

(19)



(11)

**EP 1 749 288 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
**27.02.2008 Patentblatt 2008/09**

(51) Int Cl.:  
**G08G 1/01 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **06763261.2**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2006/062571**

(22) Anmeldetag: **24.05.2006**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2006/128819 (07.12.2006 Gazette 2006/49)**

(54) **VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG VON ABBIEGERATEN IN EINEM STRAßENNETZ**

METHOD FOR DETERMINATION OF TURNING RATES IN A TRAFFIC NETWORK

PROCEDE POUR DETERMINER DES TAUX DE CHANGEMENT DE DIRECTION DANS UN RESEAU  
ROUTIER

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR  
HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI  
SK TR**

(73) Patentinhaber: **SIEMENS  
AKTIENGESELLSCHAFT  
80333 München (DE)**

(30) Priorität: **31.05.2005 DE 102005024953**

(72) Erfinder: **MÜCK, Jürgen  
81539 München (DE)**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**07.02.2007 Patentblatt 2007/06**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 0 293 724 EP-A- 0 889 454  
DE-A1- 10 136 646**

**EP 1 749 288 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von Abbiegeraten in einem Straßennetz gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie Anwendungen dessen in verschiedenen straßenverkehrstechnischen Verfahren.

**[0002]** Eine Basisaufgabe von Verkehrssteuerungssystemen in Städten ist die Online-Ermittlung der Verkehrslage im Straßennetz, um über die Verkehrssituation zu informieren und die angeschlossenen Subsysteme optimal zu steuern. Hierbei kommen Systeme zur großflächigen Bestimmung der Verkehrslage, aber auch zur genauen Ermittlung des Verkehrszustandes in Teilnetzen und zur Optimierung zugeordneter Lichtsignalanlagen zum Einsatz. Eine wesentliche Aufgabe dieser Verfahren ist die Bestimmung der Verkehrsströme im Straßennetz, wobei die Ermittlung der Abbiegeströme an Knotenpunkten eine zentrale algorithmische Fragestellung ist.

**[0003]** Aus der Dissertation "Ein Verfahren zur gekoppelten Schätzung von Kantenbelastungen, Abbiegequoten und Störungen in Stadtstraßennetzen", veröffentlicht in der Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Heft 20, Mai 2001, ist ein Verfahren der eingangs genannten Art bekannt. Der Schätzer wird im Zeittakt von zwei Sekunden mit sämtlichen gemessenen knotenzu- und -wegfließenden Verkehrsstärken versorgt. Zur Abbiegequotenschätzung kommt eine rein dynamische Methode zum Einsatz, die auch der Klasse der rekursiven Verfahren zuzurechnen ist. Durch eine zeitlich hoch aufgelöste Berechnungsweise ergibt sich die Unterteilung in phasengruppenorientierte Subsysteme automatisch. Bei der Berechnung der Abbiegequoten werden die Veränderungen der Ströme von Aus- und Einfahrt in einem Zeitintervall  $k$  gegenüber dem vorangehenden Zeitintervall  $k-1$  berücksichtigt. Dieses bekannte Verfahren zeichnet sich durch hohe Anforderungen an die Datenbereitstellung - etwa eine Aggregation von Messdaten in Intervallen von zwei bis drei Sekunden - und eine aufwendige Netzmodellierung aus. Teilweise werden auch ganz spezielle Positionen für die Messquerschnitte benötigt. Bei der als Grundlage für das Schätzverfahren herangezogenen Modellgleichung für die Verkehrsstärken wird als Zeitbezug entweder das gleiche Messintervall für die linke und rechte Seite verwendet oder die Ausfahrt-Verkehrsstärke zum Messintervall  $k$  aus den Zufahrt-Verkehrsstärken des vorangegangenen Messintervalls  $k-1$  berechnet. Dieses Verfahren leidet unter dem Nachteil, dass das Schätzergebnis stark von den Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten des betrachteten Teilnetzes abhängt.

**[0004]** Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art bereitzustellen, welches robust hinsichtlich der Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten ist und trotzdem schnell und genau arbeitet.

**[0005]** Die Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein gattungsgemäßes Verfahren, bei dem in der gewichteten Summe für die Ausfahrt-Verkehrsstärke eines gegebenen Messintervalls die Zufahrt-Verkehrsstärken einer Mehrzahl vorangehender Messintervalle berücksichtigt werden, wobei sich eine zu ermittelnde vorwärts-bezogene Abbiegerate als Summe aus den entsprechenden Abbiegeraten der in der Modellgleichung berücksichtigten Messintervalle ergibt. Durch den verallgemeinerten Zeitbezug für die Modellgleichung hat sich gezeigt, dass das erfindungsgemäße Verfahren zur Ermittlung der Abbiegeraten robust hinsichtlich der Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten und damit robust hinsichtlich der Größe der betrachteten Teilnetze ist. Es ist schnell und weist eine bisher in der Praxis nicht bekannte Genauigkeit auf. Schließlich erfordert das erfindungsgemäße Verfahren im Gegensatz zu bisher eingesetzten Verfahren keine Kalibrierung.

**[0006]** In einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für wenigstens ein rückwärts-bezogenes Teilnetz des Straßennetzes, bei welchen Messquerschnitte an einer Zufahrt und an Ausfahrten des Teilnetzes berücksichtigt werden, eine Modellgleichung aufgestellt, in der die Zufahrt-Verkehrsstärke als gewichtete Summe der Ausfahrt-Verkehrsstärken angesetzt wird und die Gewichtungsfaktoren den rückwärts-bezogenen Abbiegeraten entsprechen, welche jeweils den Anteil einer Ausfahrt-Verkehrsstärke angeben, der durch die berücksichtigte Zufahrt eingeflossen ist, wobei ausgehend von der Modellgleichung mittels eines mathematischen Schätzverfahrens die Abbiegeraten berechnet werden, wobei in der gewichteten Summe für die Zufahrtverkehrsstärke eines gegebenen Messintervalls die Ausfahrtverkehrsstärken einer Mehrzahl nachfolgender Messintervalle berücksichtigt werden, und wobei sich eine zu ermittelnde rückwärts-bezogene Abbiegerate als Summe aus den entsprechenden Abbiegeraten der in der Modellgleichung berücksichtigten Messintervalle ergibt. Durch die Schätzung sowohl zeitlich vorwärts- als auch rückwärtsbezogener Abbiegeraten gewinnt das erfindungsgemäße Verfahren noch weiter an Robustheit und Genauigkeit.

**[0007]** Vorzugsweise wird bei dem mathematischen Schätzverfahren ein erweitertes, insbesondere nichtlineares Kalman-Filter angewandt, da es sich um ein stochastisches System mit Rauscheffekten handelt. Die stochastischen Parameter des erweiterten Kalman-Filters können aus den statistischen Analysen der Daten vorab abgeschätzt werden. Gleichzeitig ist das Filter robust hinsichtlich der Parametrierung und benötigt nur die aktuellen Messwerte. Das nichtlineare Kalman-Filter ist erheblich genauer, benötigt weniger Rechenzeit und weniger Datenreihen als Korrelationsanalysen. Daneben erfordert das vorgeschlagene Filter einen geringeren Kalibrierungsaufwand als heuristische Methoden des Operations Research.

**[0008]** In einer besonderen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird das Schätzverfahren unterbrochen, wenn an einem Messquerschnitt eine Verkehrsüberlastung erfasst wird. Dies sichert die Beibehaltung der vor Auftreten der Überlastung geschätzten Abbiegeraten, so dass Fehleinschätzungen aufgrund der aufgestauten Fahr-

zeuge verhindert werden. Diese stellen nämlich einen Puffer dar, der die Korrelation zwischen zu- und abfließenden Verkehrsströmen zerstört.

**[0009]** In einer bevorzugten Anwendung der Erfindung für ein Verfahren zur Ermittlung von Abbiegeraten an einem Knotenpunkt des Straßennetzes werden vorwärts-bezogene und/oder rückwärts-bezogene Teilnetze um den Knotenpunkt betrachtet, bei welchen Messquerschnitte in den Zufahrten und Ausfahrten des Knotenpunktes berücksichtigt werden, wobei die Abbiegeraten nach oben beschriebenem Verfahren ermittelt werden. Durch eine geeignete Wahl der Teilnetze um eine - gegebenenfalls Lichtsignal-gesteuerte - Kreuzung lassen sich die Abbiegequoten mit Vorteil schätzen.

**[0010]** In einer weiteren Anwendung der Erfindung bei einem Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Verkehrsströmen eines Teilnetzes werden für die Zufahrten und Ausfahrten des Teilnetzes die Abbiegeraten gemäß oben genanntem Verfahren ermittelt, wobei Messquerschnitte nur am Rand des Teilnetzes aber nicht in seinem Inneren berücksichtigt werden, so dass aus den ermittelten Abbiegeraten und den erfassten Verkehrsstärken die Quelle-Ziel-Verkehrsströme für dieses Teilnetz berechnet werden. Dabei wird sichergestellt, dass zu je einem Ausfahrt-Messquerschnitt alle relevanten Zufahrt-Messquerschnitte in die Modellgleichung einbezogen werden; analog sind bei einem rückwärts-bezogenen Teilnetz zu einem Zufahrt-Messquerschnitt alle relevanten Ausfahrt-Messquerschnitte einzubeziehen. Auf diese Weise kann in Teilnetzen begrenzter Größe eine direkte dynamische Schätzung von Herkunfts-Ziel-Strömen durchgeführt werden.

**[0011]** Vorzugsweise wird die Anzahl der berücksichtigten Messintervalle mit zunehmender Größe des betrachteten Teilnetzes vergrößert. Falls die Messquerschnitte nahe beieinander liegen, genügt es, eine kleinere Anzahl von vorangehenden bzw. nachfolgenden Messintervallen zu berücksichtigen. Wenn mit zunehmender Größe des betrachteten Teilnetzes die Reisezeiten zwischen den Zufahrt- und Ausfahrt-Messquerschnitten wachsen, muss auch eine größere Anzahl von Messintervallen berücksichtigt werden.

**[0012]** Bevorzugt werden die berücksichtigten Messintervalle mit zunehmender Größe des betrachteten Teilnetzes verlängert. Eine Vergrößerung der Aggregationsintervalle auf beispielsweise fünf Minuten reduziert die Störungen des Schätzprozesses durch Rauschen.

**[0013]** In einer anderen vorteilhaften Anwendung der Erfindung auf ein Verfahren zur Ermittlung der Verkehrsstärke an einem Fahrbahnquerschnitt eines Straßennetzes werden für ein Teilnetz des Straßennetzes, dessen eine Zu- oder Ausfahrt den Fahrbahnquerschnitt und dessen andere Zu- und/oder Ausfahrten Messquerschnitte aufweisen, gemäß oben genanntem Verfahren ermittelte Abbiegeraten bereitgestellt und aus den bereitgestellten Abbiegeraten und den an den Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärken der anderen Zu- und/oder Ausfahrten die Verkehrsstärke am Fahrbahnquerschnitt der einen Zu- bzw. Ausfahrt berechnet. Bei bekannten Abbiegeraten für ein Teilnetz lassen sich daraus Verkehrsstärken in dessen Zu- oder Ausfahrten bestimmen, wo kein Messwert vorliegt.

**[0014]** Vorzugsweise wird die für den Fahrbahnquerschnitt ermittelte Verkehrsstärke als Ersatzwert für einen fehlerhaften oder ausgefallenen Messquerschnitt herangezogen.

**[0015]** In einer anderen bevorzugten Anwendung der Erfindung auf ein Verfahren zur Ermittlung der Fahrzeuganzahl innerhalb eines Fahrbahnabschnitts, an dessen ersten Endpunkt die Verkehrsstärke an einem Messquerschnitt erfasst wird und an dessen zweiten Endpunkt kein Messquerschnitt angeordnet ist, wird die Verkehrsstärke am zweiten Endpunkt gemäß vorstehend beschriebenem Verfahren und daraus die Fahrzeuganzahl im Fahrbahnabschnitt durch zeitliche Integration der Differenz aus der in den Fahrbahnabschnitt zufließenden Verkehrsstärke und der aus diesem abfließenden Verkehrsstärke ermittelt. Durch diesen Bilanzierungsansatz können beispielsweise Staulängen in Zufahrten von Lichtsignal-gesteuerten Knotenpunkten ermittelt werden, auch wenn nur ein Messquerschnitt an einem der beiden Endpunkte des betrachteten Fahrbahnabschnittes in der Zufahrt vorhanden ist.

**[0016]** In ebenfalls vorteilhafter Anwendung der Erfindung auf ein Verfahren zur Bestimmung von Korrekturfaktoren für Abbiegeraten, welche nach oben beschriebenem Verfahren ermittelt werden, wird zunächst aus der Fahrzeugerhaltung der tatsächlichen vorwärts- und rückwärts-bezogenen Abbiegeraten für die zu bestimmenden Korrekturfaktoren ein homogenes Gleichungssystem aufgestellt, dann aus dem homogenen Gleichungssystem zusammen mit einer die triviale Lösung ausschließenden Nebenbedingung ein Optimierungsproblem gewonnen, wobei die Korrekturfaktoren sich als Lösung des Optimierungsproblems ergeben. Hierdurch lassen sich beispielsweise konstante prozentuale Fehler bei der Erfassung der Verkehrsstärken kompensieren, die sich aus der speziellen Lage, aber auch durch einen defekten internen Kalibriervorgang von Detektoren ergeben können.

**[0017]** Vorzugsweise werden die bestimmten Korrekturfaktoren durch ihren Medianwert dividiert. Dabei geht man davon aus, dass in einem Teilnetz weniger als die Hälfte aller Messquerschnitte zu viele Fahrzeuge und weniger als die Hälfte zu wenige Fahrzeuge zählen, so dass als Referenzwert der Medianwert der Liste der bestimmten Korrekturfaktoren verwendet werden kann. Durch die genannte Korrekturdivision liegt dieser dann beim Wert eins.

**[0018]** In einer bevorzugten Ausgestaltung dieser Anwendung wird ein betrachtetes Teilnetz des Straßennetzes in Inselnetze zerlegt, wobei jedes Inselnetz nur Messquerschnitte an seinem Netzrand umfasst, und es werden Korrekturfaktoren für die Inselnetze bestimmt. Durch diese geeignete Zerlegung in Inselnetze wird einerseits der Rechenaufwand für die Optimierung reduziert und andererseits Nivellierungseffekte der geschätzten Korrekturfaktoren vermieden,

die in Netzen auftreten, bei denen viele Messstellen in beide Richtungen weitere Messquerschnitte haben.

**[0019]** Mit Vorteil wird hierbei überprüft, ob die bestimmten Korrekturfaktoren innerhalb eines vorgegebenen Wertebereiches liegen. Bei Verlassen des vorgebbaren Wertebereiches liegt eine derart große Abweichung zwischen geschätzten und gemessenen Größen vor, dass auf diese Weise eine Fehlermeldung ausgegeben werden kann.

**[0020]** In vorteilhafter Ausgestaltung dieser Anwendung wird bei der Lösung des Optimierungsproblems eine Kenngröße berechnet, deren Wert als Maß für die Schätzqualität der Abbiegeraten verwendet wird. Für ein Inselnetz geht diese Kenngröße im Idealfall gegen Null, wenn die Abbiegeraten exakt geschätzt sind und zwischen den Messquerschnitten weder Fahrzeugverluste noch Fahrzeugzunahmen auftreten und alle Messfehler proportionaler Art sind.

**[0021]** Vorzugsweise wird eine Fehlermeldung ausgegeben, wenn der Wert der Kenngröße eine vorgebbare Schranke übersteigt. Dies ist ein Indikator für ungenau geschätzte Abbiegeraten, nicht erfasste Zufahrt- oder Ausfahrt-Verkehrsstärken oder Messfehler nicht proportionaler Art, die beispielsweise entstehen, wenn nicht alle relevanten Zufahrt- und Ausfahrt-Verkehrsstärken im Teilnetz gemessen werden.

**[0022]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der beschriebenen Anwendung der Erfindung werden für jeden Messquerschnitt, den sich zwei aneinander grenzende Inselnetze teilen, zwei Korrekturfaktoren bestimmt, wobei die Korrekturfaktoren je eines Inselnetzes derart skaliert werden, dass sich die Korrekturfaktoren gemeinsamer Messquerschnitte einander angleichen. Durch diesen weiteren Optimierungsschritt bleibt das Verhältnis der Korrekturfaktoren innerhalb jedes Inselnetzes unverändert, wobei aber gemeinsame Schätzfehler zwischen den Inselnetzen abgeglichen werden.

**[0023]** Vorzugsweise werden die an den Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärken und die durch Schätzung ermittelten Abbiegeraten mittels der bestimmten Korrekturfaktoren kalibriert.

**[0024]** Weitere Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie seiner bevorzugten Anwendungen ergeben sich aus einem konkreten Ausführungsbeispiel, welches nachfolgend anhand der Zeichnungen näher beschrieben wird, in deren

FIG 1 Teilnetze eines Netzausschnittes mit Knotenpunkt,  
 FIG 2 das vorwärts-bezogene Teilnetz aus FIG 1 mit Abbiegebeziehungen,  
 FIG 3 das rückwärts-bezogene Teilnetz aus FIG 1 mit Abbiegebeziehungen,  
 FIG 4 ein Inselnetz um einen Knotenpunkt und  
 FIG 5 den zeitlichen Verlauf erfindungsgemäß geschätzter Abbiegeraten des Inselnetzes aus FIG 4

schematisch veranschaulicht sind.

**[0025]** FIG 1 zeigt einen Knotenpunkt aufweisenden Netzausschnitt eines Straßennetzes, etwa eines Stadtstraßennetzes, in welchem die Abbiegeraten der Verkehrsströme zum Zwecke der Verkehrssteuerung ermittelt werden sollen. Der Knotenpunkt weist vier Knotenarme  $i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) mit Zu- und Ausfahrten zum bzw. vom Knotenpunkt auf, wobei Knotenarm 2 im dargestellten Ausführungsbeispiel nur eine Ausfahrt umfasst. Die Fahrbahn von Zufahrt 1 nach Ausfahrt 3 umfasst im beschriebenen Ausführungsbeispiel keine Messquerschnitte. An allen anderen Zu- und Ausfahrten des Knotenpunktes befinden sich Messquerschnitte mit Detektoren zum Erfassen von Einfahrt-Verkehrsstärken

$q_i^{in}(n)$  und Ausfahrt-Verkehrsstärken  $q_i^{out}(n)$  in vorgebbaren Messintervallen  $n$ . Grundelement des erfindungsgemäßen Verfahrens zur dynamischen Schätzung von Abbiegeraten ist eine geeignete Zerlegung des Netzausschnittes in Teilnetze. FIG 1 zeigt ein erstes Teilnetz  $fw$ , dessen Netzrand als Strichpunktlinie dargestellt ist und welches Messquerschnitte in der Ausfahrt 1 sowie in den relevanten Zufahrten 3 und 4 umfasst. Die Zufahrten 3 und 4 sind relevant, da auf ihnen Teilverkehrströme in das Teilnetz  $fw$  zufließen, welche durch die Ausfahrt 1 aus dem Teilnetz  $fw$  abfließen.

**[0026]** In FIG 2 ist das Teilnetz  $fw$  aus FIG 1 mit den zugehörigen Abbiegebeziehungen dargestellt. Die Abbiegerate  $\hat{m}_{j1}^{fw}(k)$  gibt den Anteil der auf Zufahrt 3 gemessenen Verkehrsstärke  $q_3^{in}(k)$  an, der durch Ausfahrt 1 aus dem Teilnetz  $fw$  abfließt und damit zu der dort gemessenen Verkehrsstärke  $q_1^{out}(k)$  beiträgt. Analoges gilt für die Abbiegerate

$\hat{m}_{41}^{fw}(k)$  in Bezug auf die Einfahrt-Verkehrsstärke  $q_4^{in}(k)$ . Das Teilnetz  $fw$  (forward) modelliert die Abbiegebeziehungen also zeitlich vorwärts-bezogen. Bei sich langsam ändernden Verkehrsgeschehen kann für ein vorgegebenes Messintervall  $k$  die Ausfahrt-Verkehrsstärke  $q_1^{out}(k)$  als gewichtete Summe der Einfahrt-Verkehrsstärken  $q_3^{in}(k)$  und  $q_4^{in}(k)$  modelliert werden, wobei die Gewichtungsfaktoren den entsprechenden Abbiegeraten  $\hat{m}_{j1}^{fw}(k)$  und  $\hat{m}_{41}^{fw}(k)$  entsprechen. Allgemein kann bei  $r$  für eine Ausfahrt  $j$  relevanten Zufahrten  $i$  angesetzt werden:

$$q_j^{out}(k) = \sum_{i=1}^r \hat{m}_{ij}^{fw}(k) \cdot q_i^{in}(k)$$

5

[0027] Von dieser Modellgleichung ausgehend können die Abbiegeraten  $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$  mittels eines mathematischen Schätzverfahrens ermittelt werden. Erfindungsgemäß wird dem Schätzverfahren jedoch ein verallgemeinerter Zeitbezug zugrunde gelegt. Es werden außer dem aktuell betrachteten Messintervall  $k$  noch eine Mehrzahl von vorangehenden Messintervallen  $n = k-1, k-2, \dots$  berücksichtigt. Für die vorwärts-bezogene Modellgleichung, in der insgesamt  $z$  Messintervalle einbezogen werden, ergibt sich daher:

10

15

$$q_j^{out}(k) = \sum_{i=1}^r \sum_{l=1}^z m_{ij}^{fw}(k-l+1) \cdot q_i^{in}(k-l+1)$$

[0028] Die zu schätzenden Abbiegeraten  $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$  ergeben sich als Summen der Abbiegeraten  $m_{ij}^{fw}(k-l+1)$  über die berücksichtigten Messintervalle  $l = 1, \dots, z$ :

20

25

$$\hat{m}_{ij}^{fw}(k) = \sum_{l=1}^z m_{ij}^{fw}(k-l+1), \quad i = 1, \dots, r$$

[0029] Durch diesen Ansatz wird das erfindungsgemäße Verfahren robust hinsichtlich der Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten, bei hoher Genauigkeit und hinreichender Schnelligkeit.

30

[0030] Mit Vorteil wird dieser Ansatz erfindungsgemäß auch für zeitlich rückwärts-bezogene Teilnetze bw (backward) angewandt. FIG 1 zeigt ein solches Teilnetz bw, dessen Netzrand als Strichlinie dargestellt ist und welches Messquerschnitte in der Zufahrt 3 sowie in den relevanten Ausfahrten 1, 2 und 4 umfasst. Die Ausfahrten 1, 2 und 4 sind relevant, da auf ihnen Teilverkehrsströme aus dem Teilnetz bw abfließen, welche durch die Zufahrt 3 in das Teilnetz bw eingeflossen sind. In FIG 3 ist dieses Teilnetz bw mit den zugehörigen Abbiegebeziehungen dargestellt. Die Abbiegerate  $\hat{m}_{j2}^{bw}(k)$

35

gibt den Anteil der in Ausfahrt 2 gemessenen Verkehrsstärke  $q_2^{out}(k)$  an, der über Zufahrt 3 in das Teilnetz bw eingeflossen ist und damit zu der dort gemessenen Verkehrsstärke  $q_3^{in}(k)$  beiträgt. Analoges gilt für die Abbiegeraten

40

$\hat{m}_{31}^{bw}(k)$  bzw.  $\hat{m}_{34}^{bw}(k)$  in Bezug auf die Ausfahrt-Verkehrsstärke  $q_1^{out}(k)$  bzw.  $q_4^{out}(k)$ . Das Teilnetz bw modelliert die Abbiegebeziehungen also zeitlich rückwärts-bezogen. Allgemein kann bei  $s$  für eine Zufahrt  $j$  relevanten Ausfahrten  $i$  unter Berücksichtigung von  $z$  Messintervallen  $n$  wieder die gewichtete Summe angesetzt werden:

45

$$q_j^{in}(k) = \sum_{i=1}^s \sum_{l=1}^z m_{ij}^{bw}(k+l-1) \cdot q_i^{out}(k+l-1)$$

[0031] Die zu schätzenden Abbiegeraten  $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$  ergeben sich analog als Summen der Abbiegeraten  $m_{ij}^{bw}(k+l-1)$  über die berücksichtigten Messintervalle  $l = 1, \dots, z$ :

50

55

$$\hat{m}_{ij}^{bw}(k) = \sum_{l=1}^z m_{ij}^{bw}(k+l-1), \quad j = 1, \dots, s$$

**[0032]** Erfindungsgemäß wird als mathematisches Schätzverfahren ein erweitertes Kalman-Filter zur Schätzung der Abbiegeraten eingesetzt.

**[0033]** Falls die Messquerschnitte nahe beieinander liegen, etwa ein bis zwei dazwischen liegende Lichtsignalanlagen, genügt eine geringere Anzahl an zu berücksichtigenden Messintervallen, erfahrungsgemäß drei oder vier.

**[0034]** Wird der allgemeine Ansatz mit  $z > 3$  angewendet, kann die Modellgleichung auch in größeren Teilnetzen angewendet werden, deren Detektoren nur am Netzrand und nicht im Netzinneeren ausgewertet werden. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass im vorwärts-bezogenen Fall zu einem Ausfahrt-Messquerschnitt eines Teilnetzes alle relevanten Zufahrt-Messquerschnitte einbezogen werden, bzw. dass im rückwärts-bezogenen Fall zu einem Zufahrt-Messquerschnitt alle relevanten Ausfahrt-Messquerschnitte einbezogen werden.

**[0035]** Auf diese Weise kann in Teilnetzen begrenzter Größe eine direkte dynamische Schätzung von Quelle-Ziel-Strömen durchgeführt werden. Die Parameter des Kalman-Filters, etwa Fehlervarianzen, müssen allerdings entsprechend angepasst werden und die Schätzqualität ist nicht so hoch wie bei nahe beieinander liegenden Messquerschnitten. Sinnvoll ist hier die Vergrößerung der Messintervalle, d.h. der Aggregationszeiträume, auf beispielsweise fünf Minuten, um die Störung des Schätzprozesses durch Rauschen zu reduzieren.

**[0036]** Mit Vorteil wird der Schätzvorgang unterbrochen, wenn auf einem der für ein Teilnetz verwendeten Messquerschnitte eine Überlastung detektiert wird.

**[0037]** Verschiedentlich wird für die Ermittlung von Staulängen in Zufahrten zu Lichtsignalanlagen ein Bilanzierungsansatz verwendet. Dieser bestimmt die Anzahl der Fahrzeuge, d.h. die Staulänge, in einer der Zufahrten durch Integration der Verkehrsstärken an den Endpunkten des Fahrbahnabschnitts über die Zeit. Wenn sich - was in der Praxis meist der Fall ist - nur ein Messquerschnitt an einem der beiden Endpunkte befindet, kann die Verkehrsstärke am anderen Endpunkt über erfindungsgemäß ermittelte Abbiegeraten geschätzt werden.

**[0038]** Ein weiterer Vorteil einer Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird nachfolgend für den Fall beschrieben, dass sich ein Messquerschnitt an der Zufahrt zu einem Fahrbahnabschnitt befindet, während die Verkehrsstärke an der Ausfahrt aus dem Fahrbahnabschnitt über Abbiegeraten geschätzt wird, da sich an diesem Fahrbahnquerschnitt kein Messquerschnitt befindet. Die oben genannten Modellgleichungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Abbiegeraten der Zu- bzw. Ausfahrten in Bezug zur Ausfahrt- bzw. Zufahrt-Verkehrsstärke geschätzt werden. Weisen die Messwerte der Verkehrsstärken proportionale Fehler auf, werden diese in den Abbiegeraten kompensiert. Die daraus errechneten Zufahrt-Verkehrsstärken sind konsistent zur gemessenen Ausfahrt-Verkehrsstärke. Auf diese Weise wird die Qualität von Bilanzierungen erheblich gesteigert, ohne dass spezielle Kalibrierungen für jeden bilanzierten Fahrbahnabschnitt erforderlich sind.

**[0039]** Für die weitere Beschreibung wird eine Matrix-Schreibweise der Schätzergebnisse eingeführt. Betrachtet man ein Messintervall  $k$  - nachfolgend nicht mehr dargestellt -, lassen sich die vorwärts-bezogenen Schätzungen in Matrix-Schreibweise zusammenfassen. Die Formel beschreibt, wie man anhand der vorwärts-bezogenen Abbiegeraten von den Zufahrt-Verkehrsstärken auf die Ausfahrt-Verkehrsstärken schließen kann:

$$q^{out} = M^{fw} \cdot q^{in}$$

**[0040]** In dieser Vektorgleichung sind  $q^{in}$  bzw.  $q^{out}$  Spaltenvektoren, deren Komponenten die Zufahrt-Verkehrsstärken  $q_i^{in}$  bzw. Ausfahrt-Verkehrsstärken  $q_i^{out}$  aller Messquerschnitte in den Zu- bzw. Ausfahrten der Knotenarme  $i$  darstellen, während  $M^{fw}$  eine  $(n \times n)$ -Matrix bedeutet, deren Elemente die Abbiegeraten  $m_{ij}^{fw}$  sind.

**[0041]** Entsprechend lässt sich für die rückwärts-bezogene Propagation formulieren:

$$q^{in} = M^{bw} \cdot q^{out}$$

**[0042]** Die Spaltenvektoren  $q^{in}$  und  $q^{out}$  umfassen dabei jeweils alle Messquerschnitte in der gleichen Reihenfolge, auch wenn es zwischen Komponenten  $q_i$  der rechten Seite und  $q_j$  der linken Seite der Gleichung keine Fahrbeziehung gibt. Für das entsprechende Element der Matrix  $M$  gilt in diesem Fall  $m_{ij} = 0$ .

**[0043]** Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass Detektoren der Messquerschnitte die tatsächlichen Verkehrsstärken nur mit einer gewissen Genauigkeit erfassen. Dies kann sich aus ihrer Lage ergeben, z.B. Überfahrt durch Fahrzeuge zweier Spuren, aber auch durch einen defekten internen Kalibriervorgang, bei dem die Messwerte einen Drift erfahren, wie er sich im Laufe der Zeit in der Praxis häufig einstellt.

**[0044]** Geht man in erster Näherung von einer konstanten prozentualen Abweichung  $f_i = 1 \pm \Delta$  aus, kann der Zusammenhang zwischen tatsächlicher Verkehrsstärke  $q_i$  und gemessener Verkehrsstärke  $\hat{q}_i$  wie folgt formuliert werden:

$$q_i = f_i \cdot \hat{q}_i, \quad i = 1, \dots, n$$

**[0045]** Wenn  $\hat{m}_{ij}^{fw}$  bzw.  $\hat{m}_{ij}^{bw}$  die geschätzten Abbiegeraten sind, gilt:

$$\hat{q}^{out} = \hat{M}^{fw} \cdot \hat{q}^{in} \quad \text{bzw.} \quad \hat{q}^{in} = \hat{M}^{bw} \cdot \hat{q}^{out}$$

**[0046]** Die Korrekturfaktoren  $f_i$  lassen sich in eine Diagonalmatrix  $F$  zusammenfassen:

$$F = \text{diag}(f_1, \dots, f_i, \dots, f_n)$$

**[0047]** Unter der physikalisch sinnvollen Annahme, dass die Diagonalelemente  $f_i$  ungleich Null sind, existiert die Inverse  $F^{-1}$  von  $F$ , die ebenfalls Diagonalenform hat

$$F^{-1} = \text{diag}(f_1^{-1}, \dots, f_i^{-1}, \dots, f_n^{-1}),$$

so dass folgt:

$$q^{out} = (F \cdot \hat{M}^{fw} \cdot F^{-1}) \cdot q^{in} \quad \text{bzw.} \quad q^{in} = (F \cdot \hat{M}^{bw} \cdot F^{-1}) \cdot q^{out}$$

**[0048]** Aus dem Vergleich der Beziehungen für die tatsächlichen und geschätzten Verkehrsstärken lässt sich die Beziehung zwischen den realen und den geschätzten Matrizen der Abbiegeraten ableiten:

$$M^{fw} = F \cdot \hat{M}^{fw} \cdot F^{-1} \quad \text{bzw.} \quad M^{bw} = F \cdot \hat{M}^{bw} \cdot F^{-1}$$

**[0049]** Für die Elemente der geschätzten Matrizen ergibt sich daraus

$$m_{ij}^{fw} = \frac{f_j}{f_i} \cdot \hat{m}_{ij}^{fw} \quad \text{bzw.} \quad m_{ij}^{bw} = \frac{f_j}{f_i} \cdot \hat{m}_{ij}^{bw}$$

**[0050]** Für die realen Abbiegebeziehungen gilt unter der Annahme der Fahrzeugerhaltung vorwärts-bezogen betrachtet am Zufahrt-Messquerschnitt  $i$  bzw. rückwärts-bezogen betrachtet am Ausfahrt-Messquerschnitt  $i$

$$\sum_{j=1}^n m_{ij}^{fw} = 1 \quad \text{bzw.} \quad \sum_{j=1}^n m_{ij}^{bw} = 1$$

was unmittelbar zu den Bestimmungsgleichungen für die Elemente der Matrix  $F$  mit den Korrekturfaktoren führt:

$$\sum_{j=1}^n f_j \cdot \hat{m}_{ij}^{fw} - f_i = 0 \quad \text{bzw.} \quad \sum_{j=1}^n f_j \cdot \hat{m}_{ij}^{bw} - f_i = 0$$

für alle Spalten  $i$  in  $\hat{M}^{fw}$  bzw.  $\hat{M}^{bw}$ , die nicht nur aus Nullen bestehen.

**[0051]** Aus  $n_{in}$  Zufahrt- und  $n_{out}$  Ausfahrt-Messquerschnitten ergibt sich ein überbestimmtes homogenes Gleichungssystem für die  $f_i$  mit  $n_{in} + n_{out} \geq n$  Gleichungen. Den Grenzfall  $n_{in} + n_{out} = n$  erhält man, wenn jeder einzelne Messquerschnitt nur in jeweils einer Richtung einen benachbarten Messquerschnitt aufweist. Dieser Fall tritt in der Praxis dann auf, wenn Messquerschnitte nur am Netzrand vorliegen. Der einfachste Fall ist der einer einzelnen Lichtsignalanlage, in der alle relevanten Zu- und Ausfahrten erfasst werden.

**[0052]** Um die physikalisch nicht sinnvolle Trivialsolution  $F = 0$  auszuschließen, wird die folgende Anforderung an die Lösung ergänzt:

$$(f_1 - 1)^2 = 0$$

**[0053]** Trifft die Annahme zu, dass Abweichungen lediglich zu proportional verfälschten Messwerten führen, entsteht hierdurch keine Einschränkung, da für jede Lösung  $F$  des homogenen Gleichungssystems auch  $F = \lambda \cdot F'$  eine Lösung darstellt.

**[0054]** Aus letzten Gleichungen ergibt sich letztendlich die Formulierung eines geeigneten nichtlinearen Optimierungsproblems, wonach die Kenngröße

$$P = \frac{w_1 \cdot \sum_{i=1}^n (s_i^{fw})^2 + w_1 \cdot \sum_{i=1}^n (s_i^{bw})^2 + w_2 \cdot (f_1 - 1)^2}{n}$$

mit

$$s_i^{fw} = \sum_{j=1}^n f_j \cdot \hat{m}_{ij}^{fw} - f_i \quad \text{für} \quad \sum_{j=1}^n \hat{m}_{ij}^{fw} \neq 0, \quad \text{sonst} \quad s_i^{fw} = 0$$

$$s_i^{bw} = \sum_{j=1}^n f_j \cdot \hat{m}_{ij}^{bw} - f_i \quad \text{für} \quad \sum_{j=1}^n \hat{m}_{ij}^{bw} \neq 0, \quad \text{sonst} \quad s_i^{bw} = 0$$

zu minimieren ist, wobei  $w_1$  und  $w_2$  wählbare Gewichtungen darstellen.

**[0055]** Da der erste Faktor  $f_1$  willkürlich gewählt wurde, obwohl er möglicherweise tatsächlich ungleich 1 ist, kann abschließend noch eine Korrektur der ermittelten Lösung  $F'$  erfolgen. Geht man davon aus, dass in einem Netz weniger als die Hälfte aller Messquerschnitte zu viele Fahrzeuge ( $f_i > 1$ ) und weniger als die Hälfte aller Messquerschnitte zu wenige Fahrzeuge ( $f_i < 1$ ) schätzen, kann als Referenz der Medianwert von  $F$  verwendet werden, da dieser bei 1 liegen muss. Als Lösung des Problems kann dann verwendet werden:

$$F = \lambda \cdot F' \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{1}{\text{median}(F)}$$

**[0056]** Das formulierte Optimierungsproblem kann formal auf ein Netz als Ganzes angewendet werden. Dies hat allerdings zwei Nachteile: Einerseits nimmt der Rechenaufwand für die Optimierung mit der Zahl der Messquerschnitte überproportional zu. Andererseits führt die Tatsache, dass im Netz viele Messquerschnitte in beide Richtungen weitere Messquerschnitte haben, zu Nivellierungseffekten der geschätzten Korrekturfaktoren  $f_i$ .



**[0057]** Um diesen Nachteil zu umgehen, kann das Verfahren verfeinert werden, indem das Netz geeignet zerlegt wird. Als günstig hat sich die Anwendung auf Teilnetze erwiesen, die so definiert sind, dass von jedem Punkt innerhalb eines solchen Netzes nur solche Messstellen Teil dieses Teilnetzes sind, die über Netzkanten direkt erreichbar sind. Jedes solche Teilnetz stellt quasi ein Inselnetz mit Zu- und Ausfahrten in das übrige Netz dar. Es fasst alle vorwärts- bzw. rückwärts-bezogenen Teilnetze zusammen, die gleiche Zu- bzw. Ausfahrt-Messquerschnitte haben. FIG 4 zeigt ein solches Inselnetz, das bei üblicher Detektorausstattung an Knotenpunkten in der Regel um die Lichtsignalanlage herum entsteht. Es weist Messquerschnitte nur am Netzrand auf, der in FIG 4 mit einer Strichdoppelpunktlinie veranschaulicht ist.

**[0058]** Die eben beschriebenen Nachteile sind damit aufgehoben. Gleichzeitig liefert die Kenngröße  $P$ , die sich aus der Lösung des Optimierungsproblems für ein Inselnetz ergibt, weitergehende Hinweise über eventuelle Detektorstörungen: Der Wert  $P$  der Lösung des Optimierungsproblems für ein Inselnetz geht im Idealfall gegen Null, wenn die Abbiegeraten exakt geschätzt sind und zwischen den Messquerschnitten keine Fahrzeugverluste (Senken) oder -zunahmen (Quellen) auftreten, sowie alle Messfehler proportionaler Art sind. Ergibt sich für  $P$  ein Wert erheblich größer als Null, z.B. Zwei, ist dies ein Indiz für ungenau geschätzte Abbiegeraten, nicht erfasste Zu- und Ausfahrten oder Messfehler anderer als proportionaler Art. Typischerweise entsteht ein solcher Fehler dann, wenn nicht alle Verkehrsflüsse in den relevanten Zu- und Ausfahrten eines solchen Teilnetzes erfasst sind oder z.B. durch Fehlversorgungen / -verdrahtungen Messquerschnitte den Strecken falsch zugewiesen wurden.

**[0059]** FIG 5 zeigt den Verlauf der erfindungsgemäß ermittelten rückwärts-bezogenen Abbiegeraten  $\hat{m}_{ij}(k)$  für die Verkehrsströme zwischen Knotenarm 3 und Knotenarmen 4, 1 und 2. Dazu wird eine Liste mit Korrekturfaktoren  $f_i$  sowie der Wert der Kenngröße  $P$  ausgegeben, was nicht dargestellt ist.

**[0060]** An allen Messquerschnitten zwischen Inselnetzen werden mit diesem Ansatz jeweils zwei Werte für den Messfehler geschätzt. In einem abschließenden Ausgleichsverfahren können diese über einen weiteren Optimierungsschritt paarweise aneinander angeglichen werden, indem alle Messfehler  $f_i$  aller Teilnetze mit Teilnetz-spezifischen Korrekturfaktoren multipliziert werden. Diese Korrekturfaktoren lassen das Verhältnis der  $f_i$  innerhalb jedes Teilnetzes unverändert, führen aber zu einem Abgleich gemeinsamer Schätzfehler zwischen den Teilnetzen.

**[0061]** Schließlich lassen sich alle gemessenen Verkehrsstärken über

$$q_i^{kal} = f_i \cdot \hat{q}_i$$

und alle Abbiegeraten über

$$m_{ij}^{kal} = \frac{f_j}{f_i} \cdot \hat{m}_{ij}$$

kalibrieren, was die Schätzung der Verkehrslage qualitativ verbessert.

**[0062]** Eine weitere Anwendung der Ergebnisse ist die Bildung von Ersatzwerten, falls Detektoren oder ganze Messquerschnitte ausgefallen sind. Solche Ausfälle werden entweder schon in der Hardware der Geräte erkannt und weitergemeldet oder sie lassen sich über einfache Plausibilitätskontrollen erfassen. In diesem Fall können Ersatzwerte einfach anhand der gemessenen und kalibrierten Verkehrsstärken und Abbiegeraten der umgebenden Messquerschnitte gebildet werden. Dies stellt einen erheblichen Qualitätssprung gegenüber bekannten Verfahren dar, die fehlende Messwerte im einfachen Fall lediglich durch vorab fest versorgte zeitabhängige Werte ersetzen oder - sehr aufwendig - diese über vorab erfasste, Tagestyp-spezifische Ganglinien und den aktuellen Zeitpunkt bestimmen.

**[0063]** Die mit dem beschriebenen Verfahren geschätzten Abbiegeraten weisen eine Genauigkeit auf, die sowohl für die Verkehrslageschätzung als auch für die Weiterverwendung in adaptiven Netzsteuerungsverfahren ausreicht, und die die Schätzqualität konventioneller, umlegungsbasierter Verfahren weit übertreffen.

**[0064]** Die Schätzung der Korrekturfaktoren  $f_i$  für alle Messquerschnitte ermöglicht einerseits eine online-Korrektur der Abbiegeraten und Verkehrsstärke-Zählwerte. Das damit mögliche Verfahren zur netzbezogenen Ersatzwertbildung kommt ohne Ganglinien oder vorab versorgte Default-Zählwerte aus und funktioniert auch bei mehreren dicht beieinander liegenden Detektorausfällen, da in diesem Fall Ersetzungen auch rekursiv vorgenommen werden können.

**[0065]** Andererseits entstehen aus der Konsistenzprüfung wertvolle Hinweise für die Wartung des Detektornetzes. Entsprechende Benachrichtigungsmechanismen ermöglichen dem Wartungsdienst einer Stadt eine effiziente und beschleunigte Reparatur defekter Detektoren, verbunden mit nennenswerten Kosteneinsparungen.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von Abbiegeraten  $(\hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  in einem Straßennetz,

- wobei an Messquerschnitten in vorgebbaren Messintervallen (k) Verkehrsstärken  $(q(k))$  erfasst werden,  
 - wobei für wenigstens ein vorwärts-bezogenes Teilnetz (fw) des Straßennetzes, bei welchem Messquerschnitte an einer Ausfahrt (j) und an Zufahrten (i) des Teilnetzes (fw) berücksichtigt werden, eine Modellgleichung aufgestellt wird, in der die Ausfahrt-Verkehrsstärke  $(q_j^{out}(k))$  als gewichtete Summe der Zufahrt-Verkehrsstärken  $(q_i^{in}(k))$  angesetzt wird und die Gewichtungsfaktoren den vorwärts-bezogenen Abbiegeraten  $(\hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  entsprechen, welche jeweils den Anteil einer Zufahrt-Verkehrsstärke  $(q_i^{in}(k))$  angeben, der durch die berücksichtigte Ausfahrt (j) abfließt,  
 - und wobei ausgehend von der Modellgleichung mittels eines mathematischen Schätzverfahrens die vorwärts-bezogenen Abbiegeraten  $(\hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  berechnet werden,

**dadurch gekennzeichnet,**

- **dass** in der gewichteten Summe für die Ausfahrt-Verkehrsstärke  $(q_j^{out}(k))$  eines gegebenen Messintervalls (k) die Zufahrt-Verkehrsstärken  $(q_i^{in}(n))$  einer Mehrzahl (z) vorangehender Messintervalle ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ) berücksichtigt werden,  
 - wobei sich eine zu ermittelnde vorwärts-bezogene Abbiegerate  $(\hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  als Summe aus den entsprechenden Abbiegeraten  $(m_{ij}^{fw}(n))$  der in der Modellgleichung berücksichtigten Messintervalle ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ) ergibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

**dadurch gekennzeichnet, dass** für wenigstens ein rückwärts-bezogenes Teilnetz (bw) des Straßennetzes, bei welchem Messquerschnitte an einer Zufahrt (j) und an Ausfahrten (i) des Teilnetzes (bw) berücksichtigt werden, eine Modellgleichung aufgestellt wird, in der die Zufahrt-Verkehrsstärke  $(q_j^{in}(k))$  als gewichtete Summe der Ausfahrt-Verkehrsstärken  $(q_i^{out}(k))$  angesetzt wird und die Gewichtungsfaktoren den rückwärts-bezogenen Abbiegeraten  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k))$  entsprechen, welche jeweils den Anteil einer Ausfahrt-Verkehrsstärke  $(q_i^{out}(k))$  angeben, der durch die berücksichtigte Zufahrt (j) eingeflossen ist,

- wobei ausgehend von der Modellgleichung mittels eines mathematischen Schätzverfahrens die Abbiegeraten  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k))$  berechnet werden,  
 - wobei in der gewichteten Summe für die Zufahrt-Verkehrsstärke  $(q_j^{in}(k))$  eines gegebenen Messintervalls (k) die Ausfahrt-Verkehrsstärken  $(q_i^{out}(n))$  einer Mehrzahl (z) nachfolgender Messintervalle ( $n = k, k+1, k+2, \dots, k+z-1$ ) berücksichtigt werden,  
 - und wobei sich eine zu ermittelnde rückwärts-bezogene Abbiegerate  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k))$  als Summe aus den entsprechenden Abbiegeraten  $(m_{ij}^{bw}(n))$  der in der Modellgleichung berücksichtigten Messintervalle ( $n = k, k+1, k+2, \dots, k+z-1$ ) ergibt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

**dadurch gekennzeichnet, dass** bei dem mathematischen Schätzverfahren ein erweitertes Kalman-Filter ange-

wandt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** das Schätzverfahren unterbrochen wird, wenn an einem Messquerschnitt eine Verkehrsüberlastung erfasst wird.
5. Verfahren zur Ermittlung von Abbiegeraten an einem Knotenpunkt des Straßennetzes,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** vorwärts-bezogene und/oder rückwärts-bezogene Teilnetze (fw, bw) um den Knotenpunkt betrachtet werden, bei welchen Messquerschnitte in den Zufahrten (j, i) und Ausfahrten (i, j) des Knotenpunktes berücksichtigt werden, und dass die Abbiegeraten  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k), \hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 ermittelt werden.
6. Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Verkehrsströmen eines Teilnetzes,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** für die Zufahrten und Ausfahrten des Teilnetzes die Abbiegeraten gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 ermittelt werden, wobei Messquerschnitte nur am Rand des Teilnetzes und nicht in seinem Inneren berücksichtigt werden, und dass aus den ermittelten Abbiegeraten und den erfassten Verkehrsstärken die Quelle-Ziel-Verkehrsströme für dieses Teilnetz berechnet werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die Anzahl (z) der berücksichtigten Messintervalle (n) mit zunehmender Größe des betrachteten Teilnetzes vergrößert wird.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die berücksichtigten Messintervalle (n) mit zunehmender Größe des betrachteten Teilnetzes verlängert werden.
9. Verfahren zur Ermittlung der Verkehrsstärke an einem Fahrbahnquerschnitt eines Straßennetzes,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** für ein Teilnetz des Straßennetzes, dessen eine Zu- oder Ausfahrt den Fahrbahnquerschnitt und dessen andere Zu- und/oder Ausfahrten Messquerschnitte aufweisen, gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 ermittelte Abbiegeraten bereitgestellt werden, und dass aus den bereitgestellten Abbiegeraten und den an den Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärken der anderen Zu- und/oder Ausfahrten die Verkehrsstärke am Fahrbahnquerschnitt der einen Zu- bzw. Ausfahrt berechnet wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die für den Fahrbahnquerschnitt ermittelte Verkehrsstärke als Ersatzwert für einen fehlerhaften oder ausgefallenen Messquerschnitt herangezogen wird.
11. Verfahren zur Ermittlung der Fahrzeuganzahl innerhalb eines Fahrbahnabschnitts, an dessen ersten Endpunkt die Verkehrsstärke an einem Messquerschnitt erfasst wird und an dessen zweiten Endpunkt kein Messquerschnitt angeordnet ist,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die Verkehrsstärke am zweiten Endpunkt gemäß einem Verfahren nach Anspruch 9 oder 10 und daraus die Fahrzeuganzahl im Fahrbahnabschnitt durch zeitliche Integration der Differenz aus der in den Fahrbahnabschnitt zufließenden Verkehrsstärke und der aus diesem abfließenden Verkehrsstärke ermittelt wird.
12. Verfahren zur Bestimmung von Korrekturfaktoren für gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 ermittelte Abbiegeraten,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** zunächst aus der Fahrzeughaltung der tatsächlichen vorwärts- und rückwärts-bezogenen Abbiegeraten für die zu bestimmenden Korrekturfaktoren ( $f_i$ ) ein homogenes Gleichungssystem aufgestellt wird, dass dann aus dem homogenen Gleichungssystem zusammen mit einer die triviale Lösung ausschließenden Nebenbedingung ein Optimierungsproblem gewonnen wird, und dass die Korrekturfaktoren ( $f_i$ ) sich als Lösung des Optimierungsproblems ergeben.
13. Verfahren nach Anspruch 12,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die bestimmten Korrekturfaktoren ( $f_i$ ) durch ihren Medianwert dividiert werden.
14. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13,

**dadurch gekennzeichnet, dass** ein betrachtetes Teilnetz des Straßennetzes in Inselnetze zerlegt wird, wobei jedes Inselnetz nur Messquerschnitte an seinem Netzrand umfasst, und dass Korrekturfaktoren ( $f_i$ ) für die Inselnetze bestimmt werden.

- 5 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 14,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** überprüft wird, ob die bestimmten Korrekturfaktoren ( $f_i$ ) innerhalb eines vorgebbaren Wertebereiches liegen.
- 10 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 15,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Lösung des Optimierungsproblems eine Kenngröße (P) berechnet wird, deren Wert als Maß für die Schätzqualität der Abbiegeraten ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ,  $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) verwendet wird.
- 15 17. Verfahren nach Anspruch 16,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** eine Fehlermeldung ausgegeben wird, wenn der Wert der Kenngröße (P) eine vorgebbare Schranke übersteigt.
- 20 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 17,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** für jeden Messquerschnitt, den sich zwei aneinander grenzende Inselnetze teilen, zwei Korrekturfaktoren bestimmt werden und dass die Korrekturfaktoren je eines Inselnetzes derart skaliert werden, dass sich die Korrekturfaktoren gemeinsamer Messquerschnitte einander angleichen.
- 25 19. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 18,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die an den Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärken ( $q_i^{in}(k)$ ,  $q_j^{out}(k)$ ) und die durch Schätzung ermittelten Abbiegeraten ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ,  $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) mittels der Korrekturfaktoren ( $f_i$ ) kalibriert werden.

## Claims

1. Method for determining turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) in a road network,

- wherein traffic volumes ( $q(k)$ ) are recorded at measurement cross-sections at predefinable measuring intervals ( $k$ ),
- wherein for at least one forward-related subnetwork (fw) of the road network in which measurement cross-sections are taken into account at an exit (j) and at entries (i) of the subnetwork (fw), a model equation is formulated in which the exit traffic volume ( $q_j^{out}(k)$ ) is set as the weighted sum of the entry traffic volumes ( $q_i^{in}(k)$ ) and the weighting factors correspond to the forward-related turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) which specify in each case the portion of an entry traffic volume ( $q_i^{in}(k)$ ) flowing out through the exit (j) taken into account,
- and wherein the forward-related turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) are calculated on the basis of the model equation using a mathematical estimation method,

### characterised in that

- in the weighted sum for the exit traffic volume ( $q_j^{out}(k)$ ) of a given measuring interval ( $k$ ), the entry traffic volumes ( $q_i^{in}(n)$ ) of a plurality (z) of preceding measuring intervals ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ) are taken into account,
- a forward-related turning rate ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) to be determined is produced as the sum of the corresponding turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) of the measuring intervals ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ) taken into account in the model

equation.

2. Method according to claim 1,

**characterised in that**, for at least one backward-related subnetwork (bw) of the road network for which measurement cross-sections at an entry (j) and at exits (i) of the subnetwork (bw) are taken into account, a model equation is

formulated in which the entry traffic volume ( $q_{ij}^{in}(k)$ ) is set as the weighted sum of the exit traffic volumes

( $q_{i1}^{out}(k)$ ) and the weighting factors correspond to the backward-related turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) specifying

in each case the portion of an exit traffic volume ( $q_{i1}^{out}(k)$ ) that has flowed in through the entry (j) taken into account,

- wherein the turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) are calculated by means of a mathematical estimation method on the basis of the model equation,

- wherein the exit traffic volumes ( $q_{i1}^{out}(n)$ ) of a plurality (z) of subsequent measuring intervals ( $n = k, k+1, k+2, \dots, k+z-1$ ) are taken into account in the weighted sum for the entry traffic volume ( $q_{ij}^{in}(k)$ ) of a given measuring interval (k),

- and wherein a backward-related turning rate ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) to be determined is produced as the sum of the corresponding turning rates ( $m_{i1}^{bw}(n)$ ) of the measuring intervals ( $n = k, k+1, k+2, \dots, k+z-1$ ) taken into account in the model equation.

3. Method according to claim 1 or 2,

**characterised in that** an extended Kalman filter is used in the mathematical estimation method.

4. Method according to one of claims 1 to 3,

**characterised in that** the estimation process is interrupted if a traffic overload is detected at a measurement cross-section.

5. Method for determining turning rates at an intersection of the road network,

**characterised in that** forward-related and/or backward-related subnetworks (fw, bw) around the intersection are considered for which measurement cross-sections in the entries (j, i) and exits (l, j) of the intersection are taken into

account, and that the turning rates ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ,  $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) are determined by means of a method according to one of claims 1 to 4.

6. Method for determining origin-destination traffic streams of a subnetwork,

**characterised in that** the turning rates for the entries and exits of the subnetwork are determined by means of a method according to one of claims 1 to 4, with measurement cross-sections only being taken into account at the edge of the subnetwork but not inside it, and that the origin-destination traffic streams for said subnetwork are calculated from the turning rates determined and the traffic volumes recorded.

7. Method according to claim 6,

**characterised in that** the number (z) of measuring intervals (n) taken into account is increased as the size of the subnetwork considered increases.

8. Method according to claim 6 or 7,

**characterised in that** the measuring intervals (n) to be taken into account are lengthened as the size of the subnetwork considered increases.

9. Method for determining the traffic volume on a roadway point of a road network,

**characterised in that** turning rates determined by means of a method according to one of claims 1 to 4 are provided for a subnetwork of the road network, one entry or exit of which has the roadway point and the other entries and/or exits of which have measurement cross-sections, and that the traffic volume at the roadway point of the one entry

or exit is calculated from the turning rates provided and the traffic volumes of the other entries and/or exits recorded at the measurement cross-sections.

10. Method according to claim 9,

**characterised in that** the traffic volume determined for the roadway point is used as a substitute value for a defective or failed measurement cross-section.

11. Method for determining the number of vehicles within a roadway section at whose first end point the traffic volume is recorded at a measurement cross-section and at whose second end point no measurement cross-section is disposed,

**characterised in that** the traffic volume at the second end point, and from it the number of vehicles in the roadway section, is determined by means of a method according to claim 9 or 10 by time integration of the difference between the traffic volume flowing into the roadway section and the traffic volume flowing away from same.

12. Method for determining correction factors for turning rates determined by means of a method according to one of claims 1 to 4,

**characterised in that** a homogeneous equation system for the correction factors ( $f_i$ ) to be determined is first formulated from the vehicle conservation of the actual forward- and backward-related turning rates, that an optimisation problem is then obtained from the homogeneous equation system together with a constraint eliminating the trivial solution, and that the correction factors ( $f_i$ ) emerge as a solution of the optimisation problem.

13. Method according to claim 12,

**characterised in that** the correction factors ( $f_i$ ) determined are divided by their median value.

14. Method according to claim 12 or 13,

**characterised in that** a road network subnetwork under consideration is subdivided into island networks, with each island network having measurement cross-sections only at its edge, and that correction factors ( $f_i$ ) are determined for the island networks.

15. Method according to one of claims 12 to 14,

**characterised in that** it is checked whether the correction factors ( $f_i$ ) determined lie within a predefinable value range.

16. Method according to one of claims 12 to 15,

**characterised in that** for solving the optimisation problem a parameter (P) is calculated whose value is used as a measure of the estimation quality of the turning rates  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k), \hat{m}_{ij}^{fw}(k))$ .

17. Method according to claim 16,

**characterised in that** an error message is issued if the value of the parameter (P) exceeds a predefinable threshold.

18. Method according to one of claims 12 to 17,

**characterised in that** two correction factors are determined for each measurement cross-section shared by two adjacent island networks, and that the correction factors of one island network in each case are scaled such that the correction factors of common measurement cross-sections approximate to one another.

19. Method according to one of claims 12 to 18,

**characterised in that** the traffic volumes  $(q_{1i}^{in}(k), q_{1j}^{out}(k))$  recorded at the measurement cross-sections and the turning rates  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k), \hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  determined by estimation are preferably calibrated by means of the correction factors ( $f_i$ ).

## Revendications

1. Procédé de détermination de taux de changement de direction  $(\hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  dans un réseau routier, procédé dans lequel

- des intensités de trafic ( $q(k)$ ) sont détectées au niveau de sections de mesure à des intervalles de mesure prescrits ( $k$ ),
- l'on applique à au moins une partie en avant (fw) du réseau routier, dans laquelle des sections de mesure sont prises en compte au niveau d'une sortie (j) et d'entrées (i) de la partie de réseau (fw), une équation de modélisation, dans laquelle les intensités de trafic de sortie ( $q_j^{out}(k)$ ) sont formées par la somme pondérée des intensités de trafic d'entrée ( $q_j^{in}(k)$ ) et les facteurs de pondération correspondent aux taux de changement de direction en avant ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) qui indiquent chacun la part d'une intensité de trafic d'entrée ( $q_j^{in}(k)$ ) qui sort par la sortie considérée (j),
- et les taux de changement de direction en avant ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) sont calculés à partir de l'équation de modélisation au moyen d'un procédé d'évaluation mathématique,

#### caractérisé en ce que

- l'on tient compte, dans la somme pondérée des intensités de trafic de sortie ( $q_j^{out}(k)$ ) d'un intervalle de mesure donné ( $k$ ), des intensités de trafic d'entrée ( $q_j^{in}(k)$ ) d'une pluralité d'intervalles de mesure précédents ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ),
  - un taux de changement de direction en avant ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) à déterminer est obtenu sous la forme d'une somme des taux de changement de direction correspondants ( $\hat{m}_{ij}^{fw}(k)$ ) de l'intervalle de mesure ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ) pris en compte dans l'équation de modélisation.
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'on applique à au moins une partie en arrière (bw) du réseau routier, dans laquelle des sections de mesure sont prises en compte au niveau d'une entrée (j) et de sorties (i) de la partie de réseau (bw), une équation de modélisation, dans laquelle les intensités de trafic d'entrée ( $q_j^{in}(k)$ ) sont formées par la somme pondérée des intensités de trafic de sortie ( $q_j^{out}(k)$ ) et les facteurs de pondération correspondent aux taux de changement de direction en arrière ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) qui indiquent chacun la part d'une intensité de trafic de sortie ( $q_j^{out}(k)$ ) qui entre par l'entrée considérée (j),
- les taux de changement de direction ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) étant calculés à partir de l'équation de modélisation au moyen d'un procédé d'évaluation mathématique,
  - en tenant compte, dans la somme pondérée des intensités de trafic de sortie ( $q_j^{in}(k)$ ) d'un intervalle de mesure donné ( $k$ ), des intensités de trafic d'entrée ( $q_j^{out}(k)$ ) d'une pluralité d'intervalles de mesure précédents ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ),
  - et un taux de changement de direction en arrière ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) à déterminer étant obtenu sous la forme d'une somme des taux de changement de direction correspondants ( $\hat{m}_{ij}^{bw}(k)$ ) de l'intervalle de mesure ( $n = k, k-1, k-2, \dots, k-z+1$ ) pris en compte dans l'équation de modélisation.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** l'on utilise un filtre de Kalman étendu dans le procédé d'évaluation mathématique.
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** le procédé d'évaluation est interrompu

lorsqu'un encombrement du trafic est détecté au niveau d'une section de mesure.

- 5 5. Procédé de détermination de taux de changement de direction en un point nodal du réseau routier, **caractérisé en ce que** l'on prend en compte autour du point nodal des parties de réseau en avant et/ou en arrière (fw, bw) dans lesquelles l'on tient compte des sections de mesure dans les entrées (j, i) et sorties (i, j) du point nodal, et **en ce**  
 10 **que** les taux de changement de direction  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k), \hat{m}_{ij}^{fw}(k))$  sont déterminés en se fondant sur le procédé selon les revendications 1 à 4.
- 15 6. Procédé de détermination de flux de trafic source-cible d'une partie de réseau, **caractérisé en ce que** l'on détermine les taux de changement de direction pour les entrées et sorties de la partie de réseau en se fondant sur un procédé selon l'une des revendications 1 à 4, des sections de mesure n'étant prises en compte qu'au bord de la partie de réseau et non à l'intérieur de celle-ci, et **en ce que** l'on calcule les flux de trafic source-cible pour cette partie de réseau à partir des taux de changement de direction déterminés et des intensités de trafic détectées.
- 20 7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel le nombre (z) des intervalles de mesure considérés (n) augmente proportionnellement à l'augmentation de la taille de la partie de réseau considérée.
- 25 8. Procédé selon la revendication 6 ou 7, **caractérisé en ce que** les intervalles de mesure considérés (n) s'allongent proportionnellement à l'augmentation de la taille de la partie de réseau considérée.
- 30 9. Procédé de détermination de l'intensité de trafic au niveau d'une section de voie de circulation du réseau routier, **caractérisé en ce que**, pour une partie du réseau routier dont une entrée ou sortie comporte la section de voie de circulation et dont les autres entrées et/ou sorties comportent des sections de mesure, on délivre des taux de changement de direction déterminés en se fondant sur un procédé selon l'une des revendications 1 à 4, et **en ce**  
 35 **que**, à partir des taux de changement de direction délivrés et des intensités de trafic, détectées au niveau des sections de mesure, des autres entrées et/ou sorties, l'on calcule l'intensité de trafic au niveau de la section de voie de circulation de l'entrée respectivement de la sortie.
- 40 10. Procédé selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** l'intensité de trafic, déterminée pour la section de voie de circulation, est utilisée comme valeur de remplacement d'une section de mesure qui est en panne ou qui n'est pas en fonction.
- 45 11. Procédé de détermination du nombre de véhicules à l'intérieur d'une portion de voie de circulation au premier point d'extrémité de laquelle on détecte l'intensité de trafic au niveau d'une section de mesure et au deuxième point d'extrémité de laquelle il n'y a pas de section de mesure, **caractérisé en ce que** l'on détermine l'intensité de trafic au deuxième point d'extrémité en se fondant sur un procédé selon la revendication 9 ou 10 et, à partir de là, on détermine le nombre de véhicules dans la portion de voie de circulation en intégrant par rapport au temps la différence entre l'intensité de trafic à l'entrée de la portion de voie de circulation et l'intensité de trafic en sortie de celle-ci.
- 50 12. Procédé de détermination de facteurs de correction des taux de changement de direction déterminés en se fondant sur un procédé selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** l'on forme tout d'abord un système d'équations homogène à partir du nombre de véhicules obtenu des taux de changement de direction réels en avant et en arrière pour les facteurs de correction ( $f_i$ ) à déterminer, **en ce que** l'on obtient ensuite un problème d'optimisation à partir du système d'équations homogènes conjointement avec une conditions secondaire excluant la solution triviale et **en ce que** les facteurs de correction ( $f_i$ ) sont obtenus sous la forme d'une solution du problème d'optimisation.
- 55 13. Procédé selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** les facteurs de correction ( $f_i$ ) déterminés sont divisés par leur valeur médiane.
14. Procédé selon la revendication 12 ou 13, **caractérisé en ce qu'**une partie de réseau considérée du réseau routier est décomposée en îlots de réseau, chaque îlot de réseau ne comportant que des sections de mesure au niveau de son bord de réseau, et **en ce que** l'on détermine des facteurs de correction ( $f_i$ ) pour les îlots de réseau.
15. Procédé selon l'une des revendications 12 à 14, **caractérisé en ce que** l'on vérifie si les facteurs de correction déterminés ( $f_i$ ) se trouvent à l'intérieur d'une plage de valeurs prescrites.



16. Procédé selon l'une des revendications 12 à 15, **caractérisée en ce que** l'on calcule dans la solution du problème d'optimisation une grandeur (P) dont la valeur est utilisée comme mesure de la qualité de l'évaluation des taux de changement de direction  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k), \hat{m}_{ij}^{fw}(k))$ .

5

17. Procédé selon la revendication 16, **caractérisé en ce qu'un** message d'erreur est délivré lorsque la valeur de la grandeur (P) dépasse une limite prescrite.

10

18. Procédé selon l'une des revendications 12 à 17, **caractérisé en ce que** l'on détermine deux facteurs de correction pour chaque section de mesure que divise deux îlots de réseau adjacents, et **en ce que** les facteurs de correction de chaque îlot de mesure sont mis à l'échelle de telle sorte que les facteurs de correction de sections de mesure commune se compense l'un l'autre.

15

19. Procédé selon l'une des revendications 12 à 18, **caractérisé en ce que** les intensités de trafic  $(q_j^{in}(k), q_j^{out}(k))$ , détectées au niveau des sections de mesure, et les taux de changement de direction  $(\hat{m}_{ij}^{bw}(k), \hat{m}_{ij}^{fw}(k))$ , déterminés par évaluation, sont calibrés par les facteurs de correction  $(f_i)$ .

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

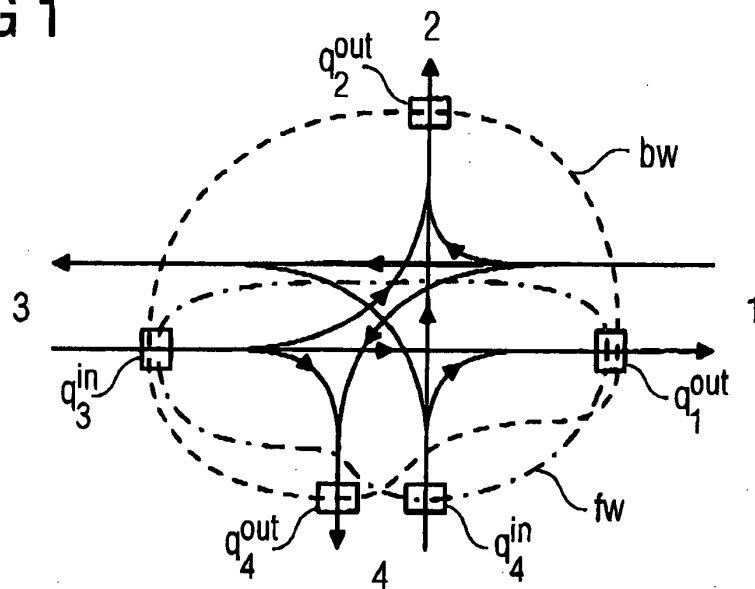


FIG 2

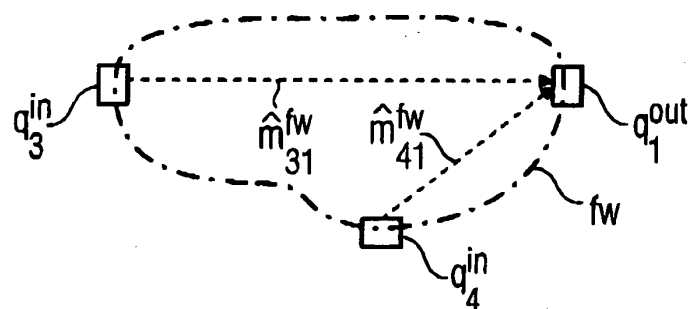


FIG 3

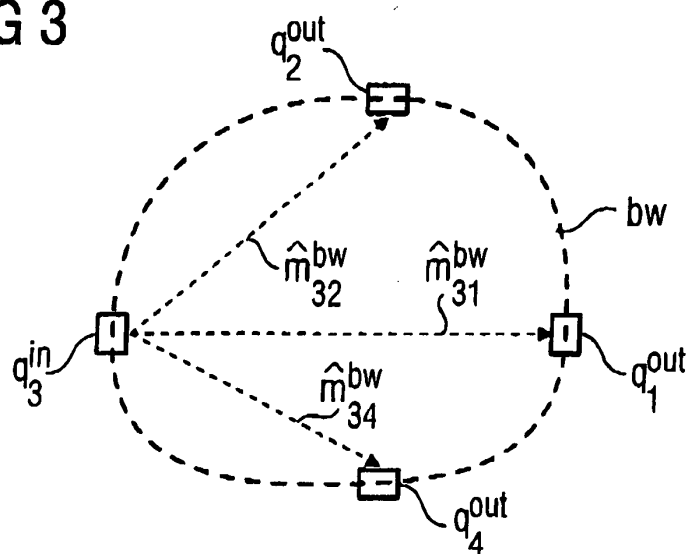


FIG 4

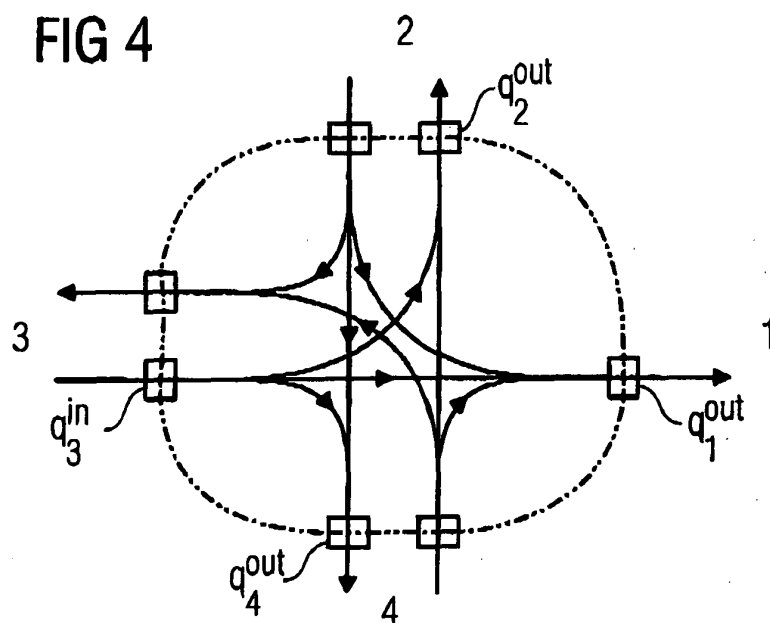
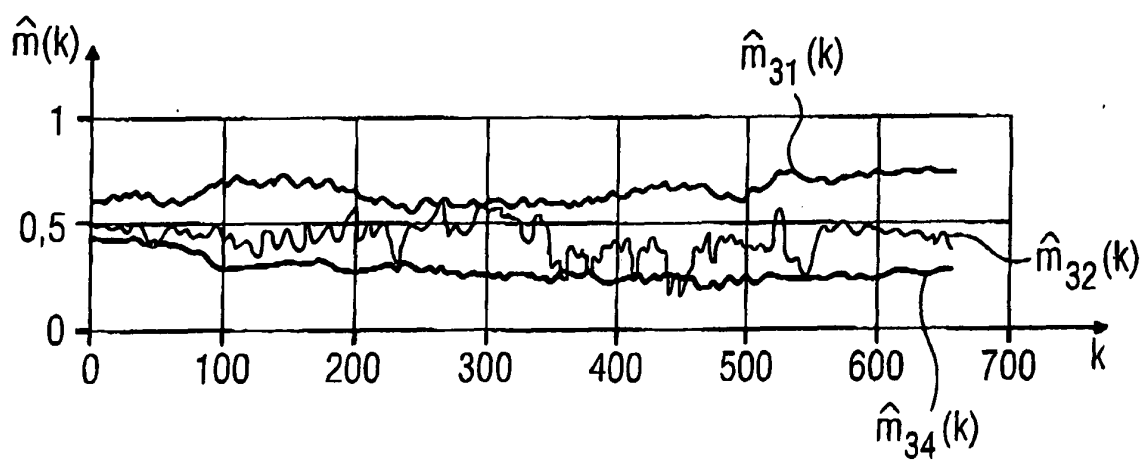


FIG 5



## IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Ein Verfahren zur gekoppelten Schätzung von Kantenumlastungen, Abbiegequoten und Störungen in Stadtstraßennetzen. Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik. Technische Universität Hamburg-Harburg, Mai 2001 [0003]