



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 056 063 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
29.11.2000 Patentblatt 2000/48

(51) Int. Cl.⁷: **G08G 1/01**

(21) Anmeldenummer: **00108359.1**

(22) Anmeldetag: **17.04.2000**

(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
(30) Priorität: **17.05.1999 CH 93199**

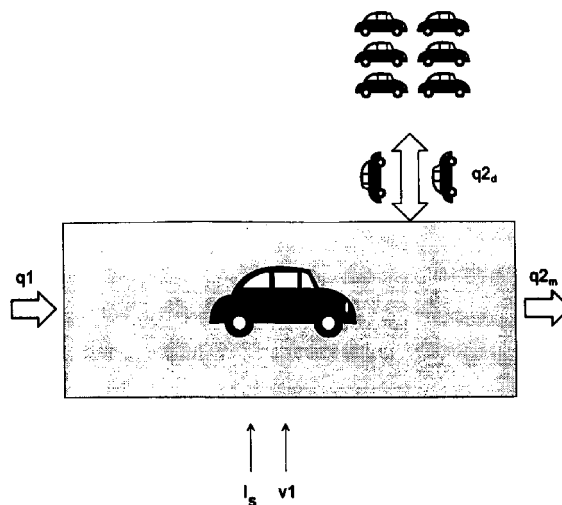
(71) Anmelder: **Siemens Schweiz AG**
8047 Zürich (CH)
(72) Erfinder:
• **Lagger, Andreas**
5432 Neuenhof (CH)
• **Müller, Kai**
33104 Braunschweig (DE)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung des Verkehrszustandes eines Verkehrsabschnittes**

(57) Das Verfahren dient zur schnellen Ermittlung des Verkehrszustandes innerhalb eines Verkehrsabschnittes mit einem auf einem Modell (MOD) basierenden Kalman-Filter (KF), durch das die Länge l_s sowie die am Ein- und Ausgang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärken q_1 bzw. q_2 berücksichtigt werden. Anhand eines einfachen transportorientierten Modells (MOD) wird für wenigstens zwei Segmente (s_1 ; ...; s_n) des Verkehrsabschnittes anhand der Länge l_s sowie der am Eingang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärke q_1 und der Fahrzeuggeschwindigkeit $v_1(k)$ in Abtastintervallen k jeweils ein Korrekturwert (x_d) sowie für jedes Segment (s_1 ; ...; s_n) einen Verkehrsstärkewert (x_1 ; ...; x_n) enthaltender Vektor $x(k)$ gebildet, der durch Vergleich mit der am Ausgang des Verkehrsabschnittes gemessenen Ver-

kehrsstärke q_2 anhand des Kalman-Filters (KF) korrigiert wird, so dass dem korrigierten Vektor $x_e(k)$ präzisierte Schätzwerte q_{2e} (verzögerungsfreie Glättung von q_2) für die Verkehrsstärke am Ausgang des Verkehrsabschnittes sowie ein Schätzwert q_{2de} für einen inneren Zustand des Verkehrsabschnittes repräsentierende Differenzverkehrsstärke q_{2d} entnehmbar sind. Durch die vorteilhafte Wahl eines erweiterten transportorientierten Modells (MOD) für den störungsfreien Fall in Verbindung mit einem Kalman-Filter (KF) kann der Verkehrszustand jeweils schnell und präzise ermittelt werden. Insbesondere werden Störungen nahezu verzögerungsfrei erkannt, weshalb die notwendigen Massnahmen (Stauwarnung, etc.) schnell abgegeben werden können.

Fig. 4



EP 1 056 063 A1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. 6.

[0002] Zur automatischen Überwachung und Steuerung des Strassenverkehrs werden oft Messgeräte eingesetzt, welche die Verkehrsstärke bzw. die Zahl der Fahrzeuge messen, die innerhalb einer bestimmten Zeitdauer einen Messpunkt passieren. Anhand der dabei anfallenden Messresultate kann jedoch nur eine brauchbare Aussage über die lokal auftretende Verkehrsstärke gemacht werden. Über den Zustand des Verkehrs in dem vor dem genannten Messpunkt liegenden Verkehrsabschnitt ist keine Angabe möglich.

[0003] Auch anhand der Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitstendenz ist eine Bestimmung des Verkehrszustands möglich. Störungen im Verkehrsablauf sind aufgrund der Geschwindigkeitsmesswerte jedoch erst so spät feststellbar, dass entsprechende Massnahmen zur Verkehrsregulierung der Störung nicht mehr entgegenwirken können.

[0004] Zur Überwachung eines Verkehrsabschnittes werden daher an dessen Ein- und Ausgang der Verkehrsmessung dienende Messfühler vorgesehen. Durch einen Vergleich der Messresultate der beiden Messfühler kann eine Aussage über den Verkehrszustand innerhalb dem überwachten Verkehrsabschnitt gemacht werden. Da die gemessene Verkehrsstärke starke Schwankungen aufweist, die als stochastische Störungen um einen "wahren" Wert auftreten, werden die gemessenen Werte gefiltert.

[0005] Bei der Filterung anhand von klassischen Tiefpass-, Bandpass- oder Hochpassfiltern entstehen Verzögerungen, die verhindern, dass eine rasche Aussage über den Verkehrszustand gemacht werden kann. Bekannt ist, dass Messwerte anhand eines Kalman-Filters praktisch verzögerungsfrei gefiltert werden können.

[0006] Kalman-Filter oder sogenannte Beobachter verwenden ein Modell sowie die Ein- und Ausgangsinformationen des Objektes, dessen Zustand festgestellt bzw. verfolgt werden soll. Grundsätzlich gilt, dass die tatsächlichen Objektzustände umso schneller und genauer bestimmt werden können, je mehr Informationen des Objektes für das Modell verwendet werden, welches die Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangsgrössen korrekt wiedergeben soll. Aus [1] ist die Verwendung eines Modells bekannt, das auf der Verwendung von acht Parametern basiert, die sich zum Teil nur schwer ermitteln lassen. Ein Teil der Parameter hängt zudem von der Witterung ab. Die erreichten Resultate können bei diesem System, trotz des erhöhten Aufwandes, daher erheblich von den Resultaten abweichen, die sich idealerweise erzielen lassen.

[0007] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur schnellen Ermittlung des Zustandes eines Verkehrsabschnittes anzugeben.

[0008] Diese Aufgabe wird durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 bzw. 6 angegebenen Massnahmen gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in weiteren Ansprüchen angegeben.

[0009] Erfindungsgemäss wird ein Kalman-Filter mit einem Modell des überwachten Verkehrsabschnittes verwendet. Durch die vorteilhafte Wahl eines einfachen Modells für den störungsfreien Fall in Verbindung mit einem Kalman-Filter KF kann der Verkehrszustand jeweils schnell und präzise ermittelt werden. Insbesondere werden Störungen nahezu verzögerungsfrei erkannt, wodurch jeweils die notwendigen Massnahmen (Stauwarnung, etc.) schnell abgegeben werden können. Weitere Vorteile der Erfindung bzw. des gewählten Modells werden nachfolgend erläutert.

[0010] Modelle unterscheiden sich durch ihre Ein- und Ausgangsgrössen und deren gegenseitige Abhängigkeit sowie durch die Wahl der Zustandsgrössen, die den "inneren Zustand" des Modells widerspiegeln. Aus messtechnischen Gründen findet eine Orts- und eine Zeitdiskretisierung des kontinuierlichen Verkehrs statt. Messwerte stehen nur an bestimmten Orten sowie zu bestimmten Zeiten (Abtastzeitpunkten) zur Verfügung. Erfindungsgemäss wird für die Zustandsabschätzung ein transportorientiertes Modell verwendet. Der überwachte Verkehrsabschnitt wird demgemäss als Transportmedium betrachtet, welches, analog zu einem Förderband, Elemente bzw. Fahrzeuge mit einer bestimmten Geschwindigkeit transportiert bzw. passieren lässt. Vereinfachend wird vorgesehen, dass sich alle Fahrzeuge in dem Verkehrsabschnitt mit einer konstanten Geschwindigkeit fortbewegen. Trotz des einfachen Aufbaus des verwendeten Transportmodells ermöglicht das erfindungsgemässe Verfahren mit Hilfe eines Kalman-Filters eine schnelle und zuverlässige Bestimmung von Verkehrsstörungen und anderer Kenngrössen aus stark schwankenden Messwerten der Verkehrsstärke q und der Geschwindigkeit v .

[0011] Wesentlich ist, dass das verwendete Modell die Verhältnisse einer "idealen" Strasse beschreibt, die eine unendliche Kapazität aufweist. Gerade diese Eigenschaft ermöglicht es, Störungen sehr schnell und sicher zu erkennen, da sich gemessene Werte im Störfall von den durch das Modell "vorhergesagten" Werten stark unterscheiden. Das Modell ist hingegen für die Simulation des Strassenverkehrs nicht geeignet. Der Einsatz dieses Modells ist daher nur in Verbindung mit einem Kalman-Filter sinnvoll. Aufgrund dessen Linearität ist das Transportmodell zu diesem Zweck hingegen optimal geeignet.

[0012] Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemässen Verfahrens besteht darin, dass sich alle Parameter des Modells in einfacher Weise aus der geometrischen Anordnung der Messstellen ergibt. Eine aufwendige Identifikation von Modellparametern entfällt damit. Insbesondere hängen die Parameter des verwendeten Modells nicht von Witte-

rungeinflüssen wie Nässe oder Glätte ab, wodurch sich eine Anpassung an unterschiedliche Umgebungsbedingungen erübrigt.

[0013] Die Erfindung wird nachfolgend anhand einer Zeichnung beispielsweise näher erläutert. Dabei zeigt:

- 5 Fig. 1 ein Verkehrsmodell mit Ein- und Ausgangsgrößen q_1 , q_2 ,
 Fig. 2 das Verkehrsmodell gemäss Fig. 1 für einen Verkehrsabschnitt, den Fahrzeuge mit einer bestimmten Gruppenlaufzeit durchfahren,
 Fig. 3 den Verlauf der Verkehrsstärke q_2 am Ausgang des Verkehrsabschnittes als Reaktion eines synthetischen Verlaufs der Verkehrsstärke q_1 am Eingang des Verkehrsabschnittes für das kontinuierliche Modell,
 10 Fig. 4 das Verkehrsmodell mit virtueller Ein- und Ausfahrt,
 Fig. 5 das verwendete Kalman-Filter KF mit einem erweiterten diskreten Modell MOD,
 Fig. 6 den Verlauf der Verkehrsstärke q_2 am Ausgang des Verkehrsabschnittes als Reaktion eines synthetischen Verlaufs der Verkehrsstärke q_1 am Eingang des Verkehrsabschnittes für das diskrete Modell und
 Fig. 7 den vom Kalman-Filter KF geschätzten Verlauf der Verkehrsstärke q_{2e} (verzögerungsfreie Glättung von q_2)
 15 sowie die Verkehrsstärke q_{2d} auf den virtuellen Ein- und Ausfahrten beim Auftreten einer Störung (Wert q_{2d} durch das Kalman-Filter KF geschätzt, wird mit q_{2de} bezeichnet).

[0014] Einleitend werden die verwendeten Bezeichnungen tabellarisch aufgelistet:

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
l_s	km	Länge eines durch zwei Messstellen begrenzten Verkehrsabschnittes
T_L	s	Laufzeit der Fahrzeuge durch den Verkehrsabschnitt
T_s	s	Intervall, Abtastperiode
$v; v_0$	km/h	Geschwindigkeit; konstante Geschwindigkeit
v_1	km/h	Geschwindigkeit am Eingang des Verkehrsabschnittes
v_2	km/h	Geschwindigkeit am Ausgang des Verkehrsabschnittes
q	Fz / Ts	Fahrzeugstärke (Fahrzeuge pro Messperiode)
q_1	Fz / Ts	Fahrzeugstärke am Eingang des Modells (gemessen)
q_2	Fz / Ts	Fahrzeugstärke am Ausgang des Modells (gemessen)
A, B, C	Matrix	Beschreibung des Modells
G	Matrix	Eingangsmatrix für Prozessstörungen
q_{2m}	Fz / Ts	Fahrzeugstärke gemäss Modell berechnet (m: Modell)
q_{2e}	Fz / Ts	durch das Kalman-Filter geschätzte Fahrzeugstärke (e: estimated)
q_{2de}	Fz / Ts	geschätzte Abweichung der Verkehrsstärke (d: Differenz)
$x(k)$	Vektor	interner Zustandsvektor des Kalman-Filters beim Schritt k
$x_e(k)$	Vektor	Schätzwert des int. Zustandsvektors des Kalman-Filters beim Schritt k
n	-	Anzahl der Segmente des Verkehrsabschnittes
p	Fz / Ts	Prozessrauschen
s	Fz / Ts	Sensorrauschen

Tabelle

- [0015]** Fig. 1 zeigt ein zu einem Verkehrsabschnitt korrespondierendes Verkehrsmodell, dem als Eingangsgrösse die am Eingang des Verkehrsabschnittes gemessene Verkehrsstärke q_1 sowie als Parameter die am Eingang des Verkehrsabschnittes gemessene Geschwindigkeit v_1 sowie die selbstverständlich konstante Länge l_s des Verkehrsabschnittes zugeführt werden. Das Modell liefert eine Ausgangsgrösse q_{2m} , welche, unter Berücksichtigung der errechneten Laufzeit T_L der Fahrzeuge Fz, die Verkehrsstärke am Ausgang des Verkehrsabschnittes angibt. Für das Modell wird vereinfachend angenommen, dass sich alle Fahrzeuge in dem Abschnitt mit der gleichen konstanten

Geschwindigkeit v_1 fortbewegen.

[0016] Die Änderung der Verkehrsstärke q wird somit in Analogie zum Transport von Material (z.B. Sand) auf einem mit konstanter Geschwindigkeit v bewegten Fließband beschrieben. Das Material erscheint nach einer zeitlichen Verzögerung, die von der Transportgeschwindigkeit und der Länge des Fließbandes abhängig ist, unverändert am Abgabeort. Es bestehen keine Laufzeitunterschiede der transportierten Materialpartikel. Deshalb erscheinen die Fahrzeuge F1, F2 und F3 gemäss dem in Fig. 1 gezeigten idealisierten Modell ohne Laufzeitunterschiede, in gleichem gegenseitigen Abstand am Ausgang des Verkehrsabschnittes.

[0017] Ein Transportvorgang dieser Art entspricht der partiellen Differentialgleichung (1):

$$\frac{\partial q(s,t)}{\partial t} = -v \frac{\partial q(s,t)}{\partial s}$$

[0018] Bei konstanter Geschwindigkeit v wiederholt sich also am Ende des Förderbandes nach der Laufzeit:

$$T_L = \frac{l_s}{v_0}$$

exakt der Verlauf von q_1 , d.h. es gilt: $q_2(t) = q_1(t - T_L)$.

[0019] Dieser Sachverhalt wird dem Verhalten der Fahrzeuge jedoch nicht gerecht, da die Fahrzeuge, die in einem Zeitintervall gemessen werden, nicht dieselbe Geschwindigkeit besitzen und folglich, wie in Fig. 2 gezeigt, nach unterschiedlichen Laufzeiten den zweiten Messquerschnitt passieren.

[0020] Der vorgesehene Einsatz eines Kalman-Filters erfordert zudem eine Beschreibung des Prozesses in Form einer gewöhnlichen und nicht einer partiellen Differentialgleichung, welche partielle Ableitungen einer unbekannten Funktion mit mehreren Variablen enthält (bezüglich dem Unterschied von gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen siehe [3], Seite 435).

[0021] Man gelangt erfindungsgemäss zu einer gewöhnlichen Differentialgleichung, indem man nur noch diskrete Orte in dem Verkehrsabschnitt betrachtet. Der Verkehrsabschnitt wird hierzu in n Segmente $s_1, s_2, \dots, s_n$ unterteilt, deren innere Grenzen nicht über Sensoren bzw. Messfühler verfügen. In jedem dieser Segmente wird die Geschwindigkeit als konstant angenommen.

[0022] Beschreibt man das Verhalten eines der n Untersegmente durch eine diskrete Verzögerung 1. Ordnung, so verhält sich das gesamte Segment wie ein Laufzeitelement l_e , dessen Zeitkonstante wie folgt lautet:

$$T_{le} = \frac{T_L}{n} = \frac{l_s}{n v_0}$$

[0023] Je grösser die Zahl n der Segmente ist, desto genauer lässt sich das Verhalten beschreiben. Der Transportvorgang wird somit abgebildet, indem n Verzögerungen 1. Ordnung hintereinander geschaltet werden:

$$\frac{d q_{l_i}(t)}{dt} = \frac{n}{T_L} (q_{l_{i-1}}(t) - q_{l_i}(t)), i = 1, 2, \dots, n$$

[0024] Durch diese Massnahme erfolgt für gewählte Segmente $s_1, s_2, \dots$ (siehe Fig. 1) eine Ortsdiskretisierung, wodurch eine gewöhnliche Differentialgleichung erreicht wird. Der erste Wert der Kette q_{l_0} ist der Wert q_1 am Eingang

q1; der letzte Wert der Keife $q_{1,n}$ ist identisch mit dem Wert q2 am Ausgang des Modells.

[0025] Fasst man die Werte $q_{1,i}$ zu einem den inneren Zustand des Systems beschreibenden Zustandsvektor X zusammen, so lässt sich das Differentialgleichungssystem in Zustandsform angeben. Ein System, das aus vier Segmenten besteht, besitzt mit $T_{le} = 4 / T_L$ folgende Darstellung:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \tilde{A}x + \tilde{B}q_1, \\ q_2 &= \tilde{C}x\end{aligned}$$

[0026] Die einzelnen Matrizen lauten wie folgt:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{le}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{le}} & -\frac{1}{T_{le}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{le}} & -\frac{1}{T_{le}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{le}} & -\frac{1}{T_{le}} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{le}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

[0027] In Fig. 3 ist die Verkehrsstärke q2 als Reaktion auf einen synthetischen Verlauf von q1 für n=4 Segmente (bzw. Verzögerungen) dargestellt. Man erkennt, dass nun ein Teil der Fahrzeuge bereits vor Ablauf der Zeit T_L eintrifft, während ein anderer Teil aufgrund einer etwas tieferen Geschwindigkeit mehr Zeit benötigt (siehe Fig. 2).

[0028] Das gewählte Modell ist nun zur Beschreibung des Transportvorganges und damit des ungestörten Verkehrs in einem Verkehrsabschnitt geeignet. Diese Form ist zudem für ein Kalman-Filter sehr geeignet, da es linear in den Zustandsgrößen ist. Das Modell dient als Baustein für einen Verkehrsabschnitt mit zwei Messstellen. Mit Hilfe dieses Bausteins lassen sich leicht Modelle für beliebig komplexe Topologien aufstellen, die Einfahrten, Ausfahrten, Verzweigungen und Zusammenführungen aufweisen.

[0029] Die Messwerte liegen als zeitdiskrete Werte für ein bestimmtes Messintervall (Abtastzeit T_s) vor. Daher wird die diskrete Version des Modells gewählt, die sich aus dem kontinuierlichen Modell wie folgt ergibt (die Matrix C ändert sich nicht):

$$A := e^{\tilde{A}T_s} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\tilde{A}T_s)^i}{i!}, \quad B = \int_0^{T_s} A(\tau) d\tau \tilde{B}$$

[0030] Die unendliche Reihe konvergiert aufgrund der Fakultät im Nenner sehr schnell, so dass keine sehr hohe Rechenleistung notwendig ist. Allerdings muss die Diskretisierung in jedem Messintervall k neu durchgeführt werden, da die Matrizen

$$\tilde{A}, \tilde{B}$$

von der gemessenen Geschwindigkeit abhängen und somit nicht konstant sind. Die Diskretisierung kontinuierlicher Systeme ist u.a. auch aus [4], Seiten 74-80, Kapitel 3.1 (Diskretisierung der Regelstrecke) bekannt. Für das diskrete

Modell gehen somit die Gleichungen :

$$x(k+1) = A(k) x_e(k) + B(k) q_1(k),$$

$$q_{2m}(k) = C_1 x(k) + D(k) q_1(k).$$

[0031] Vereinfachend wurde der Abtastschritt k als Index geschrieben. Der Index k kennzeichnet für die Zeit t das Intervall

$$kT_S \leq t < (k+1) T_S$$

[0032] Erfindungsgemäss werden in einem Intervall alle Werte als konstant angenommen, wodurch eine einfache Berechnung möglich wird. Es ist zu beachten, dass die Parameter des Prozessmodells jedoch nicht konstant sind. Nach jedem Abtastintervall T_S ergibt sich ein neuer Wert für die am Eingang des Verkehrsabschnittes gemessene Geschwindigkeit v_1 , mit der sich, gemäss Annahme, alle Fahrzeuge in dem überwachten Abschnitt fortbewegen.

[0033] Die Abweichungen zwischen den Vorhersagewerten des Modells q_{2m} und den tatsächlich gemessenen Werten q_2 werden vom Kalman-Filter, das die Schätzwerte q_{2e} berechnet, im ungestörten Fall korrigiert. Falls jedoch Störungen auftreten, die bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurden, liefert auch das Kalman-Filter fehlerhafte Werte. Der Störfall wird nun berücksichtigt, indem das Modell, wie in Fig. 4 gezeigt, um virtuelle Ein- und Ausfahrten zu einem "Parkplatz mit unendlicher Kapazität" erweitert wird.

[0034] Die Verkehrsströme auf den virtuellen Ausfahrten, die mit q_{2d} bezeichnet sind, sind ein Mass für die Auswirkungen einer aufgetretenen Störung. Durch das Kalman-Filter werden die Werte q_{2d} geschätzt (Wert q_{2de}).

[0035] Da das Modell, wie eingangs erwähnt, eine unbeschränkte Kapazität aufweist, kann aus der Eingangsinformation q_1 und dem Messwert q_2 nicht auf den Wert q_{2d} geschlossen werden. Da das Kalman-Filter optimale Schätzungen nur basierend auf einem Modell durchführen kann, muss auch der Wert q_{2d} durch das Modell berücksichtigt werden. Da das Modell für den störungsfreien Betrieb ausgelegt ist, wird konsequenterweise angenommen, dass der Anfangswert von q_{2d} gleich Null ist und sich anschliessend von Abtastperiode zu Abtastperiode wie folgt verhält: $q_{2d}(k+1) = q_{2d}(k)$. Das Modell sieht daher, wie modelliert, keine Störung vor, so dass der Wert q_{2d} konstant ist bzw. mit jedem Intervall k nur durch das Kalman-Filter KF verändert werden kann ($q_{2d}(k+1) = q_{2d}(k) + \text{corr}_{KF}(k)$). Dazu wird der für vier Segmente s_1, s_2, s_3, s_4 vorgesehene Zustandsvektor x wie folgt erweitert:

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_d \end{bmatrix}, \quad x_e(k) = \begin{bmatrix} x_{1e} \\ x_{2e} \\ x_{3e} \\ x_{4e} \\ x_{de} \end{bmatrix}$$

[0036] Im ungestörten Fall treten keine virtuellen Verkehrsflüsse (siehe Fig. 4) auf. Kommt es zu Störungen, so kann das Kalman-Filter über die virtuellen Verkehrsflüsse Messwerte und Schätzwerte des Modells abgleichen. Der Vektor $x(k)$ wird durch das Kalman-Filter KF korrigiert (siehe Fig. 5), wodurch der Vektor $x_e(k)$ mit korrigierten Werten $x_{1e}, \dots, x_{4e}$ sowie x_{de} entsteht. Die korrigierten (internen) Zustandswerte x_{4e} plus x_{de} bzw. x_{de} entsprechen somit den Schätzwerten q_{2e} und q_{2de} des Kalman-Filters KF. Die Werte q_{2de} sind ein unmittelbares Mass für den Grad der im überwachten Abschnitt aufgetretenen Störung (siehe Fig. 7).

[0037] Grundlage des in Fig. 5 gezeigten Kalman-Filters KF ist das oben beschriebene, erweiterte diskrete Modell MOD, das den Verhältnissen im Idealzustand genügt. Zur Anpassung an die realen Verhältnisse wird zusätzlich angenommen, dass Prozess- und Sensorstörungen p bzw. s an den in Fig. 5 gezeigten Stellen wie folgt wirksam sind (Annahme $D(k) = [0]$):

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)q_1(k) + G(k)p(k),$$

$$q_{2m}^*(k) = C(k)x(k) + D(k)q_1(k) + s(k) \cong q_2(k)$$

[0038] Der korrigierte Modellwert $q_2^*(k)$ entspricht somit dem im Intervall k tatsächlich gemessenen Wert $q_2(k)$. Die angenommenen Störungen resultieren aus dem Verkehrsprozess und entsprechen der Form eines frequenzunabhängigen Rauschens mit gaussverteilter Amplitudenspektrum. Betrachtet man gemessene Verläufe der Verkehrsstärke q , so erkennt man, dass sich die starken Schwankungen recht gut als Rauschprozess um einen Mittelwert darstellen lassen. Das Kalman-Filter KF ist ein Optimalfilter, das die Varianz des Schätzfehlers

$$x_{err}(k) \equiv x(k) - x_e(k)$$

minimiert. Der "wahre" Zustandsvektor ist nicht bekannt. Man verwendet deshalb $x_e(k)$ als Schätzwert für den unbekannten Zustandsvektor $x(k)$.

[0039] Die Matrix $G(k)$, die genau wie die Matrizen $A(k)$, $B(k)$ durch Diskretisierung

$$\tilde{G} \Rightarrow G(k)$$

entsteht, gibt an, wie sich die (unbekannten) Störgrößen auf die internen Zustandsgrößen des Prozesses verteilen. Im einfachsten Fall nimmt man an, dass diese Störgrößen gleichmässig auf alle internen Zustandsgrößen einwirken. Durch die Matrix $G(k)$ wird daher angegeben wo nicht aber mit welcher Intensität die Störgrößen auf das Modell einwirken. Die Intensität der Störungen wird durch die nachstehend beschriebenen Kovarianzmatrizen Q und R beschrieben. Sofern zum Beispiel drei Zustandsgrößen und zwei Störgrößen vorhanden sind und die erste Störgröße nur auf die erste Zustandsgröße und die zweite Störgröße nur auf die beiden folgenden Zustandsgrößen einwirkt, würde dieser Sachverhalt mit einer Matrix $G(k)$ der nachstehend angegebenen Form berücksichtigt:

$$\tilde{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow G(k)$$

[0040] Erfindungsgemäss wird die Matrix $G(k)$ derart gewählt, dass Prozessstörungen p alle Größen des Zustandsvektors $x(k)$ in gleicher Weise beeinflussen.

[0041] Die Steuerparameter des Kalman-Filters KF sind die Kovarianzmatrizen Q und R der (angenommenen) Rauschprozesse, die auf den Prozess selbst bzw. auf die von den Sensoren abgegebenen Messwerte einwirken. Die Matrix Q beschreibt die Intensität der Prozessstörungen p . Die Matrix R beschreibt die Intensität der Sensorstörungen s . Obwohl die Matrizen Q und R theoretisch zeitvariant sein dürfen, wird angenommen, dass die Schwankungen der Messwerte unabhängig von der Verkehrssituation und somit zeitunabhängig sind. Die Matrizen Q und R nehmen damit konstante Werte an. Die Elemente der Matrizen Q und R sind die Entwurfparameter des Kalman-Filters KF, mit denen die Einschwingzeit und Störempfindlichkeit des Kalman-Filters KF eingestellt werden.

[0042] Mit den Initialisierungswerten

$$P(0) = G(0)QG^T(0) \text{ und}$$

$$x(0) = 0$$

sind folgende Gleichungen zu berechnen. Man unterscheidet zwischen den Gleichungen zur Bestimmung der optimalen Schätzwerte und den Gleichungen zur Berechnung des Folgezustandes.

[0043] Die Gleichungen zur Bestimmung der optimalen Schätzwerte lauten wie folgt (I ist die Einheitsmatrix) :

$$\begin{aligned}
L(k) &= P(k)C_1^T (C_1 P(k)C_1^T + R)^{-1}, \\
P_e(k) &= (I - L(k)C_1) P(k), \\
x_e(k) &= x(k) + L(k)(q_2(k) - C_1 x(k) - D(k)q_1(k)) \\
q_{2e}(k) &= C_1 x_e(k) + D(k)q_1(k)
\end{aligned}$$

[0044] Die Gleichungen zur Berechnung des Folgezustandes lauten wie folgt:

$$\begin{aligned}
x(k+1) &= A(k)x_e(k) + B(k)q_1(k), \\
P(k+1) &= A(k)P_e(k)A^T(k) + G(k)QG^T(k)
\end{aligned}$$

[0045] Die obengenannten Gleichungen werden für jeden Abtastschritt berechnet. Die Reihenfolge, in der die Gleichungen berechnet werden, darf nicht vertauscht werden, da die Ergebnisse teilweise voneinander abhängen.

[0046] Der Signalfuss im erfindungsgemässen Kalman-Filter KF ist in Fig. 5 gezeigt. Für jedes Intervall erfolgt die Addition der Produkte aus Eingangswert $q_1(k)$ mal Matrix $B(k)$ sowie geschätzter Zustandsvektor $x_e(k)$ mal Matrix $A(k)$ in der Additionsstufe ADD1. Die Summe ergibt nach der zeitlichen Verschiebung den neuen unkorrigierten internen Zustandsvektor $x(k)$ der mit der Matrix $C_1 = [00011]$ multipliziert wird, wodurch die Summe der Werte x_4 plus x_d gebildet wird ($q_{2m} = x_4 + x_d$). Anschliessend wird anhand der Differenzstufe DIFF die Differenz zwischen der vom Modell neu bestimmten Verkehrsstärke $q_{2m}(k)$ und der tatsächlich gemessenen Verkehrsstärke $q_2(k)$ (am Ausgang des Verkehrsabschnittes) gebildet. Die resultierende Differenz ($q_{2m}(k) - q_2(k)$) wird mit der Kalman-Matrix $L(k)$ multipliziert, wodurch Werte gebildet werden, mit denen der Zustandsvektor $x(k)$ anhand der Additionsstufe ADD3 korrigiert bzw. in den geschätzten Zustandsvektor $x_e(k)$ umgewandelt wird. Die geschätzten Werte x_{4e} und x_{de} werden anhand der Matrizen $C_1 = [00011]$ und $C_2 = [0000-1]$ ausgelesen. Anhand von C_1 wird die Summe der geschätzten Werte x_{4e} und x_{de} gebildet, welche den Schätzwert $q_{2e}(k)$ ergibt. Wie bereits erwähnt, sind die Matrizen C_1 und C_2 konstant. Das letzte Element der Matrix C_2 ist negativ, damit man bei Stau einen positiven Wert für $q_{2de}(k)$ erhält. Selbstverständlich können alle Rechenoperationen durch ein dem Fachmann bekanntes Rechnersystem (z.B.: Prozessor, Signalprozessor) durchgeführt werden.

[0047] Fig. 7 zeigt den vom Kalman-Filter KF geschätzten Verlauf der Verkehrsstärke q_{2e} sowie die geschätzte Verkehrsstärke q_{2de} auf der virtuellen Ein- und Ausfahrt, beeinflusst durch eine Störung, die zu einem Zeitpunkt t_1 auftritt und während der Zeit T_{dist} bis zu einem Zeitpunkt t_2 anhält. Bis zum Zeitpunkt t_1 können die Fahrzeuge den Verkehrsabschnitt ungehindert passieren, so dass die am Ein- und Ausgang festgestellten Verkehrsstärken unter Vernachlässigung der Laufzeitunterschiede dem Wert q_1 entsprechen. Zum Zeitpunkt t_1 tritt eine Störung auf, durch die innerhalb dem Verkehrsabschnitt ein Engpass entsteht, der den Verkehr nur noch mit der reduzierten Verkehrsstärke q_{2dist} passieren lässt. Damit entsprechende Korrektur- und Sicherheitsmassnahmen rechtzeitig ergriffen werden können, muss die Störung in der Verkehrsleitzentrale unverzüglich erkannt werden. In Fig. 7 ist zusätzlich ein für die Messgrössen q_1 und q_2 typischer Verlauf angegeben. Dabei ist ersichtlich, dass die Messgrössen q_1 , q_2 auch im ungestörten Fall grosse statistische Schwankungen aufweisen und dass die Auswirkung einer Störung innerhalb des Verkehrsabschnittes erst nach einer erheblichen Verzögerung feststellbar ist. Die erfindungsgemässe Vorrichtung und das Verfahren, durch die Ein- und Ausgangsgrössen q_1 , q_2 anhand des Kalman-Filters KF verarbeitet werden, erlauben nun, das Auftreten der Störung praktisch verzögerungsfrei zu erfassen. Unmittelbar nach Auftreten der Störung läuft der Wert q_{2de} hoch. Dies entspricht einem Anstieg der geschätzten Verkehrsstärke q_{2de} auf der Zufahrt zum virtuellen Parkplatz. Nach Aufhebung der Störung zum Zeitpunkt t_2 steigt die Verkehrsstärke q_{2de} vom virtuellen Parkplatz zurück in den Verkehrsabschnitt wieder an und fällt anschliessend mit der Angleichung der Verkehrsstärken q_1 und q_2 am Ein- und Ausgang des Verkehrsabschnittes wieder auf Null zurück. Durch Vergleich der geschätzten Verkehrsstärken q_{2de} zwischen dem virtuellen Parkplatz und dem überwachten Verkehrsabschnitt mit positiven und negativen Schwellwerten thp ; thm kann daher jeweils schnell festgestellt werden, ob eine Störung aufgetreten ist oder aufgehoben wurde.

[0048] Die Schwellwerte werden entsprechend der Grösse der zu erfassenden Störung gewählt. Vorzugsweise werden mehrere Schwellwerte vorgesehen, welche den Zuständen "leichte Verkehrsbehinderung", "zähflüssiger Verkehr" oder "Stau" entsprechen. Beim Eintreten der entsprechenden Zustände können daher die geeigneten Massnahmen (z.B. Stauwarnung) initialisiert werden.

[0049] Zudem können verschiedene Strassenabschnitte miteinander verbunden werden. Die Modelle unterschied-

licher Strassenabschnitte lassen sich einfach aneinander reihen, wobei für jedes Modell wiederum Länge, Ausgangs- und Eingangsgrößen des betreffenden Verkehrsabschnittes zu berücksichtigen sind. Messwerte am Ausgang eines Verkehrsabschnittes können daher gleichzeitig als Eingangsgrößen für den anschliessenden Verkehrsabschnitt verwendet werden. Durch Verbindung mehrerer Verkehrsabschnitte kommt eine verzögerungsfreie Glättungswirkung zum tragen.

[0050] Anhand der gewonnen Kenntnisse über die Verkehrsstärken lassen sich ferner auch die zu erwartenden Reisezeiten schnell und präzise berechnen. Dadurch können für die Verkehrsteilnehmer auch optimale Reiserouten festgelegt werden.

10 Literaturverzeichnis

[0051]

[1] Michael Cremer, Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen, Springer Verlag, Berlin 1979

[2] Kai Müller, Entwurf robuster Regelungen, Teubner Verlag, Stuttgart 1996

[3] Lothar Papula, Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Vieweg Verlag, Wiesbaden 1997, 8. Auflage

[4] Jürgen Ackermann, Abtastregelung, Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin 1988

20 Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung des Verkehrszustandes innerhalb eines Verkehrsabschnittes mit einem auf einem Modell (MOD) basierenden Kalman-Filter (KF), durch das die Länge l_s des Verkehrsabschnittes sowie die am Ein- und Ausgang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärken q_1 bzw. q_2 berücksichtigt werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein transportorientiertes Modell (MOD) gewählt wird, in dem für wenigstens zwei Segmente ($s_1; \dots; s_n$) des Verkehrsabschnittes anhand der Länge l_s sowie der am Eingang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärke q_1 und der Fahrzeuggeschwindigkeit $v_1(k)$ in Abtastintervallen k jeweils ein einen Korrekturwert (x_d) sowie für jedes Segment ($s_1; \dots; s_n$) einen Verkehrsstärkewert ($x_1; \dots; x_n$) enthaltenden Vektor $x(k)$ gebildet wird, der durch Vergleich mit der am Ausgang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärke q_2 anhand des Kalman-Filters (KF) korrigiert wird, so dass dem korrigierten Vektor $x_e(k)$ präziserte Schätzwerte q_{2e} für die Verkehrsstärke am Ausgang des Verkehrsabschnittes sowie ein Schätzwert q_{2de} für eine den inneren Zustand des Verkehrsabschnittes repräsentierende Differenzverkehrsstärke q_{2d} entnehmbar sind.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein neuer Vektor $x(k+1)$ anhand von in Abhängigkeit der Geschwindigkeit $v_1(k)$ für jedes Abtastintervall k neu festgelegten Matrizen $A(k)$ und $B(k)$ des erweiterten Verkehrsmodells (MOD) wie folgt berechnet wird:

$$x(k+1) = A(k) x_e(k) + B(k) q_1(k),$$

wobei der alte Vektor $x(k)$ durch das Kalman-Filter (KF) in den korrigierten Vektor $x_e(k)$ überführt wird:

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \\ x_d \end{bmatrix} \Rightarrow x_e(k) = \begin{bmatrix} x_{1e} \\ x_{2e} \\ \dots \\ x_{ne} \\ x_{de} \end{bmatrix},$$

indem die Differenz zwischen dem Messwert $q_2(k)$ und der Summe der Werte $x_n(k)$ und $x_d(k)$ mit einer für jedes Abtastintervall neu festgelegten Kalman-Matrix $L(k)$ multipliziert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schätzwerte q_{2de} für die den inneren Zustand des Verkehrsabschnittes repräsentierenden Differenzverkehrsstärken q_{2d} mit wenigstens einem Schwellwert th_p ; th_m verglichen werden, nach dessen Überschreiten eine Zustandsänderung innerhalb des Verkehrsabschnittes festgestellt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Abhängigkeit der Polarität und Amplitude der Schätzwerte q_{2de} schrittweise Reduktionen und/oder Steigerungen der Kapazität des Verkehrsabschnittes festgestellt und in Abhängigkeit davon Massnahmen zur Information der Verkehrsbeteiligten und/oder zur Steuerung des Verkehrs getroffen werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-4, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Verkehrsabschnitte in einem Modell (MOD) verknüpft und von einem Kalman-Filter (KF) überwacht werden und/oder dass in Abhängigkeit der festgestellten Zustände Reisezeiten und/oder optimale Verkehrsrouten berechnet werden.

6. Vorrichtung zur Ermittlung des Verkehrszustandes innerhalb eines Verkehrsabschnittes mit einem auf einem Modell (MOD) basierenden Kalman-Filter (KF), durch das die Länge l_s sowie die mittels Messfühlem am Ein- und Ausgang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärken q_1 bzw. q_2 berücksichtigt werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein transportorientiertes Modell (MOD) vorgesehen ist, in dem für wenigstens zwei Segmente ($s_1; \dots; s_n$) des Verkehrsabschnittes anhand der Länge l_s sowie der am Eingang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärke q_1 und der Fahrzeuggeschwindigkeit $v_1(k)$ in Abtastintervallen k jeweils ein einen Korrekturwert (x_d) sowie für jedes Segment ($s_1; \dots; s_n$) einen Verkehrsstärkewert ($x_1; \dots; x_n$) enthaltenden Vektor $x(k)$ erzeugbar ist, der durch Vergleich mit der am Ausgang des Verkehrsabschnittes gemessenen Verkehrsstärke q_2 anhand des Kalman-Filters (KF) korrigierbar ist, so dass dem korrigierten Vektor $x_e(k)$ präzierte Schätzwerte q_{2e} für die Verkehrsstärke am Ausgang des Verkehrsabschnittes sowie ein Schätzwert q_{2de} für eine den inneren Zustand des Verkehrsabschnittes repräsentierende Differenzverkehrsstärke q_{2d} entnehmbar sind.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein neuer Vektor $x(k+1)$ anhand von in Abhängigkeit der Geschwindigkeit $v_1(k)$ für jedes Abtastintervall k neu festgelegten Matrizen $A(k)$ und $B(k)$ des erweiterten Verkehrsmodells (MOD) wie folgt berechenbar ist:

$$x(k+1) = A(k) x_e(k) + B(k) q_1(k),$$

wobei der alte Vektor $x(k)$ durch das Kalman-Filter (KF) in den korrigierten Vektor $x_e(k)$ überführbar ist

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \\ x_d \end{bmatrix} \Rightarrow x_e(k) = \begin{bmatrix} x_{1e} \\ x_{2e} \\ \dots \\ x_{ne} \\ x_{de} \end{bmatrix},$$

indem die Differenz zwischen dem Messwert $q_2(k)$ und der Summe der Werte $x_n(k)$ und $x_d(k)$ mit einer für jedes Abtastintervall neu festgelegten Kalman-Matrix $L(k)$ multiplizierbar ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schätzwerte q_{2de} für die den inneren Zustand des Verkehrsabschnittes repräsentierenden Differenzverkehrsstärken q_{2d} mit wenigstens einem Schwellwert th_p ; th_m vergleichbar sind, nach dessen Überschreiten eine Zustandsänderung innerhalb des Verkehrsabschnittes feststellbar ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Abhängigkeit der Polarität und Amplitude der Schätzwerte q_{2de} schrittweise Reduktionen und/oder Steigerungen der Kapazität des Verkehrsabschnittes feststellbar und in Abhängigkeit davon Massnahmen zur Information der Verkehrsbeteiligten und/oder zur Steuerung des Verkehrs realisierbar sind.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6-9, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Verkehrsabschnitte in einem Modell (MOD) verknüpft und durch ein Kalman-Filter (KF) überwacht sind und/oder dass in Abhängigkeit der festgestellten Zustände Reisezeiten und/oder optimale Verkehrsrouten berechenbar sind.

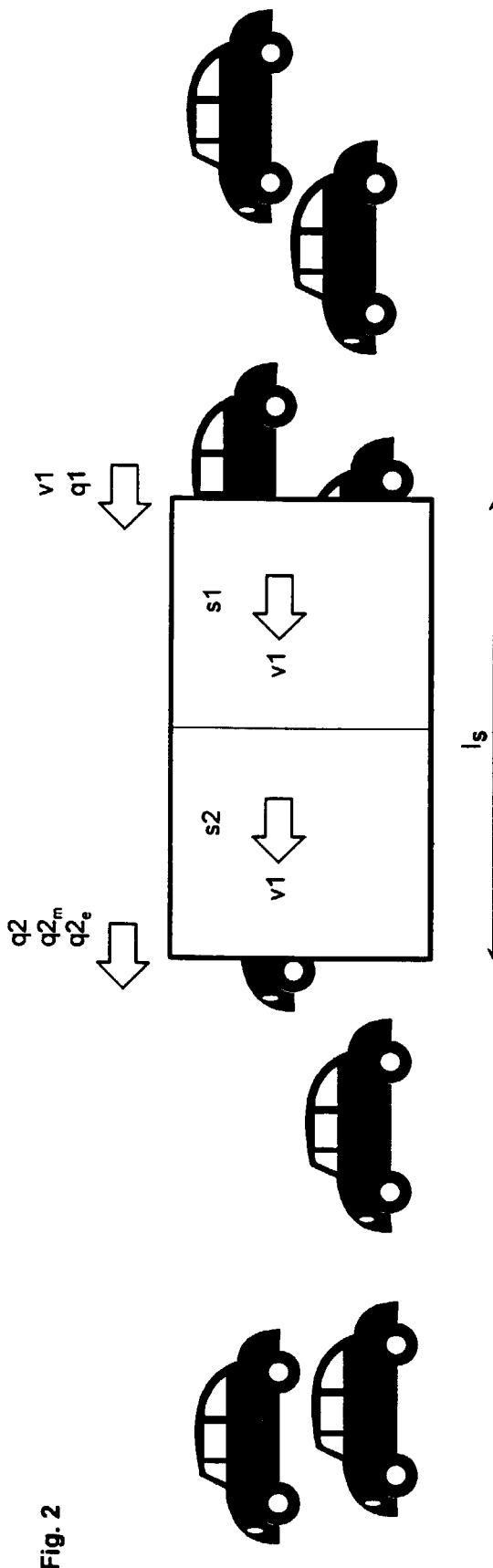
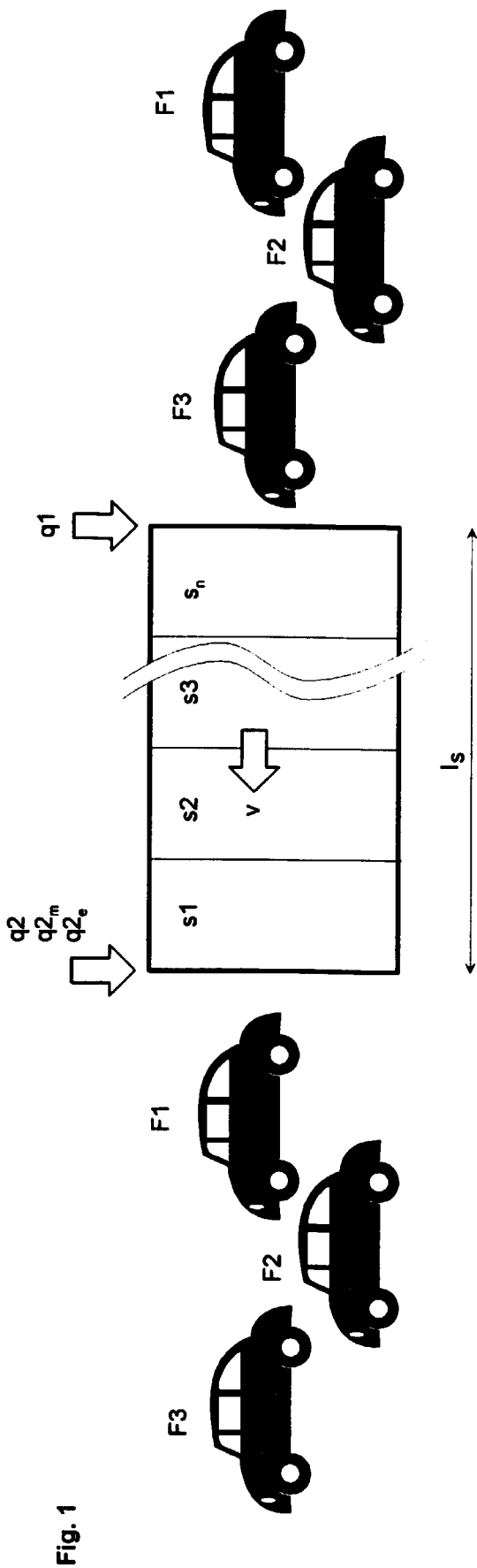


Fig. 3

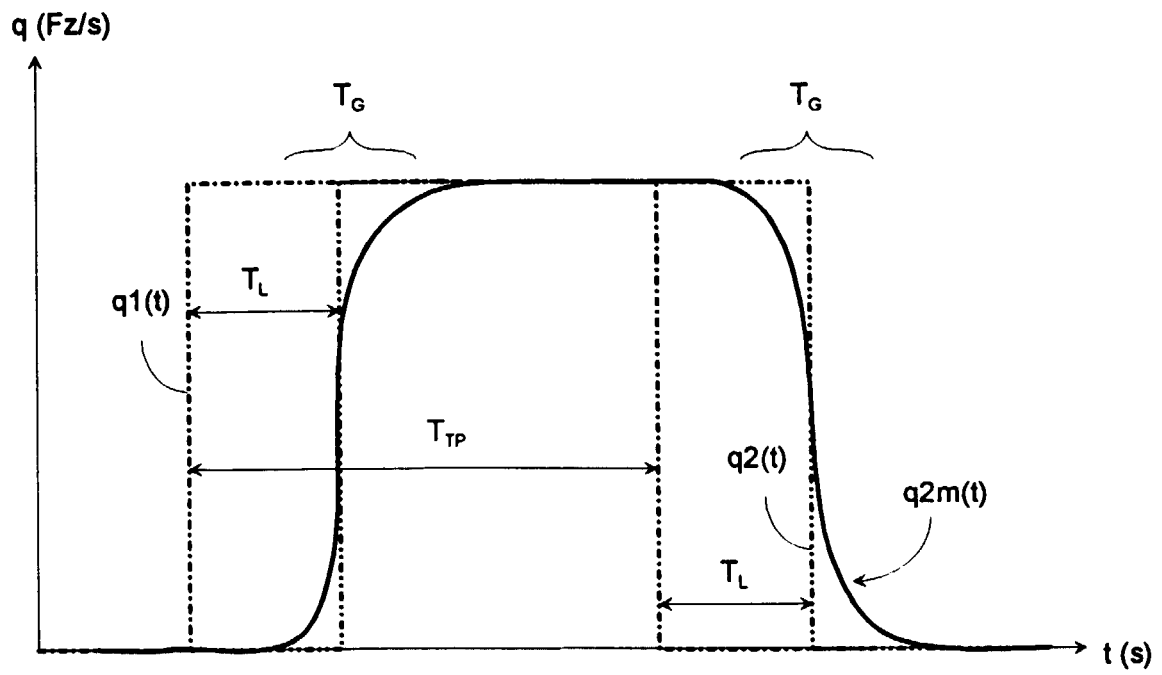
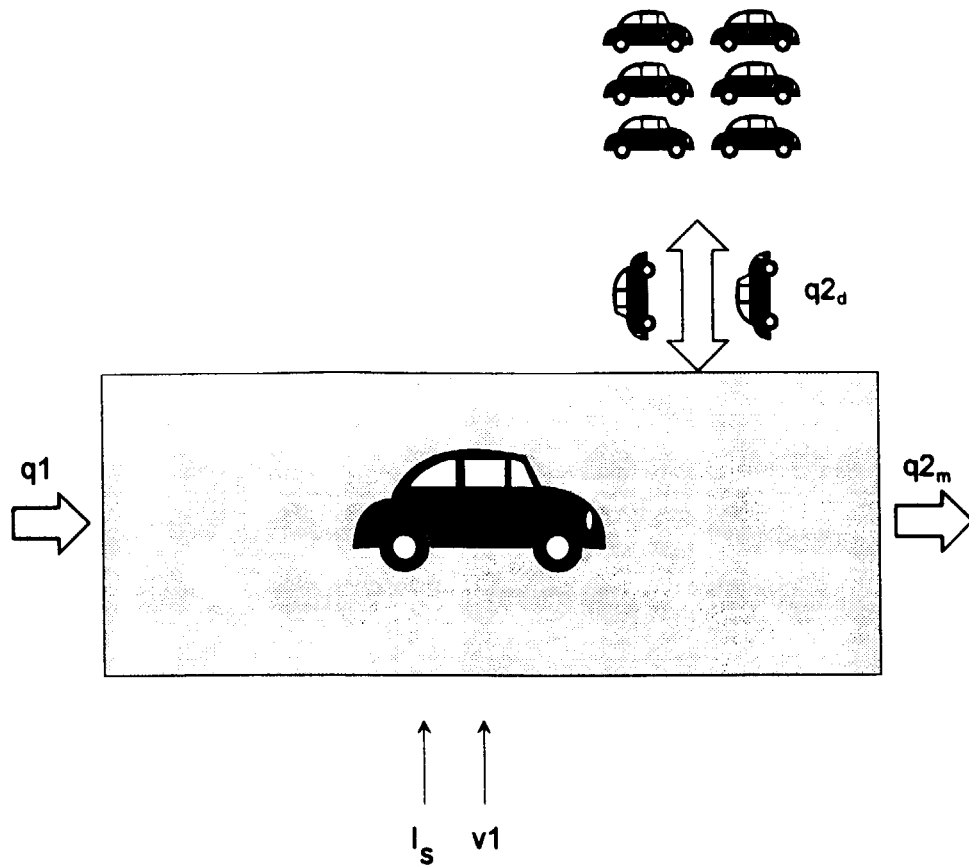


Fig. 4



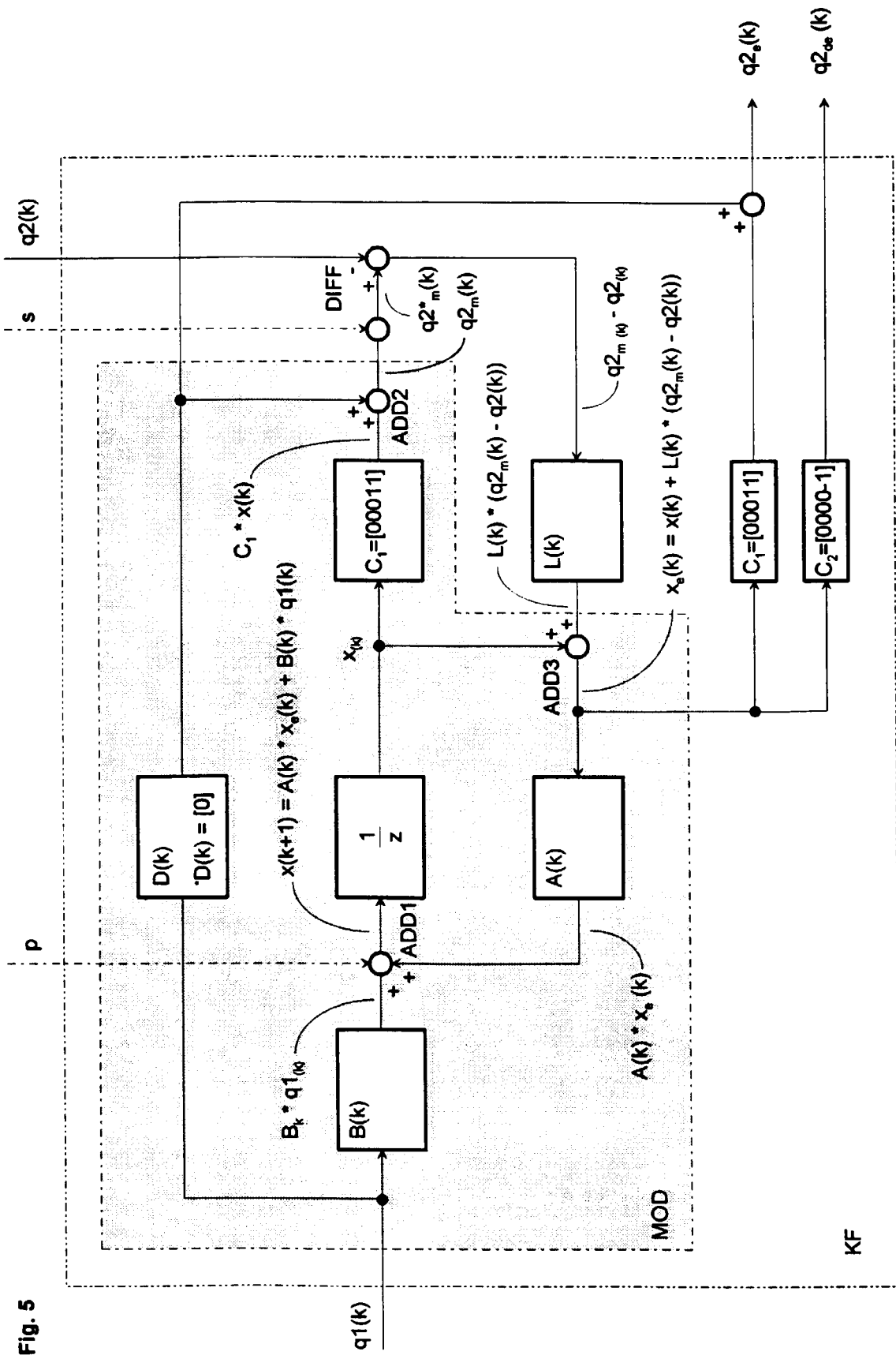


Fig. 6

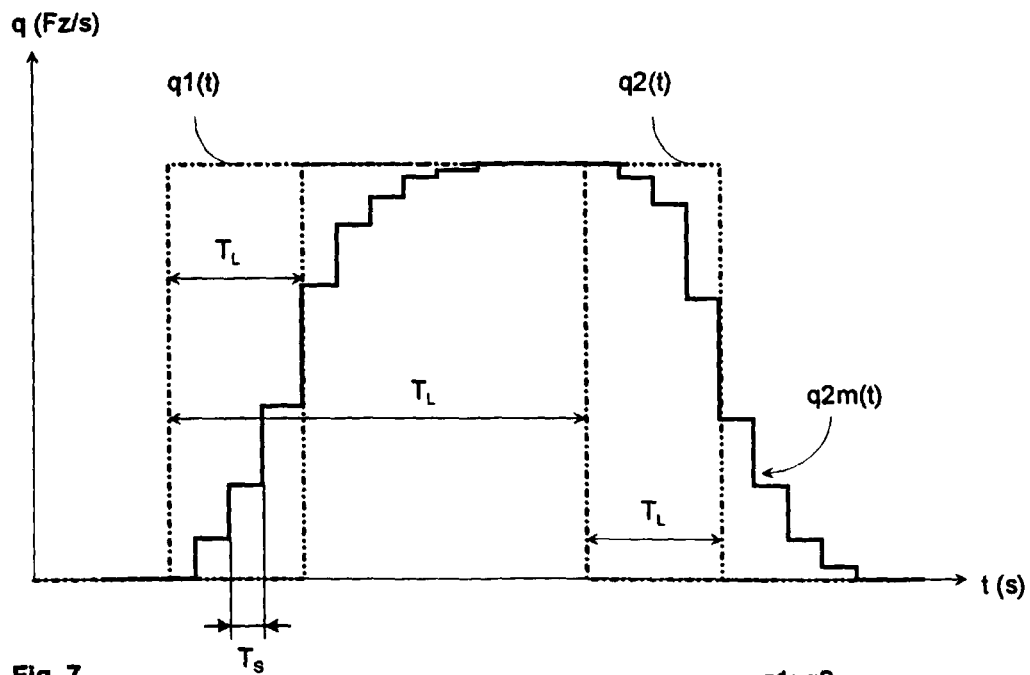
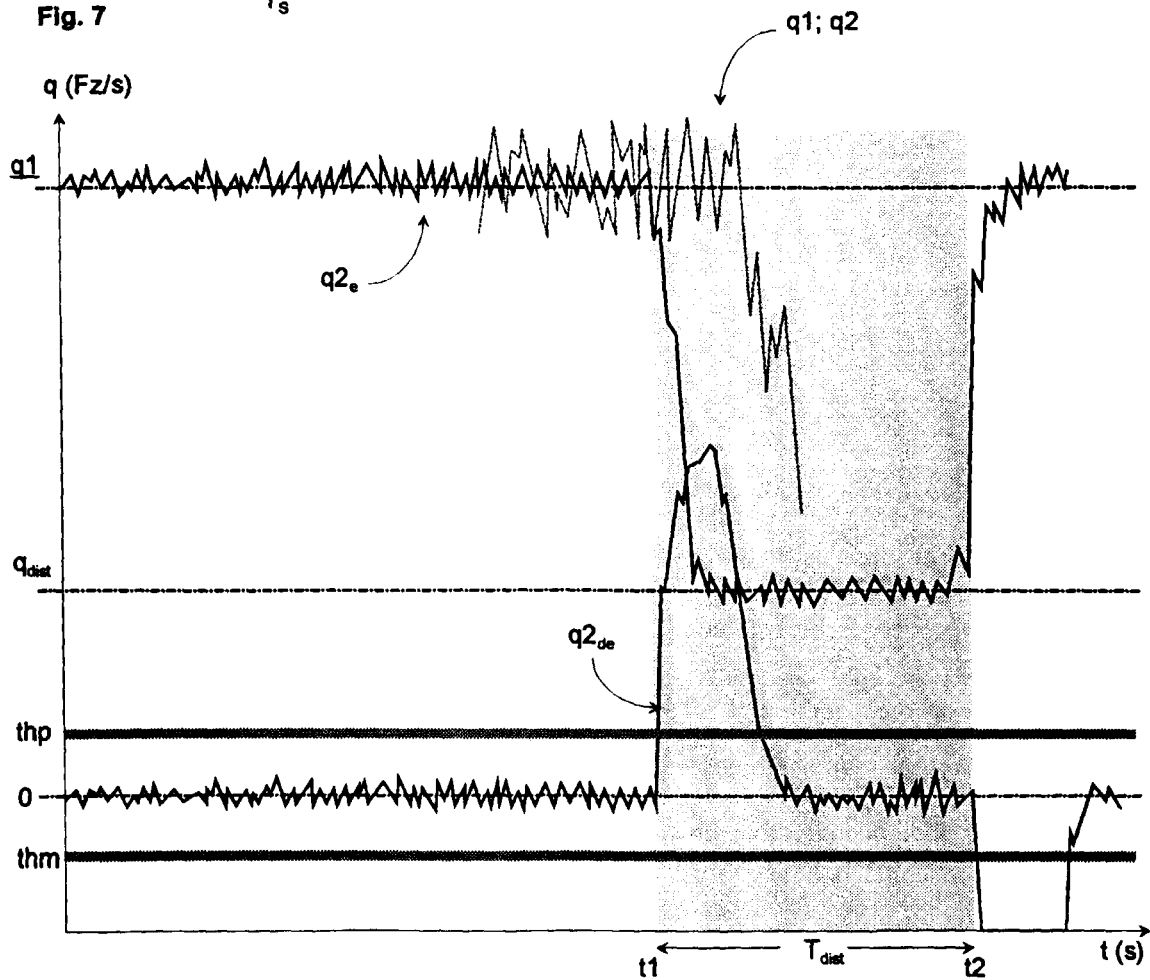


Fig. 7





Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 00 10 8359

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
X A	US 5 801 943 A (NASBURG ROBERT E) 1. September 1998 (1998-09-01) * Abbildungen 1,4,5,10,12-16,19-22,24-27 * * Spalte 2, Zeile 15-20 * * Spalte 3, Zeile 50-55 * * Spalte 5, Zeile 15-45 * * Spalte 6, Zeile 35-50 * * Spalte 8, Zeile 10-20 * * Spalte 11, Zeile 55-65 * * Spalte 21, Zeile 25-35,45-50,60-70 * * Spalte 22, Zeile 20-30,45-55 * * Spalte 23, Zeile 5-10 * * Spalte 37, Zeile 30-70 * * Spalte 38, Zeile 5-10 * -----	1,2,5-7, 10 3,8,9	G08G1/01
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.7) G08G G05B G07F G06G H03H
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 2. Oktober 2000	Prüfer Coffa, A
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03/82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 00 10 8359

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am

Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

02-10-2000

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5801943 A	01-09-1998	US 5696503 A	09-12-1997

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82