



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
16.12.1998 Patentblatt 1998/51

(51) Int. Cl.⁶: G08G 1/01

(21) Anmeldenummer: 98250194.2

(22) Anmeldetag: 04.06.1998

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder:
Fastenrath, Ulrich, Dr. Dipl.-Phys.
40549 Düsseldorf (DE)

(30) Priorität: 12.06.1997 DE 19725556

(74) Vertreter:
Presting, Hans-Joachim, Dipl.-Ing. et al
Meissner & Meissner
Patentanwaltsbüro
Hohenzollerndamm 89
14199 Berlin (DE)

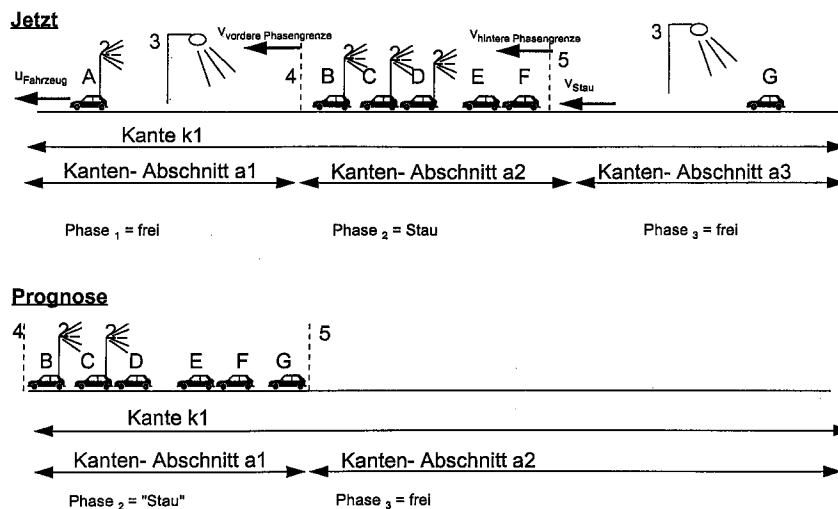
(71) Anmelder:
MANNESMANN Aktiengesellschaft
40213 Düsseldorf (DE)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Verkehrszustandsprognose**

(57) Mit einem Verfahren zur Prognose des Verkehrszustandes aufgrund von durch Detektoren erfaßten, den aktuellen Verkehr betreffenden Detektionsdaten, welche von den Detektoren gemäß einem eingestellten oder einstellbaren Meldeverhalten an eine Zentrale übermittelt werden, wobei die Zentrale aus der Vielzahl der eingehenden Meldungen eine Beschreibung des aktuellen Verkehrszustandes des Verkehrsnetzes in Form des Verkehrsnetz überdeckender, jeweils den Stauzustand in einer Kante oder einem

Kantenabschnitt repräsentierender Verkehrsphasen bestimmt und wobei die Zentrale für einen künftigen Zeitpunkt eine Beschreibung des Verkehrszustandes des Verkehrsnetzes durch Berechnung zumindest der Bewegungen und der zukünftigen Positionen der Verkehrsphasen im Verkehrsnetz prognostiziert, läßt sich einfach und effizient mit relativ niedriger Rechenleistung eine gute Prognose des Verkehrszustandes erreichen.

Fig. 1



Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Prognose des Verkehrszustandes aufgrund von durch Detektoren erfaßten, den aktuellen Verkehrszustand betreffenden Detektionsdaten, welche von den Detektoren gemäß einem eingestellten oder einstellbaren Meldeverhalten an eine Zentrale übermittelt werden

Aus "Adolf Mayo 'Traffic Flow Fundamentals', Eastwood Cliffs 1990" ist ein Verfahren zur Verkehrsanalyse und Verkehrsprognose aufgrund von stationären Erfassungseinrichtungen gelieferten und damit punktbezogenen Daten wie der lokalen Geschwindigkeit oder der Verkehrsstärke bekannt.

Ein derartiges Verfahren ist jedoch sehr rechenintensiv. Insbesondere ist es zur Verarbeitung von Daten von mobilen Erfassungseinrichtungen nicht geeignet. Die numerische Lösung von Differentialgleichungen, Intervalarithmetik oder sogar die Modellierung des Verhaltens einzelner Fahrzeuge wären erforderlich. Hiervon ausgehend ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung die Schaffung eines zur Prognose des Verkehrszustandes insbesondere aufgrund von durch mobile Erfassungseinrichtungen ("floating cars") ermittelten Verkehrsdaten geeigneten, effizienten Verfahrens und einer Vorrichtung hierzu.

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß dem unabhängigen Verfahrensanspruch 1 und eine Zentrale nach dem unabhängigen Vorrichtungsanspruch 16 gelöst.

Das erfindungsgemäße Verfahren basiert im Grunde auf der Zuweisung von Phasen zu Kanten oder Kantenabschnitten des Verkehrsnetzes, wobei eine Prognose des Verkehrszustandes aufgrund der Berechnung der Bewegung dieser Phasen im Verkehrsnetz erstellt wird. Dabei werden als Kanten jeweils zwischen zwei Kreuzungen oder Einmündungen befindliche Abschnitte einer Straße, als Kantenabschnitte Teile von Kanten und als Knoten Kreuzungen, Abfahrten und Einmündungen bezeichnet. Das erfindungsgemäße Verfahren arbeitet sehr effizient. Es liefert bei relativ geringer Rechenleistung gute Ergebnisse aufgrund von Daten von mobilen Erfassungseinrichtungen (= "FCD = floating car data"), kann aber auch sehr effizient Daten von stationären, beispielsweise neben einer Straße montierten Detektoren und/oder eine vorhandene, vorzugsweise dynamische OD-Matrix (origin-destination-matrix), welche angibt, wieviele Fahrzeuge von welchem Ausgangsort wann zu welchem Ziel fahren, zur Prognose verwenden.

Die vom erfindungsgemäßen Verkehrszustands-Prognoseverfahren verwendeten Phasen beschreiben mit diskreten Werten den Verkehrszustand in einer Kante oder einem Kantenabschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt. Eine Phase kann dabei im einfachsten, die größte Quantisierung aufweisenden Fall binär (also "frei", "gestaut") beschrieben werden. Eine Phasenbeschreibung mit höherer Auflösung, insbesondere in fünf Stufen (z.B. "frei", "lebhaft", "dicht", "zäh", "gestaut") ist ebenfalls möglich. Dabei wird zweckmäßig angenommen, daß jede Phase ihren Zustand (z.B. "frei") zeitlich unverändert beibehält. Zur Prognose des künftigen Verkehrszustandes wird die Geschwindigkeit der Bewegung der Phasengrenzen berechnet. Dabei entspricht eine vordere Phasengrenze z. B. einem Stauanfang und eine hintere Phasengrenze einem Stauende.

Wenn sich die vordere Phasengrenze und die hintere Phasengrenze einer Phase (also Stauanfang und Stauende oder umgekehrt) mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen, verändert sich die Größe einer Phase. Phasen können somit größer oder kleiner, im Extremfall bis zur Länge Null, werden. Somit kann erfindungsgemäß auch die Veränderung der Größen von Phasen zur Prognose des zukünftigen Verkehrszustandes verwendet werden.

Die aktuelle Verkehrssituation wird zweckmäßig durch disjunkte, das Verkehrsnetz vollständig überdeckende Phasen beschrieben, um eine Verkehrszustandsprognose des Gesamtnetzes zu ermöglichen. Dabei wird vorzugsweise in Kanten oder Kantenabschnitten, in welchen, beispielsweise weil sich keine Fahrzeuge in dieser Kante befinden, keine aktuellen Detektionsdaten vorliegen, die Phase als "frei" oder entsprechend der letzten Detektionsdaten aus diesem Abschnitt angenommen, um eine vollständige, aktuelle Verkehrszustandsbeschreibung zu erhalten und eine vollständige Verkehrszustandsprognose zu erlauben, da diese Annahme die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zutreffende ist.

Die Berechnung der zur Prognose zu verwendenden Phasengrenzengeschwindigkeiten jeder Phase können in Abhängigkeit von der Art der vorliegenden Daten nach den folgenden Verfahren berechnet werden:

Wenn nur Detektionsdaten von im Verkehr mitschwimmenden Detektoren vorliegen, erfolgt nach einer Ausgestaltung der Erfindung die Berechnung der Phasengrenzengeschwindigkeiten der Phasen aufgrund der aktuellen Detektionsdaten und der vorherigen Detektionsdaten z.B. durch lineare Regression. Es ist möglich, zu zwei Zeitpunkten den Ort einer Phasengrenze zu bestimmen und aus Ort und Zeit die Phasengrenzengeschwindigkeit zu bestimmen.

Ferner ist es möglich, die Detektionsdaten von stationären Detektoren zumindest in bestimmten Ortsbereichen zur Berechnung der Phasengrenzengeschwindigkeit zu verwenden. Dies erfordert relativ geringe Rechenleistung. Dabei wird eine Phasengrenzengeschwindigkeit zweckmäßig als Quotient aus der Differenz des Zuflusses und Abflusses an der Phasengrenze und aus der Differenz der Dichten vor und hinter der Phasengrenze ($v = \Delta \Phi / \Delta \rho$) berechnet. Dabei können die Flüsse (Einheit: Fahrzeuge pro Zeit) vor und hinter der Phasengrenze direkt den von einer stationären Detektionseinrichtung gelieferten Detektionsdaten entnommen werden. Die Dichtedifferenz an der Phasengrenze kann mit Hilfe der lokalen Approximation: "Fluß = Dichte * mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit" ($\Phi = \rho * u$) gewonnen werden.

Flüsse (Φ) werden zweckmäßig aus FCD geschätzt, stationär gemessen oder aus einer mit unabhängigen Methoden geschätzten, vorzugsweise dynamischen OD-Matrix (origin-destination-matrix = Matrix, die angibt, wann wieviele Fahrzeuge von welchem Anfang zu welchem Ziel fahren) erhalten.

Der Verkehrszustand in Kantenabschnitten, in welche Phasengrenzen nur entlang einer Kante eintreten, also in Kantenabschnitten, in welche keine Phasen über einen Knoten (= Kreuzung, Einmündung) hinweg eintreten, wird zweckmäßig aufgrund der Phasengrenzengeschwindigkeiten berechnet. Dabei wird vorzugsweise für jede Phasengrenze aufgrund ihres aktuellen Ortes und ihrer Phasengrenzengeschwindigkeit ihr Ort zum Prognosezeitpunkt berechnet und den Kantenabschnitten zwischen Phasenanfang und Phasenende zum Prognosezeitpunkt der Phasen-zustand dieser Phase zugewiesen.

Wenn aufgrund des prognostizierten Ortes einer Phasengrenze festgestellt wird, daß sich eine Phase über einen Knoten hinweg, also über das Ende einer Kante hinaus ausbreitet, werden die Phasengrenzengeschwindigkeiten der sich aus dieser Phase ergebenden Teil-Phasen in den anderen an diesem Knoten anliegenden Kanten aufgrund der Phasengeschwindigkeit der sich über den Knoten ausbreitenden Phase vor dem Knoten und jeweils dem Fluß in einer am Knoten anliegenden Kante bei Stau und ohne Stau berechnet. Dies ermöglicht eine realistische Stauausbreitungsprognose über einen Knoten hinweg durch Einbeziehung der Flüsse im Knoten bei Stau und ohne Stau. Zweckmäßig wird dabei die Phasengrenzengeschwindigkeit in einer Kante aus dem Quotient aus der Differenz der Flüsse in dieser Kante mit und ohne Stau und der Differenz des Verhältnisses des Flusses in der Kante ohne Stau zur Geschwindigkeit in der Kante ohne Stau und dem Verhältnis des Flusses in der Kante bei Stau und der Geschwindigkeit in der Kante ohne Stau berechnet, wobei zweckmäßig die Geschwindigkeit in der Kante bei Stau angenommen wird als Minimum aus der Geschwindigkeit der Fahrzeuge bei Stau in der Kante, aus welcher sich eine Phase über den Knoten hinweg ausbreitet und der Hälfte des Produkts aus der Fahrzeuggeschwindigkeit in der Kante und dem Verhältnis der Summe der vom Knoten abfließenden zur Summe der zum Knoten zufließenden Flüsse. Ferner wird zweckmäßig für den Fluß in einer Kante bei Stau das Produkt aus dem Fluß in der Kante ohne Stau und dem Verhältnis der Summe der vom Knoten abfließenden Flüsse zur Summe der zum Knoten zufließenden Flüsse verwendet.

Damit läßt sich aus den vorhandenen Größen realitätsnah die jeweilige Phasengrenzengeschwindigkeit, also beispielsweise die Geschwindigkeit der Fortbewegung eines Stauendes, hinter einem Knoten berechnen. Die Position einer Phasengrenze zum Prognosezeitpunkt ergibt sich aus dem Produkt der Phasengrenzengeschwindigkeit und der Zeit zwischen jetzt und dem Prognosezeitpunkt. Den Kantenabschnitten, welche räumlich zwischen den beiden prognostizierten Phasengrenzen einer Phase liegen, wird die jeweilige Phase ("frei" oder "gestaut" etc.) zugewiesen, was eine einfache und effiziente Prognose von Phasen von Kantenabschnitten bei Phasenausbreitungen über Knoten hinweg ermöglicht.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der Zeichnung. Dabei zeigt

- 35 Fig. 1 schematisch eine in mehrere Kantenabschnitte unterteilte Straße mit darauf fahrenden Fahrzeugen zum jetzigen und zum Prognosezeitpunkt,
- Fig. 2 ebenfalls eine Straße zum jetzigen und zum Prognosezeitpunkt, wobei sich die jetzige Stauphase vergrößert,
- 40 Fig. 3 schematisch eine Kreuzung, über welche hinweg in ihre Zuflüsse sich ein Stau zurückstaut,
- Fig. 4 als Flußdiagramm ein Beispiel der Berechnung des Phasenzustandes eines Verkehrsnetzes in Abhängigkeit von der Art der vorliegenden Detektionsdaten und
- 45 Fig. 5 als Blockschaltbild eine Verkehrsüberwachungszentrale, ein Fahrzeug und deren Kommunikation.

Fig. 1 zeigt eine Straße 1, auf welcher sich in Richtung des mit u_{Fahrzeug} bezeichneten Pfeiles Fahrzeuge A, B, C, D, E, F, G fortbewegen. Im folgenden werden Kreuzungen und Einmündungen von Straßen als Knoten und zwischen zwei Knoten befindliche Teile von Straßen als Kanten bezeichnet. Entsprechend wird in Fig. 1 der zwischen zwei nicht dargestellten Knoten befindliche Abschnitt einer Straße 1 als Kante k_1 bezeichnet. Zur weiteren Unterteilung kann eine Kante k_1 in Kantenabschnitte a_1, a_2, a_3 unterteilt sein.

Aus der in Fig. 1 oben für den jetzigen Zeitpunkt beispielhaft für die Kante 1 dargestellten Verkehrssituation soll für einen künftigen Zeitpunkt eine Prognose der in Fig. 1 unten beispielhaft für die Kante 1 dargestellten Verkehrssituation erfolgen. Dazu wird der aktuelle, in Fig. 1 oben beispielhaft für die Kante 1 dargestellte Verkehrszustand aufgrund von durch Detektoren erfaßten Detektionsdaten in einer Zentrale in Form von das Verkehrsnetz überdeckenden, jeweils den Stauzustand in einer Kante repräsentierenden Verkehrsphasen bestimmt und für einen künftigen Zeitpunkt eine Beschreibung des Verkehrszustandes des Verkehrsnetzes durch Berechnung der Bewegungen und damit der zukünftigen

tigen Positionen sowie überdies der Größenveränderungen der Verkehrsphasen prognostiziert.

Dabei können Detektionsdaten über den aktuellen Verkehrszustand durch mobile Detektoren und/oder stationäre Detektoren gemessen werden. In jedem Fall ist die Art der vorliegenden Daten orts- und zeitabhängig. Als mobile Detektoren können alle oder einige Fahrzeuge eingesetzt werden, wobei in Fig. 1 oben beispielhaft die Fahrzeuge A, B, C und D jeweils mit einer Antenne 2 ausgestattet sind, von welcher Verkehrsdaten, insbesondere die über den Geschwindigkeitsmesser eines Fahrzeuges erfaßbare Fahrzeuggeschwindigkeit u_{Fahrzeug} und auch eine z.B. über GPS (global positioning system) erfaßbare Position an eine hier nicht dargestellte Zentrale, z.B. in regelmäßigen Zeitabständen, zu bestimmten Zeiten, auf Anfrage durch die Zentrale und/oder bei bestimmten Ereignissen, wie Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit oder Veränderung der Geschwindigkeitsvarianz übertragen werden. Da die Detektoren bei diesem Verfahren mit den Fahrzeugen, in welchen sie angeordnet sind, m Verkehr mitschwimmen, werden die mit diesem Verfahren erhaltenen Daten auch als FCD (floating car data) bezeichnet. Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, durch über oder neben einer Straße angeordnete stationäre Detektoren 3 Detektionsdaten zu erhalten.

Es hängt von der Art der gewählten Detektion ab, welche Art von Daten erhalten werden. Durch mobile Detektoren werden in der Regel Daten (FCD) über die Geschwindigkeit u_{Fahrzeug} und die Position $\text{Pos}_{\text{Fahrzeug}}$ unmittelbar erhalten. Stationäre Detektoren 3 liefern punktbezogen, also für einen bestimmten Punkt an einer Kante den aktuellen Fluß Φ und können, falls sie mit Geschwindigkeitsmeßeinrichtungen ausgestattet sind, überdies die lokale Fahrzeuggeschwindigkeit messen.

Aufgrund der Detektionsdaten wird nun abschnittsweise für Kanten oder Kantenabschnitte eine zugeordnete Phase definiert. Eine Phase kann bei einer binären Quantifizierung den Wert "frei" oder "gestaut" aufweisen. Bei einer 5-fachen Unterteilung können einer Phase beispielsweise die Werte "frei", "lebhaft", "dicht", "zäh", "gestaut" zugewiesen werden. Auch jede andere Quantifizierung ist möglich.

Aus von mobilen Detektoren 2 gewonnenen Detektionsdaten kann die Phase in einer Kante oder einem Kantenabschnitt, in welchem sich diese Detektoren befinden, beispielsweise aufgrund der mittleren Geschwindigkeit der detektierenden Fahrzeuge bestimmt werden. Eventuell kann die Geschwindigkeitsvarianz insbesondere zur genauen Phasenunterteilung herangezogen werden. So kann einem Kantenabschnitt, in welchem sich die Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit (und eventuell geringer zeitlicher Geschwindigkeitsschwankung) fortbewegen, die Phase "frei" zugeordnet werden und einem Kantenabschnitt, in welchem sich die Fahrzeuge mit niedriger Geschwindigkeit (und eventuell relativ hoher zeitlicher Geschwindigkeitsschwankung) fortbewegen, die Phase "gestaut" zugeordnet werden. Bei mehr als binärer Phasen-Quantifizierung ist es möglich, im durch Geschwindigkeit und Varianz der in einer Kante sich fortbewegenden Fahrzeuge aufgespannten Parameterraum geeignete Zustandsgrenzen zu definieren, welche von den hier diskutierten Phasengrenzen zu unterscheiden sind.

In Fig. 1 ergibt sich beispielsweise, daß im linken Kantenabschnitt a_1 sich das Fahrzeug A mit relativ hoher Geschwindigkeit (und eventuell niedriger Geschwindigkeitsschwankung) fortbewegt, so daß aufgrund der vom Fahrzeug A über die Antenne 2 an eine Zentrale gesendeten Daten in der Zentrale dem Kantenabschnitt a_1 die Phase "frei" zugeordnet werden kann. Im Kantenabschnitt a_2 ist zu vermuten, daß sich die Fahrzeuge B, C, D, E und F mit niedrigerer Geschwindigkeit (und höheren Geschwindigkeitsschwankungen) fortbewegen. Demgemäß ist zu erwarten, daß die mit einer Antenne 2 ausgestatteten Fahrzeuge B, C, D an eine Zentrale relativ niedrige Geschwindigkeit (und eventuell hohe Geschwindigkeitsschwankungen) melden. Die Zentrale würde demgemäß dem Kantenabschnitt a_2 die Phase "gestaut" zuordnen.

Im Kantenabschnitt 3 befindet sich nur das Fahrzeug G, welches jedoch nicht mit einer Antenne 2 ausgestattet ist, also keine Detektionsdaten an eine hier nicht gezeigte Zentrale übersendet. Also wird es bis zur späteren Detektion durch eine stationäre Detektionseinrichtung 3 nicht erfaßt. Deshalb nimmt die Zentrale z.B. den Fall an, nämlich daß sich im Kantenabschnitt a_3 nur wenige Fahrzeuge oder kein Fahrzeug befindet und ordnet diesem Kantenabschnitt a_3 den Phasenzustand "frei" zu. Alternativ ist es möglich, einem Kantenabschnitt oder einer Kante die Phase aufgrund der letzten gemessenen Detektionsdaten zuzuordnen.

Im oben ausgeführten Beispiel wurden festen Kantenabschnitten gleicher Länge auf einer Kante jeweils Phasen zugeordnet. Ferner ist es möglich, entlang einer Kante mit beliebiger Auflösung Phasen unterschiedlicher Länge zu definieren, indem beispielsweise zwischen zwei um mehr als einen Schwellwert beabstandeten Fahrzeugen die Phase "frei" angenommen wird und entlang einer beliebig langen Fahrzeugkolonne die Phase "Stau" angenommen wird.

Mangels vollständiger Daten kann auch das Alter der letzten Messung in einem bestimmten Streckenabschnitt ein Kriterium sein, dort den Zustand "frei" anzunehmen. In der Regel stehen Daten nur von einem kleinen Teil der Fahrzeuge zur Verfügung.

Aufgrund des in Fig. 1 oben dargestellten aktuellen Verkehrszustandes des Verkehrsnetzes soll nun eine Prognose berechnet werden, wie in Fig. 1 unten dargestellt.

Zur Prognose wird die erwartete Bewegung der Phasengrenzen jeder Phase innerhalb des Verkehrsnetzes verwendet, um die künftige Lage der Phasengrenzen und damit die Position und hier auch der Größe der Phasen zu einem zukünftigen Zeitpunkt zu bestimmen.

Eine Phase hat zwei Phasengrenzen, nämlich die in Fig. 1 oben links vom Fahrzeug B befindliche vordere Phasen-

grenze 4 und die in Fig. 1 oben rechts vom Fahrzeug F befindliche hintere Phasengrenze 5.

Die vordere Phasengrenze kann sich beispielsweise im Falle eines Unfalles an der Position des Fahrzeuges B in Fig. 1 mit der Geschwindigkeit $V_{\text{vordere Phasengrenze}} = \text{Null}$ bewegen, in welchem Falle sich die hintere Phasengrenze 5 in Fig. 1 oben nach rechts mit der Geschwindigkeit $V_{\text{hintere Phasengrenze}}$ bewegen würde, wobei sich die Länge der Phase 2 = "Stau" vergrößern würde.

Selten ist der Fall, daß der Stau, wie in Fig. 1 oben, durch niedrige Geschwindigkeiten der Fahrzeuge B, C etc. erzeugt wird, wobei sich die vordere Phasengrenze mit der Geschwindigkeit $V_{\text{vordere Phasengrenze}}$ in Bildrichtung nach links bewegt. Häufiger ist eine Bewegung der vorderen und hinteren Phasengrenze entgegen der Flußrichtung, also in Fig. 1 nach rechts.

Ferner fährt im in Fig. 1 dargestellten Beispiel das Fahrzeug G auf die Autokolonne B, C, E, F auf, so daß sich die Phase 2 nach hinten etwas verlängert, obwohl sie sich in Fahrtrichtung der Fahrzeuge fortbewegt.

Dabei ist die Geschwindigkeit v der Phasengrenzen von den Geschwindigkeiten u der Fahrzeuge zu unterscheiden.

In Fig. 2 ist ein weiteres Beispiel der aktuellen Verkehrssituation in Fig. 2 oben und in Fig. 2 unten der sich daraus entwickelnden künftigen Verkehrssituation dargestellt. In diesem Beispiel hat sich die vordere Phasengrenze 4 mit der Geschwindigkeit $v_{\text{vordere Phasengrenze}}$ nach links bewegt und die hintere Phasengrenze, also das Stauende mit der Geschwindigkeit $v_{\text{hintere Phasengrenze}}$ nach rechts bewegt.

Die Fahrzeuge B, C aus der Phase 6 in Fig. 2 oben sind in Fig. 2 unten bereits nach links aus dem Stau herausgefahren.

Obige Beispiele veranschaulichen, daß aufgrund des aktuellen Verkehrszustandes eine Prognose des künftigen Verkehrszustandes möglich ist, wenn die Geschwindigkeiten $V_{\text{stau}} = v_{\text{vordere Phasengrenze}}$ und $V_{\text{stau}} = v_{\text{hintere Phasengrenze}}$ berechnet werden, mit welchen sich jeweils eine Phase fortbewegt. Aus den berechneten Phasengrenzengeschwindigkeiten läßt sich dann zumindest längs einer Kante für eine Prognose der Ort der Phasengrenze zum Prognosezeitpunkt aus der Beziehung "Weg = Geschwindigkeit mal Zeit" und dem aktuellen Ort der Phasengrenze bestimmen. Mit der Berechnung der beiden prognostizierten Phasengrenzen ist die prognostizierte Phase definiert.

Die Berechnung der Geschwindigkeit einer Phasengrenze hängt von der Art der vorliegenden Daten ab.

Liegen nur Daten von mobilen Detektoren (FCD) vor, so kann $v_{\text{vordere Phasengrenze}}$ und $v_{\text{hintere Phasengrenze}}$ z.B. durch lineare Regression aus den Positionen der Phasengrenzen zu verschiedenen Zeiten berechnet werden. Falls überdies Daten (Φ) von stationären Quellen vorliegen, können die Phasengrenzengeschwindigkeiten v aus der Beziehung $v = \Delta \Phi / \Delta \rho$ ($\Delta \Phi = \text{Abfluß von der Phasengrenze minus Zufluß zur Phasengrenze}$; $\Delta \rho = \text{Dichte auf der Abflußseite der Phasengrenze minus Dichte auf der Zuflußseite der Phasengrenze}$) berechnet werden; hier kann mit je einem Detektor vor und hinter der Staufront die lokale Dichtedifferenz $\Delta \rho$ aus der Beziehung $\Delta \rho = \Phi_{\text{Detektor 1}} / u_{\text{Detektor 1}} - \Phi_{\text{Detektor 2}} / u_{\text{Detektor 2}}$ (u = mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeug an dieser Position) berechnet werden.

Mit den zu erhaltenden Geschwindigkeiten v der Phasengrenzen ist damit, wie oben ausgeführt, eine Prognose der Phasen-Bewegung längs einer Kante möglich.

Jedoch kann sich aus dem wie oben berechneten Produkt der Geschwindigkeit der betrachteten Phasengrenze und der Zeitdifferenz zwischen jetzt und dem Prognosezeitpunkt, also aus dem derart prognostizierten Phasengrenzenort, auch ergeben, daß sich eine Phase über einen Knoten, also eine Kreuzung, einen Zufluß zur Straße oder einen Abfluß von der Straße hinwegbewegt. In diesem Falle ist eine Betrachtung der Kanten, welche mit dem Knoten verbunden sind, über welchen sich die betrachtete Phase hinwegbewegt, erforderlich.

Fig. 3 zeigt dabei beispielhaft einen schraffiert dargestellten Stau in der oberen Kante k_1 , welcher die in (durch dicke Pfeile in den Kanten jeweils angedeuteter) Fahrtrichtung vordere Phasengrenze 4 und die hintere Phasengrenze 5 aufweist. Dabei bewegen sich die Fahrzeuge im Stau in Richtung des dicken Pfeiles in der schraffierten Fläche mit der Geschwindigkeit u_{Fahrzeug} fort. Die hintere Staugrenze 5 bewege sich, weil beispielsweise mehr Fahrzeuge auf die Staugrenze von hinten auffahren ($\Sigma \Phi_{\text{zu}}$ in Fig. 4) als von der Staugrenze 5 nach vorne wegfahren können ($\Sigma \Phi_{\text{ab}}$ in Fig. 4), entgegen der Richtung des dicken Pfeiles, also in Richtung des neben der oberen Kante 1 angedeuteten schmalen Pfeiles mit der Geschwindigkeit $v_{\text{hintere Phasengrenze}}$ auf die Kreuzung zu.

Bei Rückstau aus der Kante k_1 in die Kreuzung hinein ist zu erwarten, daß in der unteren Kante k_3 und der linken Kante k_4 , aus welchen sich Fahrzeuge auf die Kreuzung zubewegen, ebenfalls Rückstau in Form einer Bewegung einer hinteren Phasengrenze einer "Stau"-Phase entgegen der Fahrtrichtung in diesen Kanten ausbreitet.

Hierzu soll nun wieder die Phasengrenzengeschwindigkeit der hinteren Phase 5 in den Kanten 3 und 4 berechnet werden. Mit der oben angegebenen bekannten Beziehung $v = \Delta \Phi / \Delta \rho$ und $\Phi = \rho * u$ ergibt sich somit für die Geschwindigkeit $v_{\text{hintere Phasengrenze}}$ in den Kanten 3 und 4 folgende Beziehung, in welcher in einer Kante k jeweils der auf die hintere Phasengrenze zufließende Fluß als Φ_k und der von der hinteren Phasengrenze in Staurichtung abfließende Fluß als Φ_k^s und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante k vor dem Erreichen der hinteren Phasengrenze als u_k und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante k (also k_3 oder k_4) in Fahrtrichtung nach der hinteren Phasengrenze, also im Stau, als u_k^s bezeichnet wird:

$$v_k = (\Phi_k - \Phi_k^s) / (\Phi_k / u_k - \Phi_k^s / u_k^s), k = 3 \text{ oder } 4.$$

5 Dabei werden die Variablen in dieser Formel z.B. folgendermaßen bestimmt: Φ_k , also der Fluß in einer Kante k (k_3 oder k_4) vor dem Erreichen des Staus, kann mit stationären Detektoren gemessen werden, aus FCD geschätzt werden oder einer mit unabhängigen Methoden geschätzten dynamischen OD-Matrix entnommen werden. Ferner kann, wenn ausschließlich FCD-Daten vorliegen, ein Fluß Φ aus der Beziehung $\Phi = \rho * u$ bestimmt werden, wobei die Dichte mittels der Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung des Fundamentaldiagramms $\rho = \rho(u)$ aufgrund der mit mobilen Detektoren gemessenen Geschwindigkeit u_{Fahrzeug} bestimmt werden kann.

10 Der im Stau transportierte Restfluß Φ_1^s kann mit der aus einer obigen Formel durch Umformen erreichten folgenden Beziehung bestimmt werden.

$$\Phi_1^s = \Phi_1 * u_1^s / u_1 * (u_1 - v_1) / (u_1^s - v_1).$$

15 Der Fluß in einer Knoten-Zufluß-Kante k_3 oder k_4 kann bei Abwesenheit von Schockwellen im Bereich des Knotens aufgrund von Flußerhaltung ($\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3 + \Phi_4$) berechnet werden. Mit der Annahme, daß $\Phi_k^s = \Phi_k(\Phi_1^s + \Phi_2^s) / (\Phi_3 + \Phi_4)$ entsprechend $\Phi_k^s = \Phi_k * (\sum \Phi^{ab} / \sum \Phi^{zu})$, $k = 3$ oder 4 ergibt sich der von den Zuflüssen in den Stau abgebbare Fluß. Φ_2^s kann dabei kleiner als Φ_2 ohne Stau sein und insbesondere auf $\Phi_2^s = \Phi_2 * \Phi_1^s / \Phi_1$ sinken, wenn die Staufront den Knoten passiert. Es kann durch stauvermeidenden Abfluß auch größer als dieser Wert sein. Bei der Festlegung des konkreten Wertes können die lokale Netztopologie und mögliche Umleitungen in Betracht gezogen werden.

20 Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante k im Stau zu berechnen ist schwieriger. Einerseits ist davon auszugehen, daß die Dichte im neuen Stau hinter dem Knoten größer als im freien Verkehr in dieser Kante ist, andererseits ist eine Staugeschwindigkeit u_k^s zur Berechnung erforderlich. Deshalb wird die Geschwindigkeit u_k^s folgendermaßen angenommen:

$$u_k^s = \min(u_1^s; \alpha u_k * (\sum \Phi^{ab}) / (\sum \Phi^{zu})),$$

wobei α ($0 < \alpha < 1$) phänomenologisch festlegbar ist.

30 Damit ist auch eine Prognose der Bewegung von Phasengrenzen bei Rückstau einer hinteren Phasengrenze 5 über einen Knoten hinweg in andere Kanten möglich. In die Abflußkante k_2 breitet sich zumindest ein Rückstau nicht aus.

Zur Berechnung der Ausbreitung von Phasen über Knoten hinweg ist die Einbeziehung insbesondere von phänomenologischen Daten wie dem Abbiegeverhalten an Knoten ohne Stau und/oder bei Stau vorteilhaft.

35 Fig. 4 zeigt anhand eines Flußdiagramms die Berechnung einer Phasenprognose. Nach Eintritt in das Programm an einer mit "Start" bezeichneten Stelle 6 werden eventuell die aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten u (und eventuelle die Fahrzeugpositionen pos) in Variablen als vorherige Fahrzeuggeschwindigkeiten und Positionen gespeichert. Das weitere Verfahren hängt von der Art der praktizierten Meßmethode ab:

Bei reiner FCD-Messung 7 werden von den Fahrzeugen an die Zentrale lediglich die Geschwindigkeiten, und z.B. mit GPS meßbare Positionen der Fahrzeuge, übermittelt. Bei FCD-Messung und zusätzlicher stationärer Erfassung werden zusätzlich zu den FCD-Daten u_{Fahrzeug} von den stationären Detektoren jeweils die Flüsse Φ am Detektor gemessen und an eine Zentrale übermittelt. Bei beiden Meßmethoden wird im nächsten gemeinsamen Schritt 9 der aktuelle Verkehrszustand durch das Netz überdeckende Phasen bestimmt, wobei eine Phase in einer Kante oder einem Kantenabschnitt jeweils aufgrund der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten in dieser Kante berechnet wird. Eventuell kann auch die Varianz der Fahrzeuggeschwindigkeiten u mit einbezogen werden. Hohe Geschwindigkeit (und eventuell zusätzlich niedrige Varianz) der Geschwindigkeit kann beispielsweise als Phase "frei" interpretiert werden.

Die Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v_s einer vorderen oder hinteren Phasengrenze innerhalb einer Kante hängt von der Art der vorliegenden Detektionsdaten ab.

50 Liegen nur FCD-Daten, also Fahrzeuggeschwindigkeiten jetzt und zu mindestens einem früheren Zeitpunkt vor, kann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v einer Phasengrenze innerhalb einer Kante z.B. durch lineare Regression bestimmt werden. Ferner wäre sogar aus Daten eines einzelnen "Floating Car" die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v einer Phasengrenze aus der Beziehung Fluß = Dichte mal Geschwindigkeit ($\Phi = \rho * u$) und der Dichte-Geschwindigkeits-Korrelation des Phasendiagramms ($\rho = \rho(u)$) möglich. Falls Daten durch FCD und durch stationäre Detektoren erfaßt werden, kann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v_s einer Phasengrenze innerhalb einer Kante aus den Flüssen in dieser Kante vor und hinter der Phasengrenze, also beispielsweise vor und hinter einem Stauende und der Fahrzeuggeschwindigkeit vor und hinter der Phasengrenze, also ebenfalls beispielsweise vor und hinter einem Stauende bestimmt werden.

Die Phasenausbreitungsprognose 12 innerhalb einer Kante (also zwischen Kreuzungen und Einmündungen) aufgrund der Phasengrenzengeschwindigkeit ergibt sich aus der Beziehung Weg = Geschwindigkeit mal Zeit und der aktuellen Phasengrenzen-Position ($Position_{\text{aktuell}}$). Damit lassen sich die neuen Phasengrenzen ($Position_{\text{Phasengrenze}}$) aus der Phasengrenzengeschwindigkeit ($v_{\text{Phasengrenze}}$ in dieser Kante) und der Zeitdifferenz zwischen dem Prognosezeitpunkt und der jetzigen Zeit bestimmen. Mit der Prognose der Phasengrenzen ist innerhalb der Kanten die Prognose der Phasen möglich.

Es kann sich ein Phasengrenzen-Prognose-Ort jenseits eines Knotens, also eine Phasenausbreitung über einen Knoten hinweg, ergeben:

Die Phasenausbreitungsprognose über Knoten (Kreuzungen, Einmündungen, Abfahrten) hinweg in an diesem Knoten anliegende Kanten ergibt sich mit der im Kasten 13 angegebenen Formel.

Hiermit ist die Ausgabe 14 der Phasenprognose für das gesamte Verkehrsnetz möglich, anhand derer sich der Verkehrszustand zum Prognosezeitpunkt im Verkehrsnetz beurteilen läßt.

Bei zyklischem Durchlaufen des Verfahrens besteht der nächste Schritt 15 darin, wieder zum Start 6 zurückzukehren. Damit ist eine laufend aktualisierte Verkehrsprognose möglich.

Das oben beschriebene Verfahren ist ein mögliches Ausführungsbeispiel. Weitere Optimierungen dieses Prognoseverfahrens sind möglich. Insbesondere kann die Meßmethode nicht nur FCD oder FCD/stationär, sondern auch eine komplexe orts-/zeitabhängige Mischung hiervon sein. Ferner kann es vorteilhaft sein, Knoten nach Abbiegequoten zu klassifizieren. Auch kann ein phänomenologisches Modell mit einbezogen werden. Die Dynamik von Phasengrenzen kann aus einem makroskopischen Modell oder phänomenologisch bestimmt werden. Die Prognose kann laufend oder auf Dienstanfrage, also Benutzeranfrage im Rahmen eines Verkehrstelematikdienstes, hin erfolgen.

Fig. 5 zeigt als Blockschaltbild ein "floating car" (im Verkehr mitschwimmendes Fahrzeug) mit dem Bezugszeichen A, welches über eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle 20 mit einer Zentrale Z in Verbindung steht. Die drahtlose Kommunikationsschnittstelle 20 kann beispielsweise Mobilfunk sein.

Im Fahrzeug A werden mit einer Sensorik 21 die Geschwindigkeit des Fahrzeuges und die Position des Fahrzeuges (z.B. anhand von GPS oder in anderer Weise) bestimmt. Eventuell kann eine Vorbearbeitung dieser Daten anhand einer z.B. durch Fernkonfiguration erstellten Voreinstellung und virtuellen Umgebung durch Vergleich und Auswertung möglich sein. Die unbearbeiteten oder bearbeiteten Daten u (und evtl. die Position) werden über eine Kommunikationsschnittstelle 22, also einen Sender, an den Empfänger 23 der Zentrale gesendet. In der Zentrale werden von einem Rechner 24 aufgrund dieser Daten Verkehrsphasen identifiziert (25) und die Bewegung der Phasengrenzen prognostiziert (26).

Aus der Identifikation von Verkehrsphasen (25) ist die Entwicklung von Verkehrsmeldungen und Berechnung von Reisezeiten (28) möglich. Die gewonnenen Phasen-Prognosen können für eine Stauverlaufsprognose und/oder für eine Prognose von Reisezeiten (27) verwendet werden.

Ferner ist es vorstellbar, aufgrund der identifizierten Verkehrsphasen (z.B. Stau) und der Prognose der Bewegung der Phasengrenzen von einer Steuerung 29 aus über die Kommunikationsschnittstelle 23 in Form eines Senders und Empfängers z.B. per Funk (20) ein Fahrzeug A über dessen Kommunikationsschnittstelle 22 in Form eines Senders und Empfängers von A vor Staus zu warnen und evtl. Umleitungsvorschläge zu geben. Auch ist eine Fernkonfiguration der virtuellen Umgebung im Fahrzeug A von der Zentrale aus möglich. Hier wäre in Figur 5 noch ein Pfeil vom gestrichelten Kasten "Verkehrsinformation" zur Kommunikationseinheit der Zentrale und eine Dienstleistungskomponente im Fahrzeug A einzufügen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Prognose des Verkehrszustandes in einem aus einer Vielzahl von Kanten und Knoten gebildeten Verkehrsnetz aufgrund von durch Detektoren erfaßten, den aktuellen Verkehr betreffenden Detektionsdaten, welche von den Detektoren gemäß einem eingestellten oder einstellbaren Meldeverhalten an eine Zentrale übermittelt werden, wobei die Zentrale aus der Vielzahl der eingehenden Meldungen eine Beschreibung des aktuellen Verkehrszustandes des Verkehrsnetzes in Form des Verkehrsnetz überdeckender, jeweils den Zustand in einer Kante oder einem Kantenabschnitt repräsentierender Verkehrsphasen bestimmt und wobei die Zentrale für einen künftigen Zeitpunkt eine Beschreibung des Verkehrszustandes des Verkehrsnetzes durch Berechnung zumindest der Bewegungen und der zukünftigen Positionen der Verkehrsphasen im Verkehrsnetz prognostiziert.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Verkehrsphasen in fünf Stufen quantisiert werden.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Verkehrsphase in einem Kantenabschnitt aufgrund der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge in diesem Kantenabschnitt bestimmt wird.
- 5
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Verkehrsphase in einem Kantenabschnitt nur oder auch eine Fahrzeuggeschwindigkeitsvarianz verwendet wird.
- 10
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Prognose überdies auf der Berechnung der Größenveränderung von Verkehrsphasen basiert.
- 15
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß disjunkte, das Verkehrsnetz vollständig überdeckende Verkehrsphasen zur Verkehrszustandsprognose verwendet werden.
- 20
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß in Kantenabschnitten, in welchen keine Detektionsdaten vorliegen, die Verkehrsphase als "frei" angenommen wird.
- 25
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung der Phasengrenzengeschwindigkeit der Phasengrenzen alleine aufgrund von durch im Verkehr mitschwimmende Detektoren gemeldeten, aktuellen und vorherigen Detektionsdaten durch lineare Regression erfolgt.
- 30
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß zur Berechnung der Phasengrenzengeschwindigkeit der Phasengrenzen einer Verkehrsphase zumindest in einigen Ortsbereichen Detektionsdaten von im Verkehr mitschwimmenden Detektoren und Detektionsdaten von stationären Detektoren verwendet werden.
- 35
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung des Verkehrszustandes von Kantenabschnitten, in welchen sich Phasengrenzen nur entlang dieser Kante fortbewegen, aufgrund der Phasengrenzengeschwindigkeit erfolgt.
- 40
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß, wenn sich eine Verkehrsphase über einen Knoten hinweg ausbreitet, die Phasengrenzengeschwindigkeiten der Phasen in den an diesem Knoten anliegenden Kanten (k) mit Zufluß zum Knoten aufgrund der Phasengrenzengeschwindigkeit (v_k) in der Verkehrsphase, die sich über den Knoten hinweg ausbreitet, vor dem Knoten und jeweils dem Fluß Φ in einer am Knoten anliegenden Kante bei Stau (Φ_k^s) und ohne Stau (Φ_k^s) berechnet wird.
- 45
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasengrenzengeschwindigkeit v_k in einer Kante nach folgender Beziehung berechnet wird:
- 50
- $$v_k^s = (\Phi_k - \Phi_k^s) / (\Phi_k / u_k - \Phi_k^s / u_k^s),$$
- 55
- wobei v_k die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante k ohne Stau und Φ_k^s die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante bei Stau ist.
13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12,

dadurch gekennzeichnet,
daß für die Geschwindigkeit u_k^s der Fahrzeuge in der Kante k durch Stau eingesetzt wird:

$$u_k^s = \min (u_1^s, \alpha * u_k * \Phi_{ab} / \Phi_{zu}),$$

5

wobei Φ_{ab} die Summe der Abflüsse vom Knoten, Φ_{zu} die Summe der Zuflüsse zum Knoten, v_1^s die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante, aus welcher sich ein Stau in den Knoten zurückstaut, und v_k die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kante k ist.

- 10 **14.** Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 13,
dadurch gekennzeichnet,
daß der Fluß Φ_k^s in einer Kante k bei Stau aus dem Fluß Φ_k in der Kante ohne Stau und den Zuflüssen Φ_{zu} zum Knoten und den Abflüssen Φ_{ab} vom Knoten berechnet wird zu:

15

$$\Phi_k^s = \Phi_k * \Phi_{ab} / \Phi_{zu}.$$

- 15.** Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
daß zur Berechnung der Ausbreitung und/oder Größenveränderung einer Verkehrsphase die benachbarten Verkehrsphasen mitberücksichtigt werden.
- 20

- 16.** Zentrale (z), insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
mit einem Empfänger für Meldungen von Detektoren und einem Rechner(24) zur Prognose der zukünftigen Verkehrssituation mit einem Programm, welches Schritte zur Bestimmung von Verkehrsphasen in Kanten oder Kantenabschnitten aufgrund von Daten, die von Detektoren eingehen, und zur Prognose der künftigen Positionen der Phasengrenzen aufweist.
- 25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1

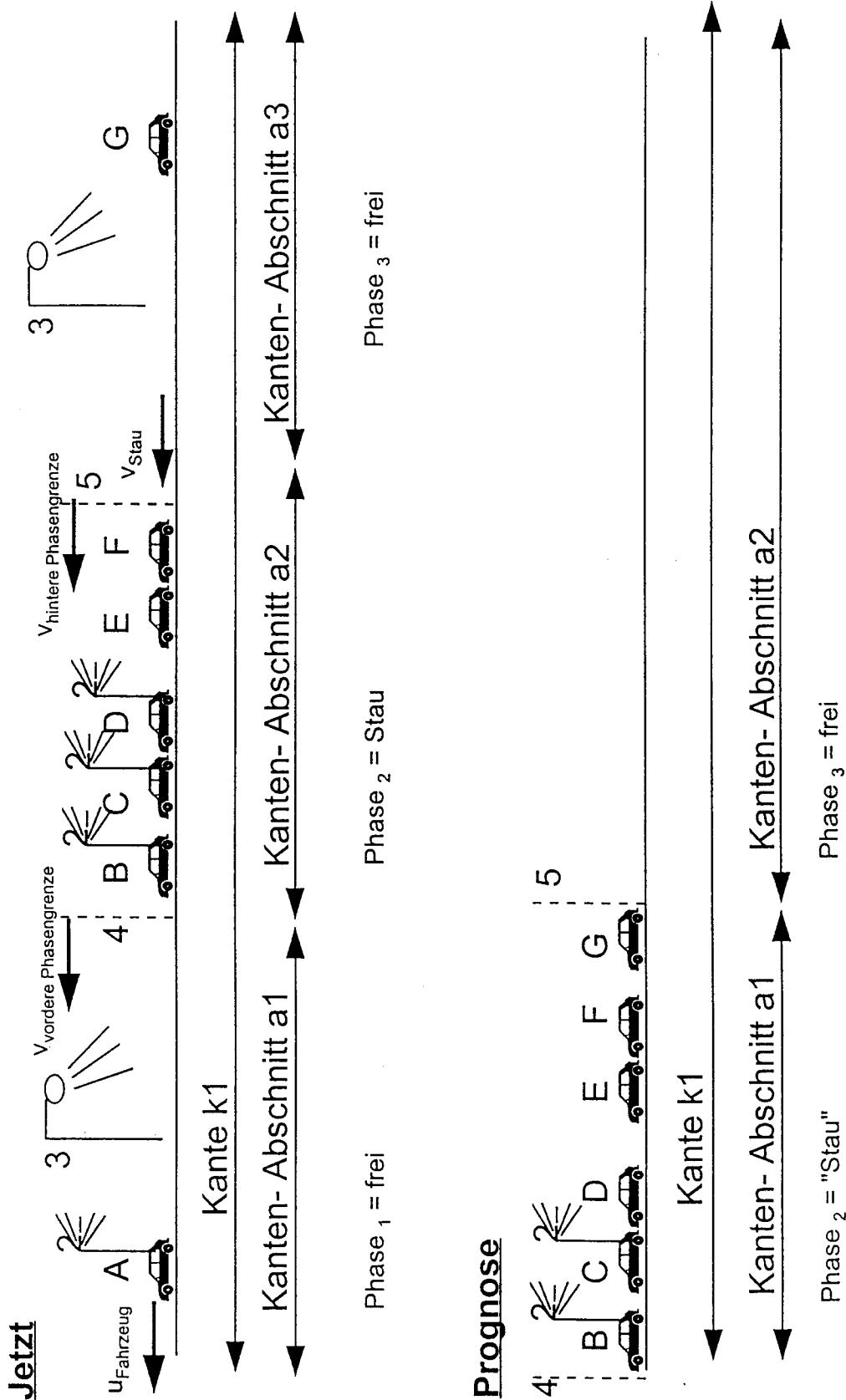
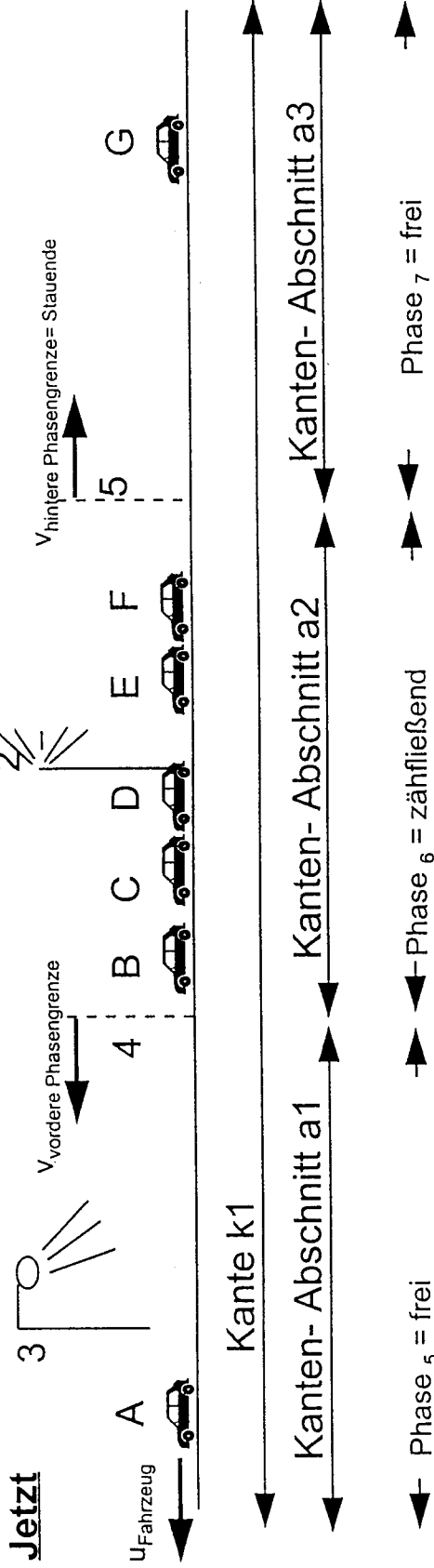
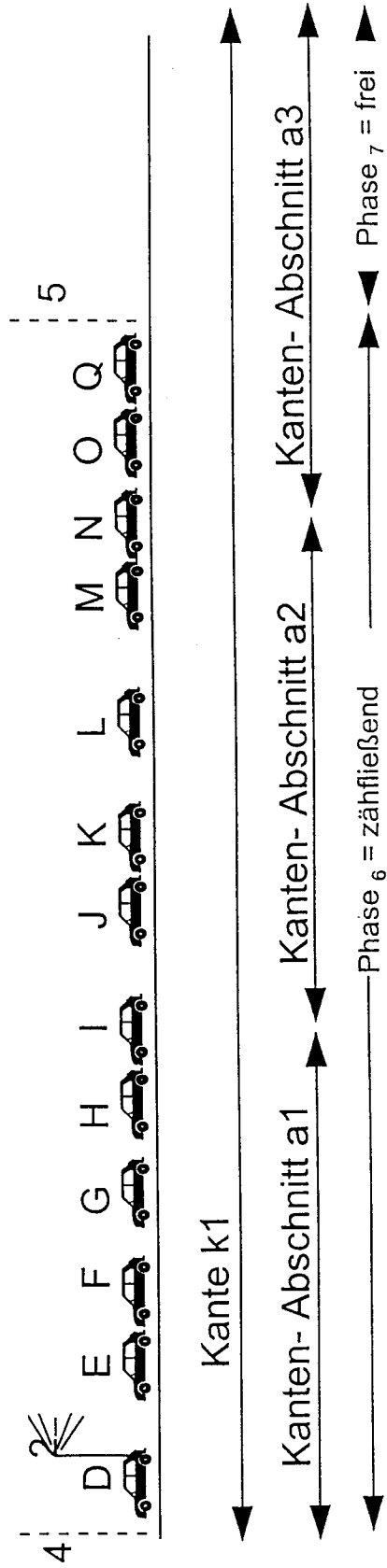


Fig. 2

(Staufzufluß > Stauabfluß)



Prognose



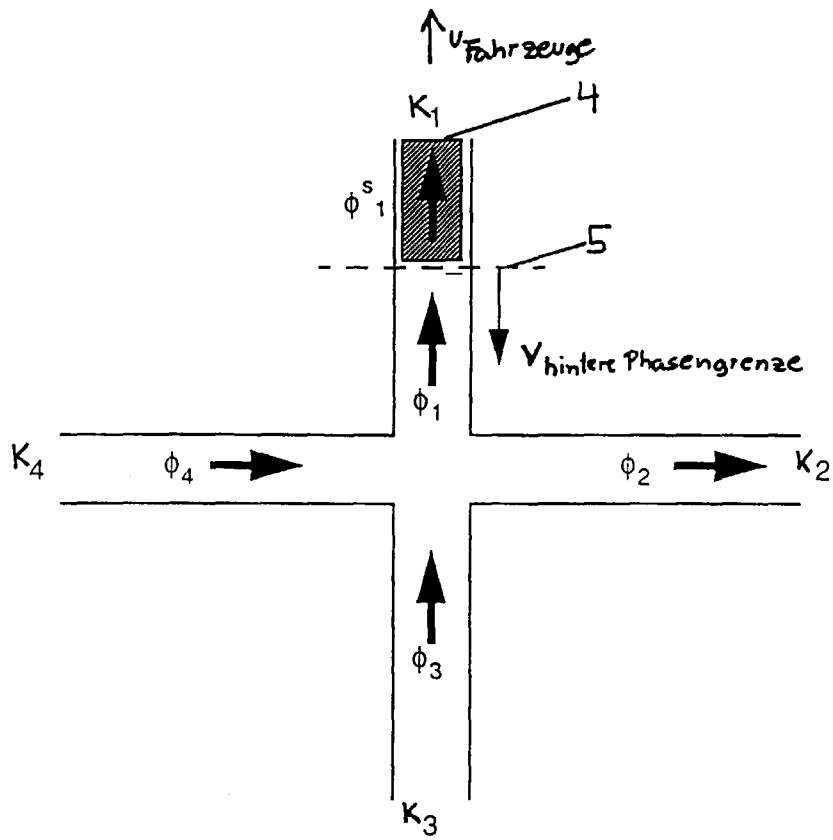


Fig 3

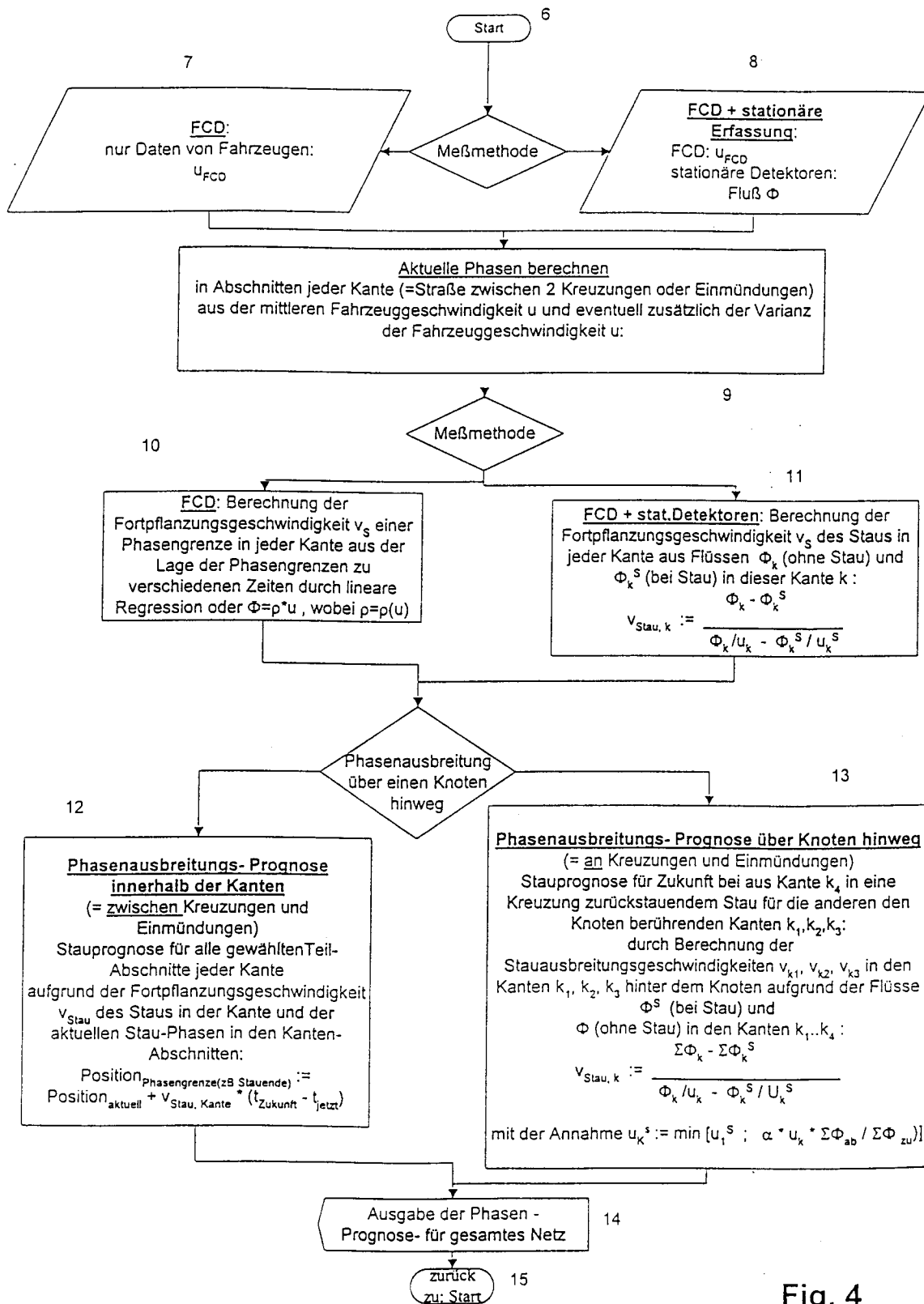


Fig. 4

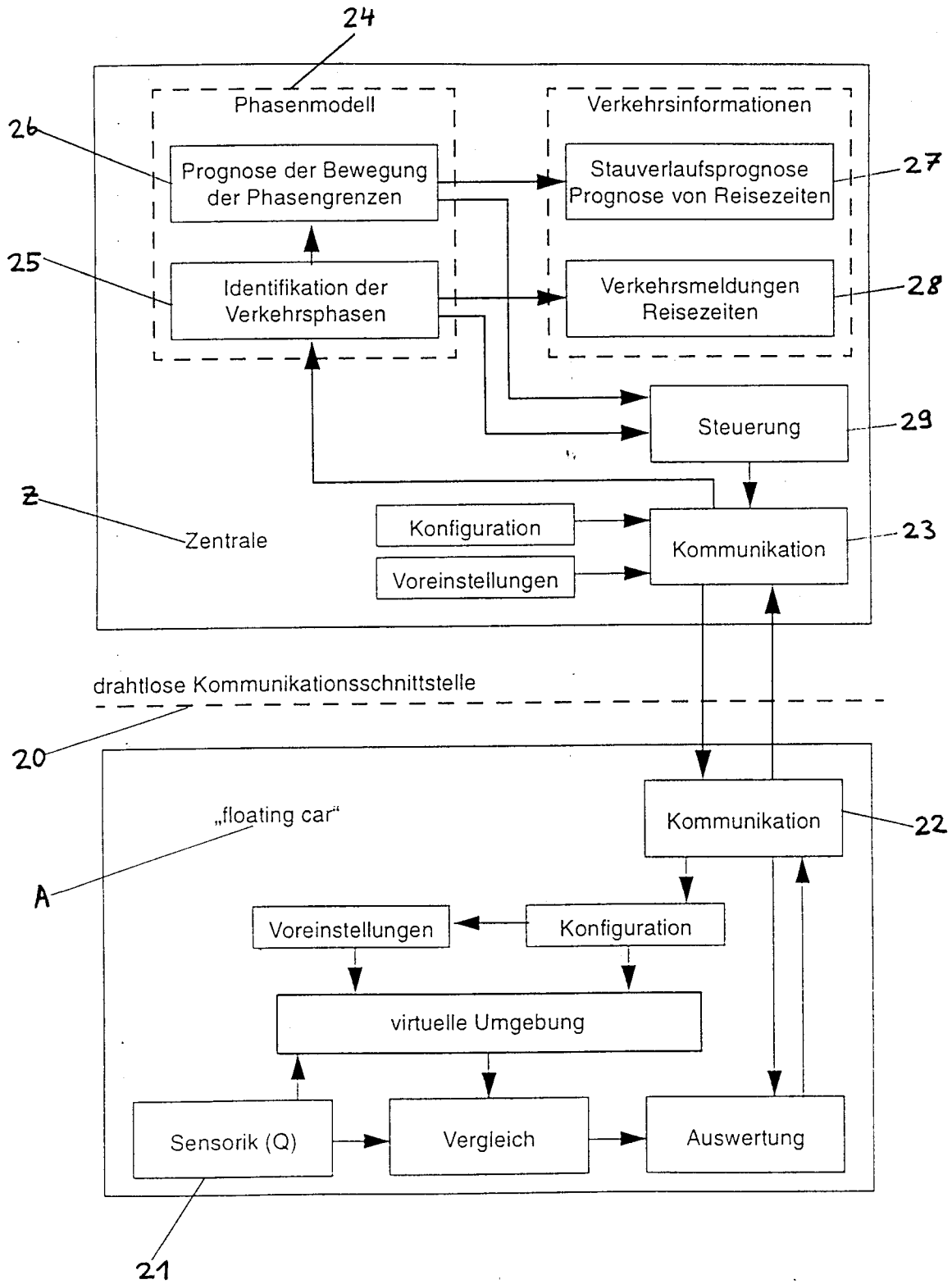


Fig 5