sicherheitsabstand und realisiertem Abstand ist aktuell noch ein Thema der Diskussion bezüglich Sicherheit, Fahrqualität und schliesslich der praktikablen Kapazität von Strassen.

In Bureau of Public Roads (1950) wird die Bemessung von zwei- oder mehrspurigen Fernstrassen über die mittlere Fahrgeschwindigkeit beschrieben. Ist das Verkehrsaufkommen einer Strasse sehr hoch, homogenisieren sich die Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge, so dass die Geschwindigkeitsdifferenzen nahezu verschwinden. Dies kennzeichnet die kritische Dichte unter den gegebenen Umständen und der Verkehrsstrom erreicht die maximal mögliche Kapazität. Ein weiterer Anstieg der Verkehrsdichte erzeugt eine Reduktion der mittleren Geschwindigkeit und des Verkehrsflusses. Es wird angenommen, dass die ermittelten maximal möglichen Kapazitäten für alle Strassen gleichen Typs unter idealen Bedingungen bei freiem Verkehrsfluss gelten. Für die Bemessung werden die maximalen Kapazitäten durch Faktoren abgemindert, die die Beschaffenheit der Strecke beschreiben. Dies sind vor allem die Fahrbahnbreite in Verbindung mit der offenen Breite (z. B. durch Mauern, Brücken beschränkt) und den verfügbaren Seitenstreifen, Schwerverkehrsanteil und Sichtweiten. Steigungen ohne sonstige Beeinflussungen haben keinen Einfluss auf den PW-Verkehrsfluss.

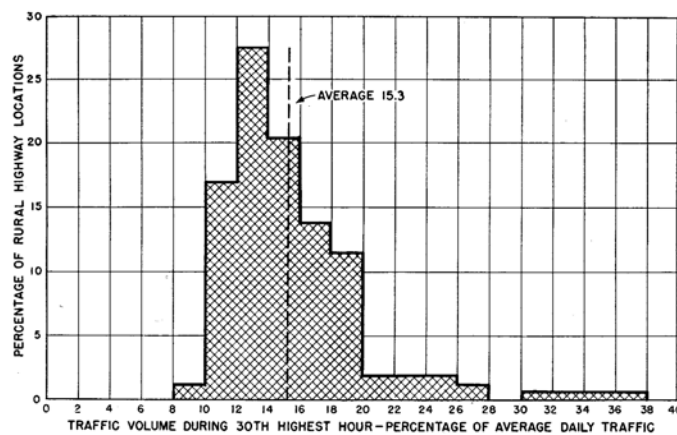
Um die benötigte Kapazität einer Strasse zu ermitteln wird erstmals in Bureau of Public Roads (1950) die 30. Stunde als praktikables Kriterium genannt. Dieser Wert wurde gewählt, da der Kurvenverlauf im Bereich der 30. Stunde zu niedrigeren Stunden hin stark ansteigt und das Kosten-Nutzen-Verhältnis günstig werde (Abbildung 3). Messungen über mehrere Jahre zeigten zudem, dass der Anteil des jährlichen Tagesdurchschnittsverkehr an dem Wert der 30. Stunde sehr wenig variierte. Die Stabilität der 30. maximalen Stunde im Verlauf der Jahressganglinie hat dazu geführt, dass sich dieses Bemessungskriterium durchgesetzt hat und heute noch angewendet wird. Besonders für Strassen an denen keine automatischen Zählstellen existieren wird versucht, den Ganglinienverlauf über den durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) abzuschätzen. Erste Ansätze wurden bereits in Bureau of Public Roads (1950) veröffentlicht (Abbildung 4).

Abbildung 3 Zusammenhang zwischen maximalen Stundenbelastungen und DTV



Quelle: Bureau of Public Roads (1950)

Abbildung 4 Verhältnis des DTV während der 30. Stunde nach Bureau of Public Roads (1950)



Quelle: Bureau of Public Roads (1950)



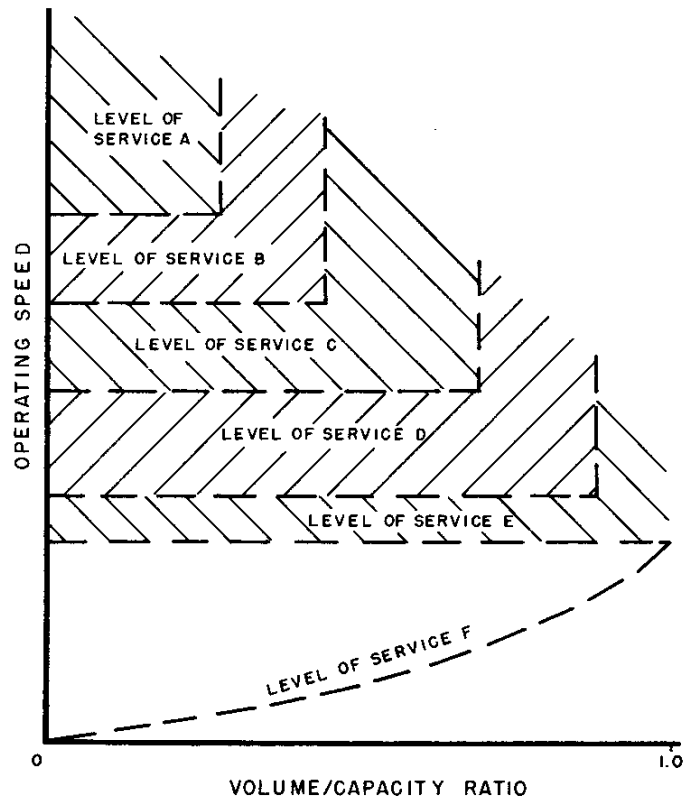
## 4 Diversifizierung und Einführung von Qualitätsstufen

Bisherige Bemessungsmethoden zur Ermittlung der benötigten Kapazität basieren auf intensiven Messungen bestehenden Verkehrs. Gesucht sind Kenngrößen, deren qualitativer Verlauf für unterschiedliche Strassen konstant ist. Gefunden wurden Fahrzeugzeitlücken, Geschwindigkeiten und daraus resultierend die Verkehrsstärke. Wurden anfangs in Bureau of Public Roads (1950) hauptsächlich Mittelwerte betrachtet und verglichen, so wurde in folgenden Studien versucht, die Variabilität durch feinere Kategorisierung zu erklären. Voraussetzung ist, dass der zu bemessende Verkehr vergleichbaren Rahmenbedingungen unterliegt, die bei der Messung der Referenzwerte oder Bemessungskurven vorlag. In Highway Research Board (1965) finden sich, aufbauend auf die erste Ausgabe, viele Übersichten über maximale Verkehrsaufkommen unterschiedlicher Strassentypen anhand von Charakteristika der Variabilität von Verkehrsflüssen und Relationen zwischen Verkehrsaufkommen, Geschwindigkeit und Verkehrsdichte. Die Bemessung der Kapazität wird hier deutlicher als im Jahre 1950 über die Fahrzeugabstände angegeben. Die bestehenden Annahmen, dass Fahrzeuge bei Erreichen der Kapazität einer Strasse einem minimalen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einnehmen, wird bestätigt.

In Highway Research Board (1965) wird bei den Zeitlücken ein mathematisches Modell vorgestellt, das die Messwerte beschreibt bzw. schätzt. Mit Hilfe von Poisson-Verteilungen werden die Häufigkeitsverteilungen der Zeitlücken in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen beschrieben. Bestehende Messwerte sollen mit Hilfe weniger Parameter mathematisch beschreibbar sein, um Werte zu interpolieren als auch zu extrapolieren. Dieses Vorgehen stellt eine Erweiterung der bisherigen Erkenntnisse dar, die nur auf ausgewerteten Messwerten beruhen. Mathematische Modelle, die mit Messwerten kalibriert werden, geben den Kurven einen verallgemeinerten und qualitativen Verlauf und kennzeichnen den Fortschritt in der Bemessungsmethoden in Highway Research Board (1965). Basierend auf dem Zeitlückenmodell, werden Aussagen über deren Verteilung für unterschiedliche Strassentypen bei freiem Fluss getroffen.

Eine weitere Neuerung ist die Einführung von Qualitätsstufen (Levels of Service, LoS), die den Umstand berücksichtigen, dass der Verkehrsfluss auf Strassen abhängig von der Stärke und Dichte unterschiedlich verläuft. Es werden sechs Qualitätsstufen für den ungestörten Verkehrsfluss über die gefahrene Geschwindigkeit und dem Verhältnis aus Verkehrsmenge zu Strassenkapazität definiert.

Abbildung 5 Qualitätsstufen (Levels of Service, LoS) in Highway Research Board (1965)



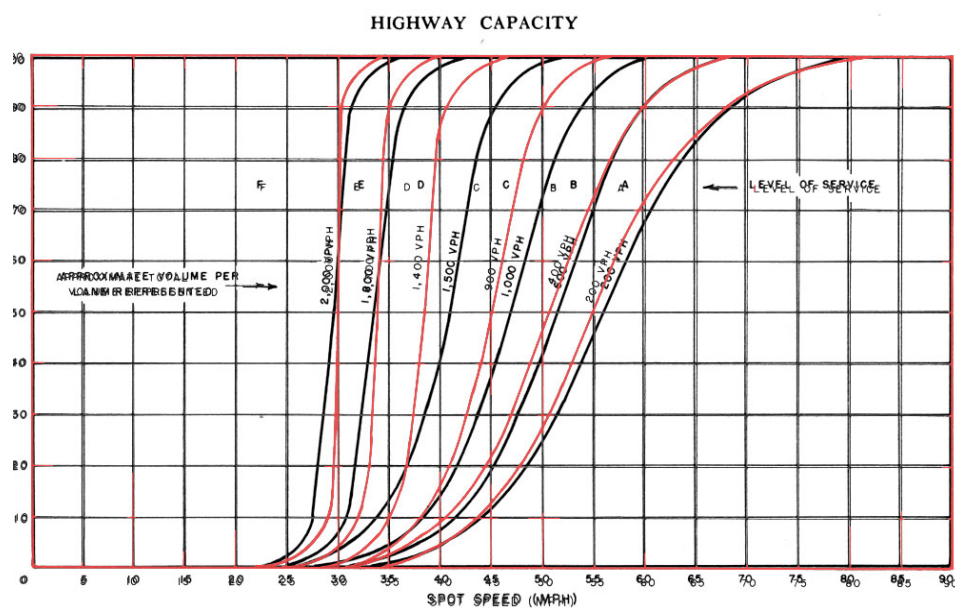
Quelle: Highway Research Board (1965)

Die Stufe höchster Qualität (A) beschreibt den freien Verkehrsfluss mit geringem Verkehrsaufkommen und hohen Geschwindigkeiten. Es herrscht nahezu keine gegenseitige Behinderung der Fahrzeuge vor. Der Bereich des stabilen Flusses kennzeichnet Stufe B, in der Fahrer selten durch die Verkehrsmenge gezwungen werden ihre Geschwindigkeit anzupassen. Die untere Grenze der Stufe B (geringste Geschwindigkeit bei höchster Verkehrsmenge) wird als Bemessungskriterium für Fernstrassen vorgeschlagen. Stufe C befindet sich noch im Bereich des stabilen Flusses, jedoch wird der Fahrer deutlicher zur Anpassung seiner Fahrweise an das erhöhte Fahrzeugaufkommen gezwungen, so dass die meisten Fahrzeuge nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren können. Die realisierte Geschwindigkeit bewegt sich in einem akzeptablen Rahmen. Dieses Kriterium wird für städtische Strassen als praktikabel angesehen. Der Übergang zum instabilen Fluss charakterisiert die Stufe D. Die Geschwindigkeiten bewegen sich in einem für die Fahrer erträglichen Rahmen, wobei das Verkehrsauf-

kommen stark schwankt und die Verkehrsspitzen die Fahrgeschwindigkeit für kurze Zeit stark herabsetzen. Stufe E wird durch noch niedrigere Geschwindigkeiten als in Stufe D beschrieben, bei denen die Verkehrsstärke der Kapazität der Strasse nahe kommt. Der Fluss ist unstabil und kann zu stockendem Verkehr führen. Die niedrigste Stufe F kennzeichnet den stark eingeschränkten Fluss bei niedrigen Geschwindigkeiten. Diese Verkehrsbedingung stellt sich gewöhnlich hinter Engpässen mit aufgestauten Fahrzeugen ein. Der Verkehrsfluss kann für kurze oder längere Zeit zum Stillstand kommen. Eine graphische Darstellung der Qualitätsstufen zeigt Abbildung 5.

Wie der Vergleich zu der Geschwindigkeitsverteilungen abhängig von der Verkehrsstärke zwischen den Daten des Bureau of Public Roads (1950) und Highway Research Board (1965) zeigt, sind schon in dieser Zeitspanne Änderungen im Verkehrsverhalten zu erkennen. Die in Abbildung 6 sichtbaren Unterschiede zwischen den Jahren 1950 und 1965 sind sicherlich nur zu einem kleinen Teil auf geänderte Messmethoden zurückzuführen. Verbesserte Strassen und Fahrzeuge sowie eine verstärkte Nutzung haben in dieser Zeit die Kurvenverläufe beeinflusst.

Abbildung 6 Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen in den USA 1950 (schwarz) und 1965 (grau)



Quelle: Bureau of Public Roads (1950), Highway Research Board (1965)

Das beobachtete Verkehrsverhalten variiert sowohl zwischen den Ländern als auch in Zeitabständen von einigen Jahren. Der ständig verstärkte Einsatz von automatischen Verkehrsmessungsstellen ermöglicht es, dass veränderte Zeitlückenverteilungen, Dauerlinien und Fundamentaldiagramme regelmässig und länderspezifisch veröffentlicht werden können.

## **5 Bemessungsmodelle**

Wichtige Einflussfaktoren der Verkehrsstärken werden in Dietrich (1964) in die zwei Grundkategorien Umwelt-/ Verkehrseinflüsse und individuelles Fahrerverhalten eingeteilt. Das individuelle Verhalten kann nach Dietrich (1964) nicht bestimmt werden, da die für jeden Fahrer individuellen Einflüsse und Reaktionen sich i. d. R. nicht messtechnisch erfassen lassen. Exemplarisch sei das Fahrkönnen, die momentane Verfassung und der Zweck der Fahrt genannt. Es wird angenommen, dass viele Einflüsse dieser Art zusammenwirken und sich auf die Geschwindigkeitswahl und Fahrzeugabstände auswirken. Eine einflussfeine Bestimmung der Faktoren kann nach Dietrich (1964) nicht durchgeführt werden. Die Umwelt- und Verkehrseinflüsse lassen sich hingegen gut kategorisieren und in den meisten Fällen auch messtechnisch erfassen, so dass sich Einflussfaktoren ermitteln lassen. Eine Übersicht der von Dietrich (1964) aufgestellten Einflüsse ist Tabelle 2 zu entnehmen. Die von Dietrich (1964) aufgestellten Einflüsse lassen sich noch um die Komponenten Fahrzeugführer (persönlicher Zustand, Mass der Ablenkung, Ortskenntnisse) und exogene Faktoren (Veranstaltungen, Umgebung, Ereignisse im Sichtfeld) erweitern.

Tabelle 2 Umwelt- und Verkehrseinflüsse auf Verkehrsstärken

Einfluss	Ausprägung
Fahrzeug	Art (Personenwagen, Lastwagen, Motorrad, Velo) Abmessungen Beschleunigungsvermögen Steigfähigkeit
Fahrzeugmischung	Lastwagenanteil am Gesamtverkehr
Strasse	Linienführung Querschnittsgestaltung Steigungsverhältnisse Sichtverhältnisse seitliche Hindernisse
Witterung	Regen Schnee Nebel
Lichtverhältnisse	Gegenlicht (Blenden) Dämmerung
Verkehrsvorschriften	Geschwindigkeitsbeschränkung Signalsteuerung Vortrittsregelung

nach Dietrich (1964)

## 5.1 Die 30. Stunde

Für die Dimensionierung wird in der Regel das Konzept der 30. Stunde angewandt, das im Bureau of Public Roads (1950) vorgestellt wurde. Die Wahl der 30. Stunde wird mit der Abflachung der Dauerlinie in diesem Bereich bei den erhobenen Daten begründet. Antusch (1981) weist darauf hin, dass diese Eigenschaft sich jedoch nur auf Zählungen zutrifft, bei denen Berufs- und Wirtschaftsverkehr den wesentlichen Anteil ausmacht. Die Dauerlinien für

Sonn- und Urlaubsverkehr fallen auch nach der 30. Stunde weiter ab. Die 30. Stunde sollte aber auch bei diesen Verkehrstypen als Dimensionierungsstunde dienen, da nach Ansicht von Antusch (1981) höherbelasteten Stunden von zufälligen Ereignissen wie z. B. Unfälle, besondere Wetterbedingungen oder Veranstaltungen beeinflusst werden. Nach der 20. bis 30. höchstbelasteten Stunde können diese Vorkommnisse ausgeschlossen werden, so dass die Dauerlinie ab diesem Punkt das Verkehrsgeschehen beschreiben kann. Die massgebende Verkehrsstärke wird auch aus ökonomischen Gründen nach der 30. oder einer Stunde geringerer Belastung bemessen, da ein höherer Ausbraugrad zu einer sehr geringen mittleren Auslastung führen würde. Die massgebende höchstbelastete Stunde kann auch als Belastungspercentile ausgedrückt werden. Für die Bemessung nach der 30. Stunde ergibt sich, dass während 99.66 % Stunden des Jahres geringere Verkehrsstärken vorliegen. In der Praxis wird die Beschreibung mittels Belastungspercentile jedoch nur selten verwendet.

Auch in der aktuellen Ausgabe des Highway Capacity Manuals (2000) (Transportation Research Board, 2000) wird die Bemessung nach der 30. bis 100. Stunde vorgeschlagen. Die gerichtete Bemessungsverkehrsstärke lässt sich aus dem Richtungsanteil des Spitzenstundenverkehrs und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke ermitteln, multipliziert mit K-Faktoren zwischen 0.091 und 0.1, die den Urbanisierungsgrad berücksichtigen.

## 5.2 Alternative Belastungen

Für die Ermittlung der zulässigen Belastung oder Kapazität einer Fernstrasse unter idealen Bedingungen beurteilt Dietrich (1964) fünf messbare Kriterien. Alternativ zur Aufstellung der Belastungen der Jahresstunden werden hier mögliche Kerngrössen vorgestellt und bewertet.

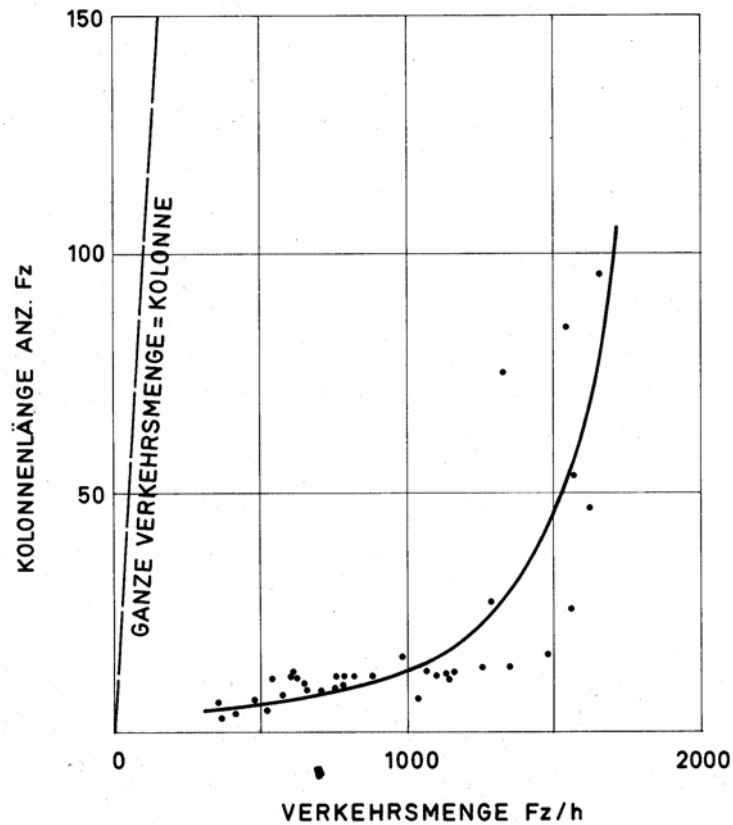
- **Zeitlücken**  
Wird eine Zeitlückenverteilung nach dem Poisson-Gesetz angenommen, erscheint bei ungestörtem Verkehr die Summenlinie der Zeitlücken als Gerade bei logarithmischer Einteilung der Häufigkeitsprozente. Eine kritische Zeitlücke, die den behinderten Verkehr kennzeichnen könnte, tritt bei einem Knick dieser Gerade in der graphischen Darstellung auf. Eine Bestimmung der Kapazität einer Strasse anhand nur dieser Kenngrösse scheint nicht möglich.
- **Geschwindigkeit**  
Im Bureau of Public Roads (1950) wird angenommen, dass die zulässige Belastung einer Strasse unter idealen Bedingungen erreicht ist, wenn 72% der Fahrzeuge nicht ihre Wunschgeschwindigkeit fahren können. Dietrich (1964) nimmt an, dass der Anteil der behinderten Fahrzeuge linear mit der Verkehrsmenge ansteigt, so dass keine Verlaufsänderungen auftreten, die einen Hinweis auf die Kapazität geben könnten.

- **Zunahme der Reisezeit**  
Reisezeiten nehmen nach Analysen von Dietrich (1964) kontinuierlich mit der Verkehrsmenge zu. Ein zumutbarer Faktor der Reisezeitverlängerung gegenüber einer unbehinderten Fahrt müsste willkürlich festgelegt werden, um die zulässige Belastung bestimmen zu können, so dass die Reisezeitverlängerung alleine keine Folgerungen auf die zulässige Belastung zulässt.
- **Überholungen**  
Es wird angenommen, dass die Anzahl der gewünschten Überholungen bei grösseren Verkehrsstärken zunimmt und die Möglichkeiten abnehmen. In Bureau of Public Roads (1950) wird angegeben, dass die zulässige Belastung einer Strasse erreicht ist, wenn nur noch 50% der gewünschten Überholungen durchgeführt werden können. Problematisch gestaltet sich die Bestimmung der gewünschten und möglichen Überholungen zur Berechnung des Verhältnisses.
- **Kolonnenbildung**  
Dietrich (1964) schlägt vor, die Kolonnenbildung als Mass der Behinderung einzuführen, wobei die Behinderung von der Kolonnengrösse, den Zeitlücken und der Geschwindigkeit der Kolonne abhängt. Die einzelnen Kolonnen werden gewichtet und den zugehörigen Verkehrsmengen gegenübergestellt. Das Kolonnengewicht ergibt sich zu

$$P_k = \frac{K^2}{V_m} \frac{9 - \Delta t}{\Delta t},$$

wobei  $P_k$  das Gewicht der Kolonne darstellt,  $K$  die Anzahl der Fahrzeuge in der Kolonne,  $V_m$  die mittlere Kolonnengeschwindigkeit und  $\Delta t$  mittlere die Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Zusätzlich wird angenommen, dass Fahrzeuge mit einem Abstand von mehr als 9 s und Fahrzeuggruppen mit einer mittleren Geschwindigkeit von mehr als 100 km/h unbehindert sind. Abbildung 7 stellt gemessene und analytische Ergebnisse gegenüber.

Abbildung 7 Grösste Kolonnenlänge für verschiedene Verkehrsstärken



Quelle: Dietrich (1964)

### 5.3 Fundamentaldiagramm-Modelle

Die Bestimmung der verkehrlichen Leistungsfähigkeit und Qualitätsstufen kann über die Fundamentaldiagramme abgeschätzt werden. Es können dazu Messwerte in ein Modell überführt werden, das den Verlauf in einer Näherung wiedergibt. Die klassische Vorstellung geht von einem durchgehenden einteiligen Modell aus. Neuere Untersuchungen schlagen hingegen ein mehrteilige Modelle vor. Exemplarisch sollen die Unterscheide zwischen dem einteiligen Modell nach van Aerde und dem zweigeteilten Schema in Transportation Research Board (2000) aufgezeigt werden.



### 5.3.1 Einteiliges Modell nach van Aerde

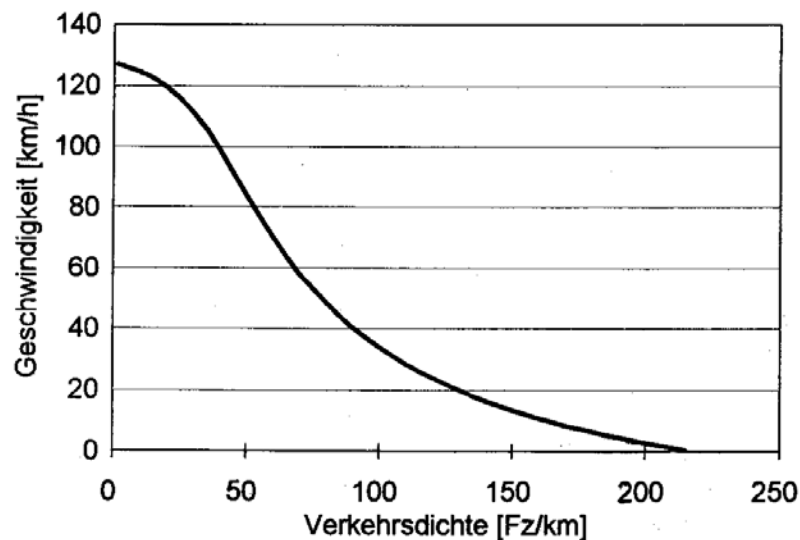
Van Aerde (1995) stellt ein Fahrzeugfolgmodell vor, bei dem der kleinste angenommene Fahrzeugabstand ( $h$ ) zwischen zwei Fahrzeugen von drei zu ermittelnden Konstanten ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ), der Geschwindigkeit im freien Verkehr ( $v_0$ ) und der Momentangeschwindigkeit ( $v$ ) abhängt. Es wird angenommen, dass sich die Verkehrsdichte ( $k$ ) bei kleineren Verkehrslücken vergrößert. Die Weglänge ergibt sich zu:

$$h = c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 v$$

und die Verkehrsdichte bei einer aktuellen mittleren Geschwindigkeit zu:

$$k(v) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 v} .$$

Abbildung 8 Einteiliges Geschwindigkeits-Dichte-Modell nach van Aerde



Quelle: Ponzlet (1996)

Der geschwungene Verlauf dieses Modells (Abbildung 8) lässt sich gut realen Messwerten anpassen, wie May und Keller (1968) und Zackor et al. (1988) gezeigt haben. In der Anwendung ergeben sich beispielsweise bei der Erstellung von q-v-Diagrammen lange Terme, wie Ponzlet (1996) feststellt:

$$v(q) = \frac{1}{2} \left( v_0 + \frac{c_1 q}{1 - c_3 q} \pm \sqrt{R} \right)$$

$$\text{mit } R = \frac{v_0^2 - 2c_1 q v_0 + 2c_1 c_3 q^2 v_0 + c_1^2 q^2 - 4c_2 q + 4c_2 c_3 q^2 - 2c_3 q v_0^2 + c_3^2 q^2 v_0^2}{(1 - c_3 q)^2} .$$

Die maximale Verkehrsstärke  $q_{\max}$  ergibt sich mit  $R=0$  zu:

$$q_{\max} = \frac{-2\sqrt{c_2} \sqrt{c_2 + c_1 v_0 + c_1 v_0 + 2c_2 + c_3 v_0^2}}{c_1^2 + 4c_2 c_3 + 2c_1 c_3 v_0 + c_3^2 v_0^2} .$$

Zur Darstellung des Verkehrsflusses mit einer durchgehenden Kurve bietet sich dieses Modell an, da sich der Verlauf über die Parameter  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  gute Anpassungen ermöglicht. Die Messdauer der beobachteten Intervalle muss bei diesem Verfahren berücksichtigt werden. Längere Intervalle (z. B. Stundenwerte) bergen die Gefahr der Vernachlässigung von Spitzenwerten, kurze Intervalle können Überschätzungen der maximalen Verkehrsstärke zur Folge haben. In Keller und Sachse (1992) wird die Verwendung von 5-Minuten-Intervallen als Kompromiss empfohlen, da so durchschnittliche Zustände noch gut wiedergegeben werden und viele Messpunkte auch mit hohen Belastungen auftreten. Um vorhandene Messdaten auf andere Intervalldauern umzurechnen, schlagen Brilon und Ponzlet (1996) folgenden Term vor:

$$\frac{q_{\text{Intervall}}}{q_{60}} = a - b q_{60} ,$$

mit  $q_{\text{Intervall}}$  Verkehrsstärke des gemessenen Intervalls,  
 $q_{60}$  Verkehrsstärke des 60-Minuten-Intervalls,  
 $a, b$  Faktoren nach Tabelle 3.

Tabelle 3 Umrechnungsfaktoren  $a, b$  zur Ermittlung eines 60-Minuten-Intervalls

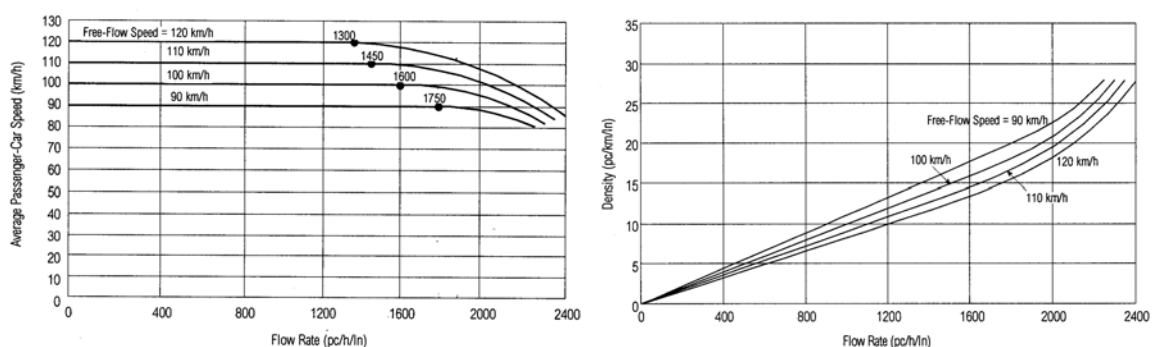
Intervalllänge	a	b	r <sup>2</sup>	Standard- abweichung
1 min	2.469	$3.45 \cdot 10^{-4}$	0.49	0.17
5 min	1.335	$4.79 \cdot 10^{-5}$	0.06	0.09
15 min	1.090	$1.41 \cdot 10^{-6}$	0.00	0.05

nach Brilon und Ponzlet (1996)

### 5.3.2 Mehrteiliges Modell

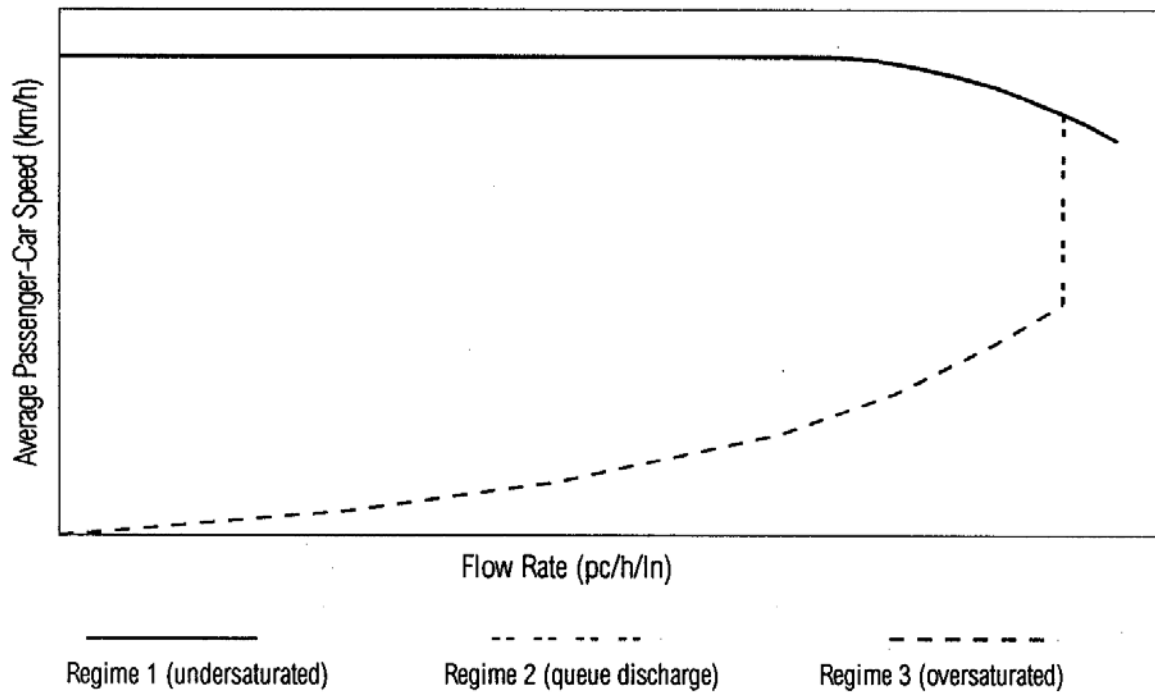
Einige neuere Analysen gehen nicht von einem Kurvenzug aus, der das Fundamentaldiagramm abbildet, sondern von einem zweigeteilten Verlauf. Messungen von Brilon und Lemke (1999) untermauern diesen Ansatz, der auch im aktuellen Highway Capacity Manual (2000) (Transportation Research Board, 2000) genutzt wird (Abbildung 9). Hier werden drei Verkehrsflusszustände definiert (siehe Abbildung 10). Der nicht gesättigte Fluss (undersaturated flow) ist durch keine Ereignisse stromabwärts oder stromaufwärts beeinflusst und liegt bei geringen Verkehrsstärken zwischen 90 und 120 km/h und bei höherem Verkehrsaufkommen zwischen 70 und 100 km/h. Eine weitere Gruppe bildet Verkehr, dessen Dichte sich nach einem Engpass bei stabilem Fluss verringert und dessen Stärke bei 2000 bis 2300 PW-Einheiten pro Stunde und Fahrbahn ab 55 km/h beträgt (queue discharge flow). Der übersättigte Verkehrsfluss (oversaturated flow) entspricht dem unteren Ast im Fundamentaldiagramm und wird i. d. R. durch einen Engpass stromabwärts erzeugt. Der Übergang vom frei fließenden Verkehr zum gestauten Verkehr erzeugt in diesem Modell eine Kapazitätsverminderung (capacity drop, Transportation Research Board, 2000). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass der frei fließende Verkehr bisher fast ausschliesslich behandelt wurde und über die Zustände des sich auflösenden Verkehrs und des stauenden Verkehrs vergleichsweise wenige Analysen vorliegen.

Abbildung 9 Fundamentaldiagramm in Transportation Research Board (2000)



Quelle: Transportation Research Board (2000)

Abbildung 10 Verlauf von stauendem Verkehr und auflösendem Verkehr



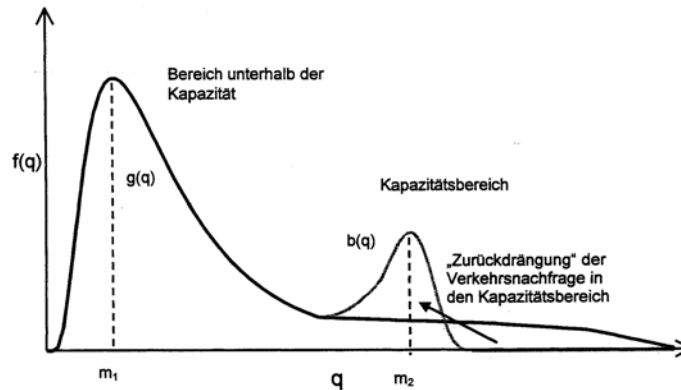
Source: Adapted from Hall et al. (2).

Quelle: Transportation Research Board (2000), nach Hall et al. (1992)

## 5.4 Stand der Forschung bei der Bestimmung von Kapazitäten

Werden Langzeitanalysen durchgeführt, ergeben sich nach Cohen (1983) zwei Maxima in der Häufigkeitsverteilung über der Verkehrsstärke (siehe Abbildung 11). Die erste Häufung bei niedriger Belastung  $q$  wird durch die Nachfrage bestimmt. Die zweite Häufung im Bereich hoher Kapazitätswerte kennzeichnet die maximal realisierbaren Verkehrsstärken. Der Mittelwert der Verteilung, die den Bereich des Maximums bei hohen Kapazitäten beschreibt, wird als Kapazitätswert der Strasse angenommen. Untersuchungen am Beispiel von Brilon (2003) können diese Theorie jedoch nicht bestätigen, da der Mittelwert der Verkehrsstärkenhäufigkeiten einer vierstreifigen Autobahn bei hoher Belastung Verkehrsstärken deutlich unter der angenommenen Kapazität liefert.

Abbildung 11 Verteilung der Verkehrsstärken nach Minderhoud et al. (1996)



Brilon (2003), nach Minderhoud et al. (1996)

Hempsey und Teply (1999) schlagen eine Methode zur Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke vor, die sich an das Konzept der 30. höchstbelasteten Stunde anlehnt. Ein Kritikpunkt an der 30. Stunde ist, dass keine Schlüsse über die Verkehrszustände und Qualitäten bei einer Überlastung getroffen werden können. Sinnvoller erscheint beispielsweise eine Aussage in der Form, dass 90% der Fahrzeuge eine Strasse oder Knoten bei einer Qualitätsstufe von mindestens B befahren können. Mit diesem Ansatz lassen sich auch Kosten-Nutzen-Analysen durchführen, da ein Anhaltspunkt über die Qualitätszustände gegeben ist.

Matt und Elefteriadou (2001) haben für den Highway 401 in Toronto Zusammenbruchwahrscheinlichkeiten ermittelt. Ein Zusammenbruch tritt per definitionem auf, wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrbahnen für fünf Minuten unter eine Grenzggeschwindigkeit fällt, die die Messintervalle bei freiem Fluss von gestautem Verkehr trennt. Hier wird verdeutlicht, dass die Kapazität eine Zufallsgrösse darstellt und nicht als ein Wert aufgefasst werden kann, bei dessen Überschreitung durch die Verkehrsstärke zwangsläufig ein Zusammenbruch folgt.

In Brilon (2003) wird eine Methode zur Bestimmung der Kapazität einer Strasse vorgeschlagen, die die Verkehrsstärken der Messintervalle unmittelbar vor einer Kapazitätsverminderung gesondert auswertet. Kennzeichnend für diese Intervalle ist eine Reduktion der mittleren Geschwindigkeit im Folgeintervall. Basierend auf der statistischen Analyse von Lebensaltdaten wird die Product-Limit-Methode angewandt, um die Zufallsgrösse der Kapazität einer Strasse zu bestimmen. Die Intervalle, bei denen der Verkehr fließend ist und deren Folgein-

tervall keinen Zusammenbruch darstellt, werden als „überlebende“ Intervalle ausgewertet. Diese Methode berücksichtigt, dass ein „capacity drop“ nicht allein von der Verkehrsstärke abhängt sondern zusätzlich von einer Zufallsgrösse beeinflusst wird. Wie bei anderen Methoden muss auch hier bei der Messung sichergestellt sein, dass die ermittelten Zusammenbrüche nicht eine Folge von Verdichtungen stromabwärts beeinflusst werden, so dass für Analysen dieser Art Engpässe ausgewählt werden.

## **6 Ausblick**

In der Praxis werden neuere Techniken zur Bestimmung des massgebenden Verkehrs und verschiedener Qualitätsabschätzungen selten angewandt. Es verfestigt sich jedoch die Ansicht, dass die Kapazität einer Strasse unter gegebenen Rahmenbedingungen nicht als ein fester Wert angesehen werden kann sondern als Zufallsgrösse. Untersuchungen belegen dies, da Verkehrszusammenbrüche nicht allein infolge einer bestimmten Verkehrsstärke entstehen. Die Verteilung der Zufallsgrösse oder ein kritischer Wert, der abhängig von der Verkehrsbelastung eine zumutbare Zusammenbruchswahrscheinlichkeit beschreibt, sollten gefunden werden. In Verbindung mit den verkehrlichen Qualitätsstufen sollten auch die wirtschaftlichen Kosten der Nutzer als auch der Betreiber berücksichtigt werden. Wichtige Aspekte sind ausserdem die Verkehrssicherheit und die Umweltverträglichkeit bzw. -kosten. Doch auch die Seite der Verkehrserzeugung und somit das Entscheidungsverhalten der Nutzer hat Einfluss auf das zeitliche und räumliche Verkehrsverhalten und die Zusammensetzung des Verkehrs.

Ziel der Forschung ist es, diese Faktoren in einem Bemessungskonzept in anwendbarer Form zu integrieren. Es müssen die Verteilungen der einzelnen Einflussgrössen berücksichtigt werden, um eine Risikoanalyse durchführen zu können, die Interaktionen von Ereignissen berücksichtigt. Eine Bemessung allein mittels durchschnittlichen Werten kann im heterogenen Verkehrsgeschehen nicht die gewünschte Genauigkeit bieten.

## 7 Literatur

- van Aerde, M. (1995) A single regime speed-flow-density relationship for freeways and arterials, Presented at the 74th TRB Annual Meeting, Washington D. C.
- Antusch, G. (1981) Beiträge zur Problematik der Bemessung von Straßen Teil I, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, **320**, Bundesministerium für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg.
- Brilon, W. und K. Lemke (1999) Straßenquerschnitte in Tunneln, Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE-Nr. 02.163/1995/FR im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Brilon, W. und M. Ponzlet (1996) Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten, *Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, **718**, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- Bureau of Public Roads (1950) *Highway Capacity Manual (1950)*, United States Government Printing Office, Washington.
- Cohen , S. (1983) Méthodes d'estimation de la capacité des autoroutes, *rapport de recherche* **62**, INRETS, Arcueil.
- Dietrich, K. (1964) Zulässige Belastung, Forschungsauftrag: Massgebender Verkehr und zulässige Belastung, 1. Teilbericht, Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung, ETH, Zürich.
- Hall, F. L., V. F. Hurdle und J. H. Banks (1992) Synthesis of recent work on the nature of speed-flow and flow-occupancy (or density) relationships on freeways, *Transportation Research Record*, **1365**, 12-18.
- Hempsey, L. J. und S. Teply (1999) Redesigning the design hour for Alberta highways, *ITE Journal*, **69** (5) 43-48.
- Highway Research Board (1965) *Highway Capacity Manual (1965)*, *Special Report*, **87**, HRB, Washington D. C.
- Keller, H. und T. Sachse (1992) Einfluß des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, **614**, BMV, Bonn.
- Matt, R. L. und L. Elefteriadou (2001) Defining freeway capacity as function of breakdown probability, *Transportation Research Record*, **1776**, 43-51.
- May, A. D. und H. Keller (1968) Evaluation of single- and two-regime traffic flow models. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley.

- Minderhoud, M. M., H. Botma und P. H. L. Bovy (1996) An assessment of roadway capacity estimation methods, Delft University of Technology, Delft.
- Ponzlet, M. (1996) Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflußmodellen, *Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen*, **16**, Ruhr-Universität, Bochum.
- Transportation Research Board (2000) *Highway Capacity Manual (2000)*, National Research Council, Washington D. C.
- Zackor, H., R. Kühne und W. Balz (1988) Untersuchungen des Verkehrsablaufes im Bereich der Leistungsfähigkeit und bei instabilem Fluß, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, **524**, BMV, Bonn.