

Verkehrszählungen an Straßenknoten

Von Johannes Schlums, Hannover

Straßennetze sollen so gestaltet werden, daß sich der Verkehr auf ihnen mit einem Höchstmaß an Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit abspielt [1, 2]. Beim Entwurf von Straßennetzen ist von den örtlichen Gegebenheiten, also den geographischen Bedingungen und der Siedlungsstruktur, auszugehen. Ideale Netzgestalten lassen sich am besten dann finden, wenn ein in sich geschlossenes, vollkommen neues Netz entworfen werden soll. In der Regel wird man es jedoch in den dicht besiedelten Ländern nur mit Verbesserungen bereits vorhandener Netze zu tun haben. In Deutschland sind derartige Probleme z. B. in zerstörten Städten zu lösen. Dort, wo die ursprüngliche Bebauung im Kriege vernichtet worden ist, sollte die Gelegenheit benutzt werden, bestehende Netzformen zu überprüfen und erforderlichenfalls zu verbessern.

Die Leistungsfähigkeit eines Straßennetzes wird, vor allem bei voller Auslastung und bei verhältnismäßig engen Maschen des Netzes, bei richtig bemessenen Fahrbahnbreiten der freien Strecken durch die Leistungsfähigkeit der Knoten bestimmt. Zur Ermittlung des Verkehrsablaufes an vorhandenen Straßenknoten müssen Verkehrszählungen durchgeführt werden. Durch sinngemäße Umlegung von derartig ermittelten Verkehrsströmen kann dann auf den zu erwartenden Verkehrsablauf an geänderten Straßenknoten geschlossen werden.

Zur Beschreibung des Verkehrs auf Straßennetzen führt man Verkehrserhebungen verschiedener Art durch [3]. Will man nur die Belastung der einzelnen Straßenschnittschnitte und Straßenzüge bestimmen, so genügt es, sogen. Querschnittszählungen anzusetzen. Hierbei stellen die Zähler fest, wieviel Fahrzeuge, unterteilt nach Art und Richtung, bestimmte Querschnitte in einer besonders festzulegenden Zeit durchfahren. Auf den Landstraßen ist es üblich, die Anzahl von Fahrzeugen zu ermitteln, die auf einer Straße während 24 Stunden im Durchschnitt eines Zähljahres verkehren. In den Städten werden Belastungswerte ermittelt, die sich auf 1 Stunde beziehen. Hier interessieren die stündlichen Schwankungen und in der Regel die stündlichen Höchstwerte der Verkehrsbelastung. Diese Zählungen sind verhältnismäßig einfach. Die Ergebnisse bekommt man durch einfaches Addieren der Ergebnisse in den Zähllisten. Kontinuierliche Werte über längere Zeiten hinweg erhält man durch Einsatz geeigneter Zählgeräte [4].

Zur Beurteilung des Verkehrsablaufes an Knoten genügen die Ergebnisse von Querschnittszählungen nicht. An den Straßenknoten möchte man die anteiligen Verkehrsströme des Geradeaus-, des Rechtsabbiege- und des Linksabbiegeverkehrs von jedem einmündenden Gesamtverkehrsstrom kennen.

Handelt es sich um in der baulichen Anlage einfache und übersichtbare Knoten, so können diese Verkehrsströme nach Art der Querschnittszählungen ermittelt werden. Bei nicht zu starker Verkehrsdichte kann ein Zähler, der den Verkehr auf einer der in den Knoten einmündenden Straße erfaßt, die anteiligen Ströme ermitteln. Bei größerer Verkehrsdichte müssen mehrere Zähler zur Ermittlung der Teilströme eingesetzt werden.

Ist der Bereich des Knotens größer und nicht mehr übersehbar, so müssen sogenannte Stromzählungen durchgeführt werden, bei denen die einzelnen Fahrzeuge von der Einfahrt in den Knoten bis zu ihrer Ausfahrt verfolgt werden. Hierzu bestehen verschiedene Möglichkeiten. Man kann z. B. die polizeilichen Kennzeichen der Kraftfahrzeuge bei der Ein- und Ausfahrt vermerken. Die Auswertung ist bei dieser Methode langwieriger. Fernerhin ist es möglich, den in den Knoten einfahrenden Fahrzeugen Zettel mit den Nummern der Einfahrtstellen auszuhändigen und diese bei der Ausfahrt aus dem Knoten wieder abzunehmen. Hierzu müssen die Fahrzeuge die Geschwindigkeit herabsetzen. Dadurch kann sich ein Verkehrstau einstellen. Die Auswertung ist hier einfacher als beim Aufschreiben der Kennzeichen.

Will man darüber hinaus auch noch die Bewegungsvorgänge der einzelnen Fahrzeuge und von Fahrzeuggruppen bestimmen, so muß man fahrdynamische Untersuchungen durchführen. Die genauen Bewegungsvorgänge, vor allem die Anfahrbeschleunigungen der verschiedenen Verkehrsmittel, benötigt man zum Beispiel zur Bemessung der Grünzeiten an lichtgeregelten Straßenkreuzungen. Zur Bestimmung dieser Bewegungsvorgänge müssen besondere Geräte wie Time-recorder, Störmeßgeräte oder Spezialfilmgeräte verwendet werden [5]. Die Auswertung dieser Messungen erfordert einen erheblichen Arbeitsaufwand.

In dieser Studie soll untersucht werden, welche Beziehungen zwischen den Querschnittbelastungen auf den in den Knoten einmündenden Straßen und den Verkehrsströmen im Knoten bestehen. Weiterhin soll geprüft werden, ob und unter welchen Voraussetzungen es etwa möglich ist, aus diesen Querschnittbelastungen außerhalb des Knotens die Stärke der Verkehrsströme im Knoten zu berechnen. Sollte dies möglich sein, so könnte man mit verhältnismäßig einfachen Erhebungen auskommen. Man hätte dann vor allem die Möglichkeit, auch bei reinen Querschnittzählungen, etwa auf dem Landstraßennetz, die Zähler so aufzustellen, daß an den Knoten auch die Verkehrsströme berechnet werden können. Es wird hier also ähnlich vorgegangen wie bei der Untersuchung von Fachwerken durch den Statiker. Auch dieser hat es mit einem Netz, dem Fachwerk, zu tun. Die Stabkräfte werden aus Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte an den einzelnen Fachwerkknoten hergeleitet.

Bezeichnet man mit n die Anzahl der in einen Knoten einmündenden Straßen, so erhält man in Tabelle 1 in Spalte 2 die Zahl der einfachen Verkehrsbeziehungen

Tabelle 1. Verkehrsbeziehungen am n -Knoten.

Zahl der Straßen am Knoten n	Zahl der einfachen Verkehrsbeziehungen $\frac{1}{2}(n^2 - n)$	Zahl der Verkehrsströme $n^2 - n$	Zahl der Querschnittbelastungen außerhalb des Knotens		Zahl der im Knoten zu erfassenden Teilverkehrsströme $n^2 - 3n + 1$
			Insgesamt $2n$	für die Berechnung nutzbar $2n - 1$	
1	2	3	4	5	6
3	3	6	6	5	1
4	6	12	8	7	5
5	10	20	10	9	11

gen, d. h. ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtung, zwischen den n Straßen. Bei Berücksichtigung der Fahrtrichtung erhält man doppelt so viel Verkehrsbeziehungen, die möglichen Verkehrsströme (Spalte 3). Diesen Werten ist in Spalte 4 die Zahl der Querschnittbelastungen unter Berücksichtigung der Fahrtrichtungen gegenübergestellt, die außerhalb des Knotens auf den einmündenden Straßen bestimmt werden. Von der in Spalte 4 angegebenen Zahl liefert jeweils 1 Wert die Kontrolle dafür, daß der in den Knoten einströmende Verkehr ebenso groß ist wie der ausströmende, wie sich leicht zeigen läßt. Für die Berechnung der Fahrströme im Knoten stehen also nur die um 1 verminderten in Spalte 4 angegebenen Werte zur Verfügung. Diese Zahl ist in Spalte 5 angegeben.

Vergleicht man nun die entsprechenden Werte der Spalte 3 mit den Werten der Spalte 5, so sieht man, daß letztere stets kleiner sind und daß mit wachsender Straßenzahl n der Unterschied immer größer wird. Um die gestellte Aufgabe, die Verkehrsströme aus den Querschnittbelastungen der einmündenden Straßen zu berechnen, lösen zu können, müssen also zusätzlich Teilströme im Innern des Knotens durch Zählung erfaßt werden, deren erforderliche Zahl in Spalte 6 angegeben ist. Der Vergleich der entsprechenden Zahlen der Spalten 5 und 6 zeigt, daß bei $n = 5$ Straßen am Knoten zu 9 Querschnittbelastungen (Spalte 5) noch 11 Teilströme im Knoten (Spalte 6) selbst erfaßt werden müssen, um die 20 Fahrströme (Spalte 3) bestimmen zu können. Praktisch wird man also diese Methode nur auf Knoten mit $n = 3$ oder $n = 4$ mündenden Straßen anwenden. Fehlen einzelne Teilströme auf Grund der Netzform und Bevölkerungs- sowie Fahrzeugverteilung, so verringert sich die Zahl der erforderlichen Werte.

Bei der Auswahl der im Knoten durch Querschnittzählung zu bestimmenden Teilströme muß man darauf achten, daß die damit gewonnenen Gleichungen unabhängig von den bereits vorhandenen sind. Da es sich hier immer um Teilströme und Summen davon und damit um ein System linearer Gleichungen handelt, kann man diese Unabhängigkeit nachprüfen. Das Gleichungssystem ist in Determinantenform zu schreiben. Der Zahlwert der Nennerdeterminante muß von Null verschieden sein ($D \neq 0$).

Im folgenden werden für 4 Fälle beispielhaft diese Beziehungen dargestellt und die Formeln entwickelt.

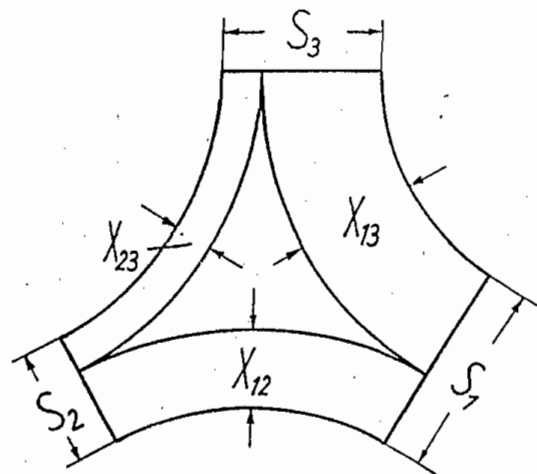
1. Dreiknoten ($n = 3$), einfache Verkehrsbeziehungen, d. h. ohne Berücksichtigung von Richtung und Gegenrichtung (Vergleiche Abb. 1).

Ermittelt werden durch Zählung die Querschnittbelastungen S_1 , S_2 und S_3 (ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtungen) außerhalb des Knotens.

Berechnet werden die Verkehrsbeziehungen X_{12} , X_{13} und X_{23} .

Für die Berechnung der 3 unbekanntenen Werte X stehen die 3 Querschnittbelastungen S zur Verfügung.

Abb. 1



$$X_{12} = \frac{1}{2} (S_1 + S_2 - S_3)$$

$$X_{13} = \frac{1}{2} (S_1 + S_3 - S_2)$$

$$X_{23} = \frac{1}{2} (S_2 + S_3 - S_1)$$

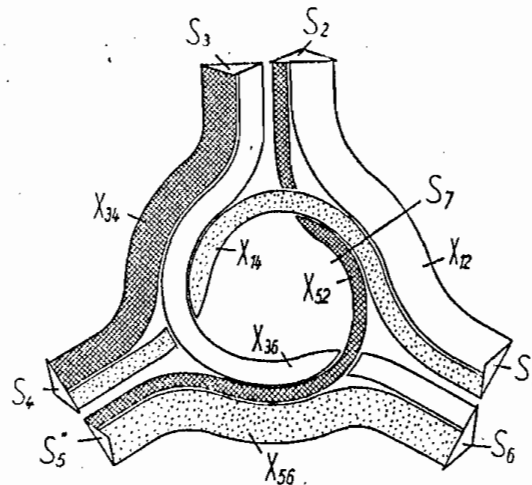
Sonderfall: Ein X -Wert wird Null, z. B. $X_{12} = 0$ und damit $S_1 + S_2 = S_3$.
In Worten bedeutet das:

Ist die Summe der Querschnittbelastungen an 2 Stellen S_1 und S_2 zusammen so groß wie die Querschnittbelastung S_3 , so besteht zwischen den Punkten 1 und 2 kein Verkehr. Dasselbe gilt für die anderen Richtungen bei sinngemäßer Vertauschung der Indices.

2. Dreiknoten ($n = 3$) mit Berücksichtigung der Richtungen, d. h. Ermittlung der Verkehrsströme.

Konstruktiv wird hier einmal die Form des Kreisverkehrs gewählt. Dabei wird angenommen, daß Fahrten um den vollen Kreis und damit die Rückkehr in die Ausgangsrichtung nicht stattfinden (Vgl. Abb. 2).

Abb. 2



Ermittelt werden durch Zählung die Querschnittbelastungen S_1 bis S_6 außerhalb des Knotens und S_7 im Kreis selbst. (Wird auch S_6 bestimmt, so liefert dieser Wert eine Kontrolle dafür, daß der insgesamt in den Knoten einströmende Verkehr so groß ist wie der insgesamt ausströmende Verkehr. Für die Ermittlung der Werte X_{pm} ist S_6 nicht erforderlich. Man kann also mit 6 Zählern, die richtig aufgestellt werden, die Querschnittbelastungen und alle Verkehrsströme berechnen).

Berechnet werden alle Verkehrsströme X_{pm} . Dabei bezeichnet der erste Index p den Punkt der Einfahrt, der zweite Index m den Punkt der Ausfahrt.

Zur Kontrolle der Unabhängigkeit der Gleichungen werden diese zunächst aufgestellt. Nach Abb. 2 ist:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= + X_{12} + X_{14} \\
 S_2 &= + X_{12} \quad + X_{52} \\
 S_3 &= \quad \quad \quad + X_{34} + X_{36} \\
 S_4 &= \quad \quad X_{14} \quad + X_{34} \\
 S_5 &= \quad \quad \quad + X_{52} \quad \quad \quad + X_{56} \\
 S_7 &= + X_{12} + X_{14} + X_{52}
 \end{aligned}$$

Der Zahlwert der Determinante aus den Koeffizienten vorstehender X -Werte ergibt sich zu (-1) , ist also von Null verschieden. Die Unabhängigkeit der Gleichungen ist damit vorhanden:

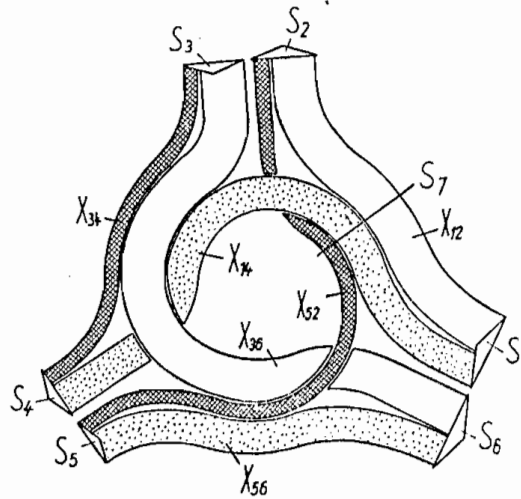
$$D = \begin{vmatrix} 110\ 000 \\ 101\ 000 \\ 000\ 110 \\ 010\ 100 \\ 001\ 001 \\ 111\ 000 \end{vmatrix} = -1 \neq 0$$

Die Teilverkehrsströme X_{pm} ergeben sich aus den Querschnittbelastungen nach den folgenden Formeln:

$$\begin{aligned}
 X_{12} &= S_1 + S_2 - S_7 \\
 X_{14} &= S_7 - S_2 \\
 X_{34} &= S_2 + S_4 - S_7 \\
 X_{36} &= S_3 + S_7 - S_2 - S_4 \\
 X_{52} &= S_7 - S_1 \\
 X_{56} &= S_1 + S_5 - S_7
 \end{aligned}$$

Sonderfall: Die Verkehrsbelastung ist für jede Verkehrsbeziehung für Richtung und Gegenrichtung gleich groß. Das kann zum Beispiel bei dem Bilden des Mittelwertes der Verkehrsbelastung über ein Zähljahr hinweg bei Zählungen auf dem Landstraßennetz angenommen werden.

Abb. 3

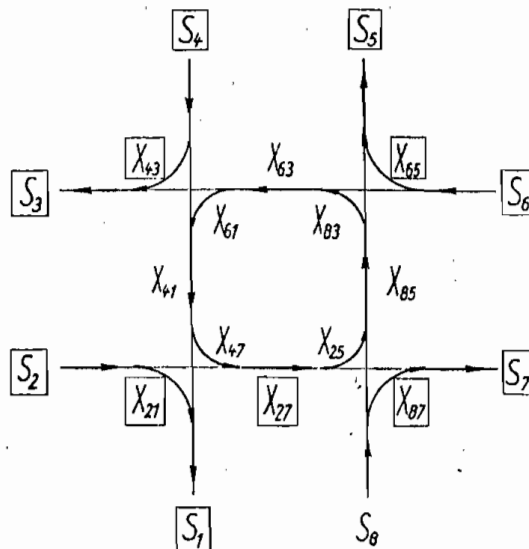


Dann ist $X_{12} = X_{36}$; $X_{14} = X_{56}$ und $X_{34} = X_{52}$.

Es ist nur noch die Größe von 3 Verkehrsströmen zu berechnen. Nach Abbildung 3 ist dann aber auch $S_1 = S_6$; $S_2 = S_3$ und $S_4 = S_5$. Dadurch wird dieses Beispiel hinsichtlich der mathematischen Behandlung auf das Beispiel 1 Dreiknoten (ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtung) zurückgeführt. Es genügen 3 Querschnittszählungen außerhalb des Knotens zur Berechnung der Stärke der Verkehrsströme.

3. Vierknoten ($n = 4$) als Straßenkreuzung (vgl. Abb. 4). Nach Tabelle 1 sind hier 12 Teilverkehrsströme zu ermitteln. Auf den einmündenden Straßen können 8 Querschnittbelastungen durch Zählung bestimmt werden. Ein Wert davon dient der Rechenkontrolle, daß einstrahlender Verkehr gleich ausstrahlendem Verkehr ist. Es müssen also 5 Ströme im Bereich der Kreuzung zusätzlich durch Zählungen erfaßt werden. Zum Beispiel sollen die 4 nach rechts abbiegenden Teilströme X_{21} , X_{43} , X_{65} und X_{87} sowie der Geradeausstrom X_{27} durch Zählung ermittelt werden.

Abb. 4



Mit den Bezeichnungen der Abb. 4 ergeben sich dann die 7 unbekanntenen Ströme nach folgenden Formeln. Die durch Zählung ermittelten Werte sind in Abb. 4 eingerahmt. Jede folgende Formel benutzt vorher gewonnene Werte:

$$X_{25} = \boxed{S_2} - \boxed{X_{27}} - \boxed{X_{21}}$$

$$X_{85} = \boxed{S_5} - \boxed{X_{65}} - X_{25}$$

$$X_{47} = \boxed{S_7} - \boxed{X_{27}} - \boxed{X_{87}}$$

$$X_{41} = \boxed{S_4} - \boxed{X_{43}} - X_{47}$$

$$X_{61} = \boxed{S_1} - \boxed{X_{21}} - X_{41}$$

$$X_{63} = \boxed{S_6} - \boxed{X_{65}} - X_{61}$$

$$X_{83} = \boxed{S_3} - \boxed{X_{43}} - X_{63}$$

Sonderfall: Die Verkehrsbelastung ist für jede Verkehrsbeziehung für Richtung und Gegenrichtung gleich groß.

$$\text{Es ist also: } X_{21} = X_{83}; X_{25} = X_{43}; X_{27} = X_{63};$$

$$X_{41} = X_{85}; X_{47} = X_{65}; X_{61} = X_{87}.$$

Damit ist nur noch die Größe von 6 Verkehrsströmen zu berechnen.

Unter vorstehender Voraussetzung ist auch

$$S_1 = S_8; S_2 = S_3; S_4 = S_5 \text{ und } S_6 = S_7.$$

Zur Berechnung der Verkehrsströme können die Querschnittbelastungen außerhalb des Knotens S_1, S_3, S_5 und S_7 sowie

2 Teilströme im Innern des Knotens, etwa die 2 nach rechts abbiegenden Ströme X_{21} und X_{25} verwendet werden.

Besonders muß aber noch darauf hingewiesen werden, daß auch die Art der konstruktiven Ausbildung des Knotens von Einfluß auf die zweckmäßige Gestaltung der Verkehrserhebung sein kann. Bei der Kleeblattlösung werden zum Beispiel die nach links und rechts abbiegenden Teilverkehrsströme streckenweise auf besonderen Fahrbahnen geführt (vgl. Abb. 5). Hier ist es daher zweckmäßig, die Teilströme durch Querschnittzählungen innerhalb des Kreuzungsbauwerks festzustellen und dann durch Addition zusammengehörender Werte die gesamte Querschnittbelastung auf den in den Knoten einmündenden

Abb. 6a

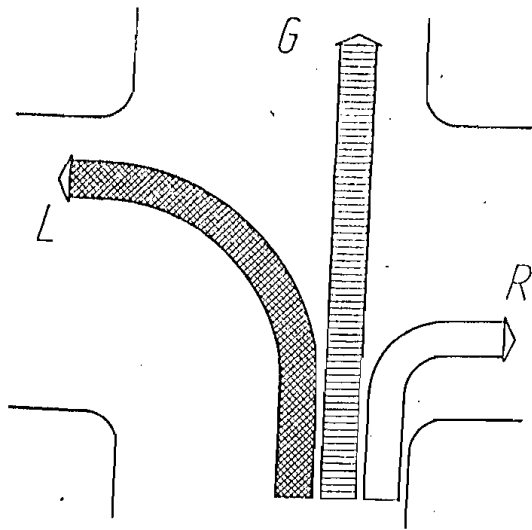
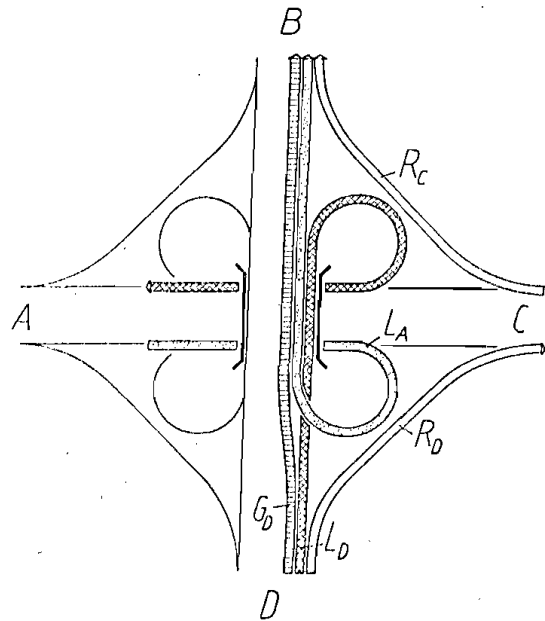


Abb. 6b



Die verschiedenen konstruktiven Lösungen wie Kreuzung, Kreisplatz, Kleeblatt, Verteilerring, Turbine und Linienlösung weisen infolge ihrer unterschiedlichen topologischen Gestalt eine verschiedene Folge von Trennungen, Mündungen und Ueberwerfungen auf. Eine systematische Untersuchung nach diesen topologischen Gesichtspunkten wird zu einer Ordnung und Bewertung der verschiedenen konstruktiven Lösungen und zur Feststellung der Zahl und Art der theoretisch überhaupt möglichen Lösungen für die Knoten führen. Im Eisenbahnwesen konnten die verschiedenen Gleispläne der Bahnhöfe nach dieser Methode schon systematisch geordnet und untersucht werden [6].

Für jede spezielle topologische Form eines Straßenknotens wird sich nach der aufgezeigten Methode eine zweckmäßige Art der Verkehrserhebung zur Bestimmung der Verkehrsströme ermitteln lassen.

Diese topologische Untersuchung der Straßenknoten wird zur Zeit weitergeführt.

Zusammenfassung.

Hinsichtlich der Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Straßennetze kommt den Straßenknoten eine besondere Bedeutung zu. Zur Beurteilung und Bewertung der Straßenknoten wird es erforderlich, Verkehrserhebungen verschiedener Art durchzuführen: Querschnittszählungen, Stromzählungen und fahrdynamische Verkehrserhebungen. In der aufgeführten Reihenfolge werden bei jeder folgenden Zählart umfangreichere Erkenntnisse gewonnen. Aber auch der Arbeitsaufwand bei der Durchführung der Verkehrszählung und bei der Auswertung nimmt in gleichem Sinne zu.

Ziel dieser Untersuchung war es, zu prüfen, ob durch geschickte Anordnung der Zählposten für Querschnittszählungen an Straßenknoten aus den Querschnittsbelastungen außerhalb des Knotens die Stärke der Verkehrsströme im Knoten berechnet werden kann. Zu diesem Zwecke wurde für Knoten mit n einmündenden Straßen die Zahl der Teilverkehrsströme im Knoten der Zahl der außerhalb des Knotens gewonnenen Querschnittsbelastungen gegenübergestellt. Folgende Ergebnisse wurden gewonnen:

1. Beim Dreiknoten ($n = 3$) ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtung läßt sich die Stärke der Verkehrsbeziehungen zwischen den 3 Richtungen aus den Querschnittbelastungen berechnen.
2. Beim Dreiknoten ($n = 3$) mit Berücksichtigung der Fahrtrichtung dient eine Querschnittbelastung außerhalb des Knotens der Kontrolle, daß der insgesamt in den Knoten einströmende Verkehr ebenso groß wie der insgesamt ausströmende Verkehr ist. Daher muß zusätzlich die Stärke eines Teilverkehrsstromes im Innern des Knotens durch Zählung bestimmt werden.
3. Sobald im Innern des Knotens zusätzlich Teilverkehrsströme erfaßt werden müssen, ist darauf zu achten, daß die Wahl richtig getroffen wird, nämlich dadurch neue unabhängige Gleichungen gewonnen werden. Da es sich hier um ein System linearer Gleichungen handelt, muß die Nennerdeterminante dieses Gleichungssystems von Null verschieden sein. Dieses Kriterium wird also für die richtige Anordnung der Zählstellen verwendet.
4. Beim Viererknoten ($n = 4$) stehen 12 unbekanntem Teilströmen 7 für die Berechnung verwendbare Querschnittbelastungen außerhalb des Knotens zur Verfügung, so daß die Stärke von 5 Teilströmen im Knoten durch Zählung festgestellt werden muß.
5. Die Rechnung vereinfacht sich, wenn im n -Knoten im Einzelfall für einzelne Verkehrsbeziehungen kein Verkehr vorhanden ist oder wenn — etwa als Durchschnittswerte über längere Zeiten hinweg — für einen Teil der Verkehrsströme oder für alle Verkehrsströme im Knoten für Richtung und Gegenrichtung der Verkehr gleich stark ist oder mit genügender Genauigkeit angenommen werden kann. In diesen Fällen kann auch bei Knoten mit mehr als 4 Straßen ($n > 4$) die Berechnung der Verkehrsströme aus den Querschnittbelastungen außerhalb des Knotens möglich und zweckmäßig sein.
6. Die Art der Verkehrszählung ist abhängig von der topologischen Gestalt der Kreuzung. Sind zum Beispiel besondere Fahrbahnen für die Teilverkehrsströme vorhanden, so empfiehlt es sich, diese durch Querschnittzählungen zu erfassen und die Gesamtquerschnittbelastungen außerhalb des Knotens durch Addition entsprechender Teilströme zu berechnen.
7. Werden reine Querschnittzählungen durchgeführt, so können bei richtiger Anordnung der Zählstellen und zusätzlicher Erfassung gewisser Teilströme alle Teilströme innerhalb der Knoten berechnet werden.
8. Ziel der weiteren Arbeit ist, durch topologische Betrachtungen systematisch alle Formen von Straßenknoten zu ordnen und zu bewerten und für jede Form die Mindestzahl der einzusetzenden Zählposten und die hierfür notwendige Lage der Zählstellen zu ermitteln.

Literatur

- [1] Peter Friedrich, Grundzüge einer Verkehrsnetzgestaltung vom Gesichtspunkt der geringsten Aufwendungen, Bauplanung und Bautechnik, 1947, S. 143.
- [2] Rudolf Hoffmann, Die Gestaltung der Verkehrswegenetze. Ein Beitrag zur Darstellung der theoretischen Grundlagen und der praktischen Gesichtspunkte für ihre Planung und Entwicklung. Dissertation Stuttgart 1949.
- [3] Richtlinien für Stadtstraßen-Verkehrszählungen. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V. 1953.
- [4] Johannes Schlums und Fritz Pampel, Deutsche Straßenverkehrszählgeräte. Straße und Autobahn 1953, S. 317.
- [5] Johannes Schlums, Verkehrserhebungen, eine wichtige Grundlage städtebaulicher Planungen, Straße und Autobahn 1953, S. 37.
- [6] Wilhelm Müller, Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik, Erster Band, Springer-Verlag 1950, S. 99, Grundriß der Bahnhofstopologie.