

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 276 085 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
21.05.2003 Patentblatt 2003/21

(51) Int Cl.7: **G08G 1/01**

(21) Anmeldenummer: **01116930.7**

(22) Anmeldetag: **11.07.2001**

(54) **Verfahren zur Bestimmung einer Staukennzahl und zur Ermittlung von Rückstaulängen**

Method for determining a traffic jam index and for determining tailback lengths

Procédé pour déterminer un index d'embouteillage et pour déterminer des longueurs de refoulement

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

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
15.01.2003 Patentblatt 2003/03

(73) Patentinhaber: **TransVer GmbH
80538 München (DE)**

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

(74) Vertreter: **Grünecker, Kinkeldey,
Stockmair & Schwanhäusser Anwaltssozietät
Maximilianstrasse 58
80538 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 504 638 DE-A- 3 621 842

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 016, no. 100 (P-1323), 11. März 1992 (1992-03-11) & JP 03 276399 A (TOSHIBA CORP), 6. Dezember 1991 (1991-12-06)**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1998, no. 09, 31. Juli 1998 (1998-07-31) & JP 10 105865 A (AMANO CORP), 24. April 1998 (1998-04-24)**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1996, no. 10, 31. Oktober 1996 (1996-10-31) & JP 08 161686 A (SUMITOMO ELECTRIC IND LTD;SUMITOMO DENKO SYST KK), 21. Juni 1996 (1996-06-21)**

EP 1 276 085 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 vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung einer Staukennzahl δ und sich daraus ergebende selbstkalibrierende Verfahren zur Schätzung von Rückstaulängen an Bedienstationen zur Abfertigung einzeln bewegter Einheiten, wie beispielsweise Lichtsignalanlagen oder Schleusen, mit einem davor befindlichen Detektor. Die so ermittelten Größen und daraus ableitbare Kennwerte können zur Steuerung der Lichtsignalanlagen oder Schleusen eingesetzt oder zur Anzeige des Verkehrszustandes in übergeordneten Einrichtungen verwendet werden.

Stand der Technik

[0002] Ein wichtiges Anliegen der Straßenverkehrstechnik ist die Bestimmung von Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen, um Informationen über den Verkehrsfluß zu gewinnen. Die Kenntnis der Rückstaulängen kann außerdem zur Steuerung der Signalanlagen dienen (Bernhard Friedrich, *Methoden und Potentiale adaptiver Verfahren für die Lichtsignalsteuerung*, Straßenverkehrstechnik 9/1996). Nach Joos Bernhard, Thomas Riedel, *Erkennung von Stau mit kurzen Schleifendetektoren*, Straßenverkehrstechnik 7/1999, können Stauungen an Lichtsignalanlagen nur zwischen Haltlinie und Detektor erkannt oder errechnet werden. Gleiches gilt auch für Stauungen an beliebigen Bedienstationen zur Abfertigung einzeln bewegter Einheiten mit sich abwechselnden Sperr- und Durchlaßphasen.

[0003] Ein wesentlicher Nachteil dieses bekannten Verfahrens besteht darin, keine Staulängen bestimmen zu können, die größer als die Entfernung zwischen Bedienstation und Detektor sind.

[0004] Die Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, mit dem eine Bestimmung der Rückstaulänge an Bedienstationen zur Abfertigung einzeln bewegter Einheiten nicht nur zwischen Bedienstation und Detektor ermöglicht wird, um mit Hilfe dieser Rückstaulänge oder daraus abgeleiteter Kennwerte wie beispielsweise Wartezeiten eine Lichtsignalanlage oder Schleuse zu steuern oder Verkehrszustände in übergeordneten Einrichtungen anzuzeigen.

Beschreibung der Erfindung

[0005] Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Verfahren zur Ermittlung einer Staukennzahl δ gemäß Anspruch 1, mit dem auf einfache Weise eine Bestimmung der Rückstaulänge erfolgen kann. Darüber hinaus lassen sich mit dieser Staukennzahl auch andere für die Anlagensteuerung relevante Parameter, wie beispielsweise der Sättigungszeitbedarf, ermitteln. Verfahren zur Bestimmung der Rückstaulänge unter Verwendung der Staukennzahl sind Gegenstand der Ansprüche 4 und 16.

[0006] Insbesondere stellt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung einer Staukennzahl δ an Bedienstationen zur Abfertigung einzeln bewegter Einheiten bereit, wobei jede Abfertigungsphase aus einer Sperr- und einer Durchlaßphase besteht und sich vor der Bedienstation ein Detektor befindet, durch Messung der Zeit (Füllzeit) zwischen Sperrbeginn oder einem an den Sperrbeginn gebundenen Zeitpunkt und Dauerbelegung des Detektors und anschließendem Vergleich mit einer Referenzfüllzeit, wobei δ bei Überschreiten der Referenzfüllzeit ein erster Wert und sonst ein zweiter Wert zugeordnet wird.

[0007] Als Beginn der Füllzeit kann neben dem Sperrbeginn beispielsweise auch ein an eine Übergangszeit vor Beginn der Sperrphase gekoppelter Zeitpunkt gewählt werden. Bei Lichtsignalen käme als Übergangszeit die Gelbphase in Frage.

[0008] Wird die Referenzfüllzeit unterschritten, wird also die Strecke zwischen Bedienstation und Detektor schneller als in der Referenzzeit aufgefüllt, so kann man von einem Stau ausgehen. Andernfalls befinden sich die Einheiten im freien Fluß.

[0009] Die Referenzfüllzeit entnimmt man hierbei beispielsweise simulatorischen Tests oder empirischen Untersuchungen. Vorteilhafterweise wird die Referenzfüllzeit in Abhängigkeit von der Geometrie des Zuflußbereichs, beispielsweise von dem Abstand zwischen Detektor und Bedienstation, der Spurbreite etc., und/oder von der Durchlaßzeit der Bedienstation gewählt.

[0010] Mit der auf die oben beschriebene Weise ermittelten Staukennzahl δ lassen sich eine Mehrzahl für eine Durchsatzoptimierung oder eine Verkehrszustandsanzeige relevanter Parameter ermitteln.

[0011] Ein erstes Verfahren zur Schätzung der Rückstaulänge L_n unter Zuhilfenahme der erfindungsgemäß ermittelten Staukennzahl δ_n in der n -ten Abfertigungsphase beruht auf der Annahme, daß L_n als lineare Funktion einer geglätteten Staukennzahl δ_n , die aus der Staukennzahl δ_n unter Berücksichtigung der $(n-1)$ -ten geglätteten Staukennzahl δ_{n-1} ermittelt wird, gegeben ist:

$$\hat{L}_n(\hat{\delta}_n) = m\hat{\delta}_n, \quad (1)$$

wobei $\hat{\delta}_n$ nicht mehr nur zwei sondern mehrere Werte annehmen kann. Mit einem vorgegebenen m ergibt sich die Rückstaulänge bei gegebenem δ_n aus Gleichung (1). Die Staukennzahl wird geglättet, um zu große Sprünge der Staukennzahl von einer Abfertigungsphase zur nächsten zu vermeiden.

[0012] Dieses Verfahren zeichnet sich dadurch aus, daß zur Ermittlung der Rückstaulänge keine Geschwindigkeitsmessungen erforderlich sind.

[0013] Vorteilhafterweise wird die Steigung in jeder n -ten Abfertigungsphase neu angepaßt. Dazu ermittelt man die Verkehrsstärke q_n . Diese ergibt sich beispielsweise aus einer Schätzung oder aus der gemessenen Zahl der Einheiten, die während der n -ten Abfertigungsphase den Detektor passieren. Aus der Verkehrsstärke läßt sich errechnen, wieviele Einheiten während der n -ten Sperrphase mindestens vor der Bedienstation vorhanden waren; man erhält somit eine untere Schranke L_n^0 für die Rückstaulänge. Andererseits ergibt die Rückstaulängenfunktion des vorigen Abfertigungsschrittes $L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1}\delta_n$ mit δ_n und geeignet gewähltem m_{n-1} eine Schätzung der tatsächlichen Rückstaulänge in der aktuellen Abfertigungsphase. Durch Vergleich von L_n^0 und $L_{n-1}(\delta_n)$ kann man m_n und damit L_n kalibrieren.

[0014] Die Steigung der $(n - 1)$ -ten Abfertigungsphase erhält man vorteilhafterweise durch rekursive Anwendung des gerade beschriebenen Verfahrens mit geeigneten Anfangswerten für δ_0 und m_0 . Dieses Verfahren ist somit selbstkalibrierend.

[0015] Bevorzugt glättet man die Staukennzahl, indem man eine Konvexkombination der aktuellen Staukennzahl und der geglätteten Staukennzahl der vorigen Abfertigung bildet:

$$\hat{\delta}_n = \alpha \delta_n + (1 - \alpha) \hat{\delta}_{n-1}, \quad \alpha \in [0,1]. \quad (2)$$

[0016] Die Verkehrsstärke q_n wird vorzugsweise mit dem vor der Bedienstation befindlichen Detektor gemessen.

[0017] In einer vorteilhaften Ausführung ist die untere Schranke der Staulänge L_n^0 als lineare Funktion von q_n gegeben, da bereits diese einfache Form eine gute Näherung darstellt. Vorzugsweise hängt die Steigung dieser Geraden von der Zeit ab, in der der Detektor während eines Abschnitts der Abfertigungsphase dauerbelegt ist. Berücksichtigt man diese Abhängigkeit, verbessert sich die Übereinstimmung mit den Realdaten.

[0018] Es ist von Vorteil, die Steigung m_n im n -ten Schritt nur dann zu verändern, wenn entweder δ_n den zweiten Wert angenommen hat und $L_n^0 > L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1}\delta_n$ oder wenn δ_n den ersten Wert angenommen hat und $L_n^0 < L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1}\delta_n$. Im ersten Fall zeigt einerseits δ_n einen Stau an in einer Entfernung von mindestens L_n^0 von der Bedienstation, andererseits liegt die Schätzung der Staulänge $L_{n-1}(\delta_n)$ unter L_n^0 . Im zweiten Fall weist zwar δ_n auf keinen Stau der Länge L_n^0 hin, nach der Schätzung $L_{n-1}(\delta_n)$ dagegen ist der Stau sogar noch länger als L_n^0 . In beiden Fällen ist daher eine Kalibrierung der Steigung m_n angebracht. Falls sich dagegen der Wert der Staukennzahl und die geschätzte Staulänge nicht widersprechen, wird die Steigung beibehalten: $m_n = m_{n-1}$.

[0019] Man kann zur Anpassung der Steigung m_n eine geglättete Staulänge L'_n verwenden, die sich als Kombination aus L_n^0 und $L_{n-1}(\delta_n)$ ergibt:

$$L'_n = \beta L_n^0 + (1 - \beta) L_{n-1}(\delta_n), \quad \beta > 0. \quad (3)$$

[0020] Die nach dem oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren ermittelte Staukennzahl δ kann auch zur Bestimmung des Sättigungszeitbedarfs verwendet werden; hierbei handelt es sich um den durchschnittlichen Zeitbedarfswert einer Einheit bei gesättigtem (nicht mehr freiem) Fluß während der Durchlaßphase. Der Sättigungszeitbedarf ist einerseits ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Bedienstation. Andererseits kann er auch zur Rückstaulängenschätzung mittels eines Warteschlangenmodells dienen.

[0021] Zur Bestimmung des Sättigungszeitbedarfs t_n^B im n -ten Abfertigungsschritt wird als erstes die Staukennzahl δ mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ermittelt und die Verkehrsstärke q_n gemessen oder geschätzt. Der Sättigungszeitbedarf kann dann, unter Verwendung einer geeigneten Anfangsbedingung für t_0^B , über

$$t_n^B = \begin{cases} \frac{t_n^g}{q_n}, & \text{falls } \delta_n = \delta_{n-1} \text{ gleich dem zweiten Wert,} \\ t_{n-1}^B, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (4)$$

berechnet werden, wobei t_n^g die Durchlaßzeit im n -ten Abfertigungsschritt bezeichnet.

[0022] Um zu große Änderungen des Sättigungszeitbedarfs von einem Abfertigungsschritt zum nächsten zu vermei-

den, läßt man vorzugsweise in jedem Schritt nur eine vorgegebene, maximale Änderung $\Delta t_{\max}^B > 0$ des Sättigungszeitbedarfs zu. Falls also das aus Gleichung (4) gewonnene t_n^B eine der Ungleichungen

$$\Delta t^B := t_n^B - t_{n-1}^B > \Delta t_{\max}^B \text{ oder } \Delta t^B < -\Delta t_{\max}^B \quad (5)$$

erfüllt, so wird vorteilhafterweise ein modifizierter Sättigungszeitbedarf $\hat{t}_n^B$ mit

$$\hat{t}_n^B = t_{n-1}^B + \Delta t_{\max}^B \text{ oder } \hat{t}_n^B = t_{n-1}^B - \Delta t_{\max}^B \quad (6)$$

berechnet.

[0023] Es ist von Vorteil, die Verkehrsstärke q_n mit dem vor der Bedienstation befindlichen Detektor zu messen.

[0024] Alternativ zu dem oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren läßt sich die Rückstaulänge mit Hilfe eines Warteschlangenmodells ermitteln, das als zu kalibrierenden Parameter einen modelleigenen Sättigungszeitbedarf τ_n^B mit einem geeignet gewählten Anfangswert enthält. Ein derartiges Verfahren kann in jedem n -ten Abfertigungsvorgang aus folgenden Schritten bestehen:

[0025] Zunächst wird der tatsächliche Sättigungszeitbedarf t_n^B gemäß dem oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren bestimmt. Tritt eine Änderung gegenüber dem Sättigungsbedarfswert der letzten Abfertigungsphase um Δt^B ein, wird der modelleigene Sättigungsbedarfswert τ_n^B mit

$$\tau_n^B = \tau_{n-1}^B + c_d \Delta t^B \quad (7)$$

angepaßt, wobei c_d eine geeignet gewählte Dämpfungskonstante bezeichnet. Insbesondere wird der modelleigene Sättigungsbedarfswert mit

$$\tau_n^B = \tau_{n-1}^B + c_d \operatorname{sgn}(\Delta t^B) \min\{|\Delta t^B|, \Delta t_{\max}^B\} \quad (8)$$

angepaßt, falls für den tatsächlichen Sättigungsbedarfswert nur eine maximale Änderung von $\Delta t_{\max}^B$ zugelassen wird, wobei $\operatorname{sgn}(\Delta t^B)$ das Vorzeichen von Δt^B bezeichnet. Aus der Verkehrsstärke errechnet man eine untere Schranke für die Staulänge L_n^0 . Mit diesen Größen berechnet man mit Hilfe eines Warteschlangenmodells eine erste Schätzung der Rückstaulänge L_n'' . Anschließend werden L_n'' und L_n^0 , analog zu obigem Verfahren zur Rückstaulängenschätzung, verglichen. Falls $L_n'' > L_n^0$ und δ_n den ersten Wert angenommen hat oder falls $L_n'' < L_n^0$ und δ_n den zweiten Wert angenommen hat, ist der modelleigene Sättigungszeitbedarf zu modifizieren. Mit dem kalibrierten Modellsättigungszeitbedarf wird dann mit dem Warteschlangenmodell eine kalibrierte Schätzung der Rückstaulänge berechnet.

[0026] Dieses Verfahren zeichnet sich dadurch aus, daß zur Ermittlung der Rückstaulänge keine Geschwindigkeitsmessungen erforderlich sind.

[0027] Weiterhin können vorteilhafterweise Störungen im Abfluß berücksichtigt und im Warteschlangenmodell eine entsprechend modifizierte Verkehrsstärke verwendet werden.

[0028] In einer günstigen Ausführung der Störungskompensation wird q_n nur dann modifiziert, wenn es kleiner als der zweitgrößte Wert $\max_{10,2}(q)$ der letzten zehn q -Werte ist. In diesem Fall wählt man zur Berechnung der Störungskompensation ein Zeitintervall während der Abfertigungsphase und zählt vorbestimmte, kürzere Zeitintervalle, beispielsweise die vollen Sekunden, in denen der Detektor in dem gesamten Intervall dauerbelegt ist. Das gesamte Intervall beginnt vorzugsweise einige Sekunden nach Beginn der Durchlaßphase und endet einige Sekunden nach Ende der Durchlaßphase. Dividiert man die so erhaltene Zahl durch die Länge des gesamten Intervalls, erhält man den Belegungsgrad $b \in [0, 1]$ des Detektors. Unterschreitet b eine untere Schranke u , wird einer Störungskennzahl s der Wert 0 zugeordnet. Überschreitet b eine obere Schranke o , wird s der Wert 1 zugeordnet. Ist $u \leq b \leq o$, ergibt sich s als

$$s = \frac{b-u}{o-u} \quad (9)$$

[0029] Als modifizierte Verkehrsstärke q_n' nimmt man dann

$$q'_n = q + s(1 + p_{\text{komp}})(\max_{10,2}(q) - q),$$

wobei p_{komp} eine Konstante ist, mit der die Stärke der Störungskompensation eingestellt werden kann.

[0030] Die Kalibrierung des modelleigenen Sättigungszeitbedarfs erfolgt vorteilhafterweise mit einem an einen klassischen PID-Regler (Proportional-Integral-Differential-Regler) angelehnten Rückkopplungsverfahren. Dazu soll δ_n als erstem Wert (falls kein Stau) -1 und als zweitem Wert (falls Stau) 1 zugeordnet werden. Die Kalibrierung verwendet zwei Variable: $\tilde{s}_n$ (entspricht einem Sägezahn-Integrierglied) und $\tilde{d}_n$ (entspricht einem Differenzierglied). Falls $\delta_n L_n^0 \geq \delta_n L_n^0$ ist $\tilde{s}_n = \tilde{d}_n = 0$ und der Sättigungszeitbedarf wird nicht verändert. Andernfalls definiert man die Hilfsvariable

$$A = \frac{t_n^B}{t_n^g} (L_n^B - L_n^0). \quad (11)$$

[0031] Um eine Überkorrektur des Sättigungszeitbedarfs zu vermeiden, kann man

$$A' = \text{sgn}(A) \min\{|A|, 1\} \quad (12)$$

definieren, wobei $\text{sgn}(A)$ das Vorzeichen von A bezeichnet. Man wählt nun

$$\tilde{s}_n = \begin{cases} \tilde{s}_{n-1} - \delta_n, & \text{falls } \tilde{s}_{n-1} \delta_n < 0 \\ -\delta_n, & \text{sonst} \end{cases} \quad (13)$$

und

$$\tilde{d}_n = \begin{cases} \frac{\tilde{d}_{n-1}}{t_d}, & \text{falls } \tilde{d}_{n-1} \delta_n < 0 \\ -\delta_n, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (14)$$

wobei t_d eine geeignet zu wählende Konstante ist. Daraus ergibt sich dann der kalibrierte Sättigungszeitbedarf für das Warteschlangenmodell.

$$\tilde{\tau}_n^B = \tau_n^B - (p_p A' + |A'|)(p_i \tilde{s}_n + p_d \tilde{d}_n), \quad (15)$$

wobei p_p , p_i und p_d die Parameter des Reglers bezeichnen.

[0032] Es ist von Vorteil, die berechnete Rückstaulänge zu glätten, indem man eine Konvexkombination aus L_n^0 und L_n^B bildet:

$$L_n = \gamma L_n^0 + (1-\gamma) L_n^B, \quad \gamma \in [0, 1]. \quad (16)$$

[0033] Damit wird eine Überkorrektur der Rückstaulänge vermieden.

[0034] Im folgenden werden zwei erfindungsgemäße Verfahren zur Ermittlung der Rückstaulängenschätzung unter Zuhilfenahme des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Ermittlung der Staukennzahl unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben. In der Zeichnung zeigen:

Figur 1 die berechnete Steigung m_n der Rückstaulängenfunktion in Abhängigkeit der Zeit aus Verfahren 1,

Figur 2 den geschätzten Rückstau (in Fahrzeugen) in Abhängigkeit des explizit gemessenen, geglätteten Rückstaus aus Verfahren 1,

Figur 3 die Schätzung des Zeitbedarfs t_n^B in Abhängigkeit der Zeit aus Verfahren 2.

Verfahren 1

[0035] Die Anwendung des Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung und seine Verifizierung wird an einer Zufahrt einer hochbelasteten Lichtsignalanlage (stadteinwärts Landsberger/Trappentreustraße, München) mit stark schwankenden Grünzeiten (Durchlaßzeiten) dargestellt.

[0036] Der Detektor befindet sich 30 m oder ca. 5 Fahrzeuge von der Haltlinie entfernt. Als Referenzfüllzeit werden für diese Entfernung 22 Sekunden genommen.

[0037] Bei Überschreiten der Referenzfüllzeit wird δ der Wert 0 und sonst der Wert 1 zugeordnet. Die Staukennzahl wird geglättet, indem $\delta_n = \alpha \delta_n + (1 - \alpha) \delta_{n-1}$, wobei α typischerweise zwischen 0.05 und 0.2 liegt und $\delta_0 = \delta_0 = 0$.

[0038] Die untere Schranke berechnet sich über

$$L_n^0 = q_n \sqrt{1 - \min(\gamma_1, b\gamma_2)} + a_1 \quad \gamma_i \geq 0, \quad (17)$$

wobei a_1 die Fahrzeuge zwischen Detektor und Haltlinie berücksichtigt und daher den Wert $a_1 = 5$ annimmt. In diesem Ausführungsbeispiel werden $\gamma_1 = 0.9$ und $\gamma_2 = 1.2$ gewählt. Der Belegungsgrad b des Detektors ergibt sich, indem man zwischen 5 s nach Durchlaßbeginn und 15 s nach Durchlaßende die vollen Sekunden zählt, in denen der Detektor dauerbelegt ist und anschließend durch die Gesamtlänge dieses Zeitintervalls teilt; somit ist immer $b \in [0, 1]$.

[0039] Die Steigung m_n wird in diesem Beispiel als $m_n = m' / m''$ geschrieben, wobei $m'_0 = 10$ und $m''_0 = 0.5$ geeignete Anfangswerte bilden. Die Modifizierung der Steigung erfolgt über einen geglätteten Wert $L_n^0 = \beta L_n^0(q_n) + (1 - \beta) L_{n-1}^0(\delta_n)$ mit $\beta = 0.7$. Es ist

$$m'_n = \begin{cases} \frac{(k_{n-1} - 1)m'_{n-1} + \hat{\delta}_n L'_n}{k_{n-1}}, & \text{falls sich die Werte von } \delta \text{ und } L_n^0 \text{ widersprechen} \\ m'_{n-1}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (18)$$

und

$$m''_n = \begin{cases} \frac{(k_{n-1} - 1)m''_{n-1} + \hat{\delta}_n^2}{k_{n-1}}, & \text{falls sich die Werte von } \delta \text{ und } L_n^0 \text{ widersprechen} \\ m''_{n-1}, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (19)$$

wobei

$$k_n = \begin{cases} \min\{k_{n-1} + 1, K\}, & \text{falls sich die Werte von } \delta \text{ und } L_n^0 \text{ widersprechen} \\ k_{n-1}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (20)$$

[0040] Geeignete Werte für eine schnelle, aber stabile Schätzung sind $k_0 = 10$ und $K = 1000$.

[0041] Figur 1 zeigt die Kalibrierung der Steigung m_n . Der willkürlich vorgegebene Wert von ca. 20 steigt am ersten

Tag auf den Wert an, der der Verkehrscharakteristik der Spur entspricht. Anschließend finden nur noch leichte Anpassungsvorgänge statt. Das Regelverhalten ist stabil und robust.

[0042] In Figur 2 sieht man den Vergleich von der geschätzten, geglätteten Rückstaulänge mit manuell erhobenen, leicht geglätteten Rückstaulängenwerten. Der gemessene Rückstau L_n^{real} wurde mit

$$\hat{L}_n^{real} = 0.3L_n^{real} + 0.7\hat{L}_{n-1}^{real} \quad (21)$$

geglättet. Ein quadrierter Korrelationskoeffizient von $R^2 = 0.7748$ weist auf einen guten Zusammenhang zwischen geschätzter und realer Rückstaulänge hin.

Verfahren 2

[0043] Als Anwendung des Verfahrens wird die Bestimmung der Rückstaulänge an der in obigem Beispiel genannten Zufahrt einer Lichtsignalanlage mit Hilfe eines Warteschlangenmodells beschrieben.

[0044] Zur Berechnung des Sättigungszeitbedarfs wird eine maximale Änderung von $\Delta t_{max}^B = 0.02$ zugelassen. Die Änderung wird für die Verwendung im Warteschlangenmodell zusätzlich mit dem Faktor $c_d = 0.9$ gedämpft.

[0045] Figur 3 zeigt die Ermittlung des Zeitbedarfswerts t_n^B in Abhängigkeit der Zeit bei einem Anfangswert von $t_0^B = 2s$. Erkennbar ist, daß neben dem Einschwingvorgang innerhalb der beiden Werkstage mehrmals Schwankungen von t_n^B auftreten. Diese Schwankungen erklären sich unter anderem mit veränderlichen Verkehrszusammensetzungen und tageszeitabhängigem Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer.

[0046] Störungen im Abfluß werden über den aus obigem Beispiel bekannten Belegungsgrad kompensiert. Die Störungskennzahl s ergibt sich aus Gleichung (9), wobei für die Schranken $u = 0.2$ und $o = 1.1$ eingesetzt wird. Durch diese Wahl wird garantiert, daß s immer kleiner als 1 bleibt.

[0047] Das makroskopische Warteschlangenmodell wird in diesem Beispiel R. M. Kimber und E. M. Hollis, *Traffic queues and delays at road junctions*, TRRL Laboratory Report 909, Berkshire, 1979, entnommen. Die Modellgleichung für die Rückstaulänge L lautet

$$L = \frac{1}{2}(\sqrt{A^2 + B} - A) \quad (22)$$

mit

$$A = \frac{\left(1 - q \frac{\tau^B}{t_n^g}\right) \left(\frac{t_n^g}{\tau^B}\right)^2 + (1 - L_{n-1}) \frac{t_n^g}{\tau^B} - 2(1 - C)(L_{n-1} + q)}{\frac{t_n^g}{\tau^B} + (1 - C)} \quad (23)$$

und

$$B = \frac{4(L_{n-1} + q) \left(\frac{t_n^g}{\tau^B} - (1 - C)(L_{n-1} + q)\right)}{\frac{t_n^g}{\tau^B} + (1 - C)}, \quad (24)$$

wobei $C = 0.6$ die statistischen Schwankungen beim Abfluß charakterisiert.

[0048] Geeignete Parameter für die Kalibrierung des Sättigungszeitbedarfs analog zu einem PID-Regler sind $p_d = 0.003$, $p_i = 0.01$, $p_d = 0.01$ und $t_d = 1.2$.

[0049] Die Glättung der Rückstaulängenschätzung erfolgt mit $\gamma = 0.6$.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung einer Staukennzahl δ an Bedienstationen zur Abfertigung einzeln bewegter Einheiten mit sich abwechselnden Sperr- und Durchlaßphasen und mit vor der jeweiligen Bedienstation befindlichem Detektor durch Messung der Füllzeit zwischen Sperrbeginn oder einem an den Sperrbeginn gebundenen Zeitpunkt und Dauerbelegung des Detektors und anschließendem Vergleich mit einer Referenzfüllzeit, in welchem der Staukennzahl δ bei Überschreiten der Referenzfüllzeit ein erster Wert und bei Nichtüberschreitung der Referenzfüllzeit ein zweiter Wert zugeordnet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, in welchem die Referenzfüllzeit in Abhängigkeit von der Geometrie des Zuflußbereichs der Bedienstation gewählt wird.
3. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, in welchem die Referenzfüllzeit in Abhängigkeit von der Durchlaßzeit gewählt wird.
4. Verfahren zur Ermittlung der Rückstaulänge $\hat{L}_n$ in der n -ten Abfertigungsphase durch
 - (a) Bestimmung der n -ten Staukennzahl δ_n nach Anspruch 1,
 - (b) Berechnung einer geglätteten Staukennzahl δ_n unter Verwendung der $(n-1)$ -ten geglätteten Staukennzahl δ_{n-1} ,
 - (c) Ermittlung der Rückstaulänge $\hat{L}_n(\delta_n) = m \hat{\delta}_n$ mit geeignet vorgegebener Steigung m .
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die Steigung m_n in der n -ten Abfertigungsphase ermittelt wird durch
 - (a) Ermittlung der Verkehrsstärke q_n ,
 - (b) Berechnung einer unteren Schranke L_n^0 für die Staulänge in Abhängigkeit von q_n ,
 - (c) Ermittlung der Steigung m_n durch Vergleich von L_n^0 mit $L_{n-1}(\delta_n)$ mit geeignet vorgegebener Steigung m_{n-1} .
6. Verfahren nach Anspruch 5, in welchem die Steigung m_{n-1} durch rekursive Anwendung des Verfahrens nach Anspruch 5 mit geeigneten Anfangsbedingungen für m_0 und δ_0 ermittelt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4-6, in welchem die geglättete Staukennzahl $\hat{\delta}_n$ als konvexe Kombination von δ_n und δ_{n-1} gemäß $\hat{\delta}_n = \alpha \delta_n + (1 - \alpha) \delta_{n-1}$, $\alpha \in [0, 1]$, berechnet wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5-7, in welchem die Verkehrsstärke q_n mit dem vor der Bedienstation befindlichen Detektor gemessen wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5-8, in welchem die untere Schranke L_n^0 der Staulänge als lineare Funktion von q_n vorgegeben wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, in welchem die Steigung von $L_n^0(q_n)$ in Abhängigkeit von der Zeit, in welcher der Detektor während eines Abschnitts der Abfertigungsphase dauerbelegt ist, vorgegeben wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 5-10, in welchem die Steigung m_n gegenüber m_{n-1} verändert wird, falls δ_0 der zweite Wert zugeordnet wird und $L_n^0 > L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1} \delta_n$ oder falls δ der erste Wert zugeordnet wird und $L_n^0 < L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1} \delta_n$, und andernfalls $m_n = m_{n-1}$ gesetzt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 5-11, in welchem die Anpassung der Steigung m_n über einen geglätteten Wert $L_n^0 = \beta L_n^0(q_n) + (1-\beta)L_{n-1}(\delta_n)$ mit $\beta > 0$ erfolgt.
13. Verfahren zur Ermittlung des Sättigungszeitbedarfs t_n^B , der dem durchschnittlichen Zeitbedarf einer Einheit bei gesättigtem Fluß während der Durchlaßphase entspricht, durch
 - (a) Bestimmung der Staukennzahl nach einem der Ansprüche 1-3,
 - (b) Ermittlung der Verkehrsstärke q_n ,
 - (c) Bestimmung des Sättigungszeitbedarfs t_n^B unter Verwendung der Durchlaßzeit t_n^g und einer geeigneten Anfangsbedingung für t_0^B gemäß

$$t_n^B = \begin{cases} \frac{t_n^g}{q_n}, & \text{falls } \delta_n = \delta_{n-1} \text{ gleich dem zweiten Wert,} \\ t_{n-1}^B, & \text{sonst.} \end{cases}$$

14. Verfahren nach Anspruch 13, in welchem der Sättigungszeitbedarf t_n^B in jeder n-ten Abfertigungsphase um höchstens einen vorgegebenen, maximalen Betrag im Vergleich zum Sättigungszeitbedarf der (n - 1)-ten Abfertigungsphase verändert wird.
15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, in welchem die Verkehrsstärke q_n mit dem vor der Bedienstation befindlichen Detektor gemessen wird.
16. Verfahren zur Ermittlung der Rückstaulänge L_n durch
- (a) Bestimmung des Sättigungszeitbedarfs t_n^B nach einem der Ansprüche 13-15,
 - (b) Bestimmung des modelleigenen Sättigungszeitbedarfs τ_n^B gemäß $\tau_n^B = \tau_{n-1}^B + c_d(t_n^B - t_{n-1}^B)$ unter Verwendung des (n-1)-ten Modellsättigungszeitbedarfs τ_{n-1}^B und mit geeignet gewähltem c_d ,
 - (c) Berechnung einer unteren Schranke der Staulänge L_n^0 in Abhängigkeit von q_n ,
 - (d) Berechnung einer Rückstaulängenschätzung mit einem Warteschlangenmodell unter Verwendung des modelleigenen Sättigungszeitbedarfs,
 - (e) Kalibrierung des modelleigenen Sättigungszeitbedarfs durch Vergleich der Rückstaulängenschätzung mit der unteren Schranke L_n^0 ,
 - (f) Berechnung der Rückstaulänge L_n mit einem Warteschlangenmodell unter Verwendung des kalibrierten modelleigenen Sättigungszeitbedarfs.
17. Verfahren nach Anspruch 16, in welchem die Rückstaulängenberechnung mit einer modifizierten Verkehrsstärke erfolgt, bei der Störungen im Abfluß berücksichtigt werden.
18. Verfahren nach Anspruch 17, in welchem die Störungskompensation berechnet wird, indem in einem Zeitintervall während der Abfertigungsphase vorbestimmte Zeitintervalle, insbesondere die vollen Sekunden, gezählt werden, in denen der Detektor dauerbelegt ist.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 16-18, in welchem die Kalibrierung des modelleigenen Sättigungszeitbedarfs mit einem an einen klassischen PID-Regler angelehnten Verfahren vorgenommen wird.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 16-19, in welchem die Rückstaulängenschätzung geglättet wird, indem eine Konvexkombination aus L_n^0 und L_n gemäß $L_n = \gamma L_n^0 + (1 - \gamma) L_n$, $\gamma \in [0, 1]$ gebildet wird.

Claims

1. Method of determining a tailback characteristic factor δ at operating stations for despatching individually moving units having alternating barrier and release phases and having a detector upstream of the respective operating station by measuring the filling time between the barrier start or a time instant tied to the barrier start and continuous occupancy of the detector and subsequent comparison with a reference filling time, in which method a first value is assigned to the tailback characteristic factor δ if the reference filling time is exceeded and a second value is assigned if the reference filling time is not exceeded.
2. Method according to Claim 1, in which the reference filling time is chosen as a function of the geometry of the inflow region of the operating station.
3. Method according to one of the preceding claims, in which the reference filling time is chosen as a function of the release time.
4. Method of determining the tailback length L_n in the nth despatch phase by

- (a) determining the n th tailback characteristic factor δ_n according to Claim 1,
- (b) calculating a smoothed tailback characteristic factor δ_n using the $(n-1)$ th smoothed tailback characteristic factor δ_{n-1} ,
- (c) determining the tailback length $L_n(\delta_n) = m\delta_n$ with suitably predetermined slope m .

5. Method according to Claim 4, wherein the slope m_n is determined in the n th despatch phase by

- (a) determining the traffic level q_n ,
- (b) calculating a lower limit L_n^0 for the tailback length as a function of q_n ,
- (c) determining the slope m_n by comparison of L_n^0 with $L_{n-1}(\delta_n)$ with a suitably predetermined slope m_{n-1} .

6. Method according to Claim 5, in which the slope m_{n-1} is determined by recursive application of the method according to Claim 5 with suitable starting conditions for m_0 and δ_0 .

7. Method according to one of Claims 4-6, in which the smoothed tailback characteristic factor δ_n is calculated as a convex combination of δ_n and δ_{n-1} in accordance with $\delta_n = \alpha\delta_n + (1-\alpha)\delta_{n-1}$, $\alpha \in [0,1]$.

8. Method according to one of Claims 5-7, in which the traffic level q_n is measured with a detector situated upstream of the operating station.

9. Method according to one of Claims 5-8, in which the lower limit L_n^0 of the tailback length is predetermined as a linear function of q_n .

10. Method according to Claim 9, in which the slope $L_n^0(q_n)$ is predetermined as a function of the time, in which the detector is continuously occupied during a portion of the despatch phase.

11. Method according to one of Claims 5-10, in which the slope m_n is altered with respect to m_{n-1} if the second value is assigned to δ_n and $L_n^0 > L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1}\delta_n$ or if the first value is assigned to δ_n and $L_n^0 < L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1}\delta_n$ and otherwise $m_n = m_{n-1}$ is set.

12. Method according to one of Claims 5-11, in which the slope m_n is adapted by means of a smoothed value $L_n' = \beta L_n^0(q_n) + (1-\beta)L_{n-1}(\delta_n)$ where $\beta > 0$.

13. Method of determining the saturation time requirement t_n^B , which corresponds to the average time requirement of a unit with saturated flow during the release phase, by

- (a) determining the tailback characteristic factor according to one of Claims 1-3,
- (b) determining the traffic level q_n ,
- (c) determining the saturation time requirement t_n^B using the release time t_n^g and a suitable starting condition for t_0^B in accordance with

$$t_n^B = \begin{cases} \frac{t_n^g}{q_n}, \\ t_{n-1}^B, \end{cases}$$

if $\delta_n = \delta_{n-1}$ is equal to the second value, otherwise.

14. Method according to Claim 13, in which the saturation time requirement t_n^B is altered in each n th despatch phase by not more than a predetermined maximum value compared with the saturation time requirement of the $(n-1)$ th despatch phase.

15. Method according to Claim 13 or 14, in which the traffic level q_n is measured with the detector upstream of the operating station.

16. Method of determining the tailback length L_n'' by

- (a) determining the saturation time requirement t_n^B according to one of Claims 13-15,
- (b) determining the inherent model saturation time requirement τ_n^B in accordance with $\tau_n^B = \tau_{n-1}^B + c_d(t_n^B - t_{n-1}^B)$ using the $(n-1)$ th model saturation time requirement τ_{n-1}^B and with a suitably chosen c_d ,
- (c) calculating a lower limit of the tailback length L_n^0 as a function of q_n ,
- (d) calculating a tailback length estimation with a queue model using the inherent model saturation time requirement,
- (e) calibrating the inherent model saturation requirement by comparing the tailback length estimation with the lower limit L_n^0 ,
- (f) calculating the tailback length L_n'' with a queuing model using the calibrated inherent model saturation time requirement.

17. Method according to Claim 16, in which the tailback length calculation is made with a modified traffic level that takes account of faults in the outflow.

18. Method according to Claim 17, in which the flow compensation is calculated by counting in a time interval during the despatch phase predetermined time intervals, in particular complete seconds, in which the detector is continuously occupied.

19. Method according to one of Claims 16 to 18, in which the inherent model saturation time requirement is calibrated with a method along the lines of a classic PID controller.

20. Method according to one of Claims 16-19, in which the tailback length estimation is smoothed by forming a convex combination of L_n^0 and L_n'' in accordance with $L_n = \gamma L_n^0 + (1-\gamma)L_n''$, $\gamma \in [0, 1]$.

Revendications

1. Procédé pour déterminer un index d'embouteillage δ à des stations service pour la prise en charge d'unités mobiles séparées, disposant de phases de passage et de blocage alternées, et avec un détecteur placé devant chaque station service, par la mesure de la durée de remplissage entre le début de blocage ou un moment lié au début du blocage et une occupation permanente du détecteur puis une comparaison avec une durée de remplissage de référence, dans lequel il est attribué à l'index d'embouteillage δ lors du dépassement de la durée de remplissage de référence une première valeur et lors du non dépassement de la durée de remplissage de référence une deuxième valeur.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la durée de remplissage de référence est sélectionnée en fonction de la géométrie de la zone d'admission de la station service.

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la durée de remplissage de référence est sélectionnée en fonction de la durée de passage.

4. Procédé pour déterminer la longueur de refoulement L_n dans la n -ième phase de prise en charge par

- (a) détermination du n -ième index d'embouteillage δ_n selon la revendication 1,
- (b) calcul d'un index d'embouteillage lissé $\hat{\delta}_n$ en utilisant le $(n-1)$ -ième de l'index d'embouteillage lissé $\hat{\delta}_{n-1}$
- (c) déterminer la longueur de refoulement $L_n(\delta_n) = m\delta_n$ comprenant une pente donnée appropriée m .

5. Procédé selon la revendication 4, selon lequel la pente m_n dans la n -ième phase de prise en charge est déterminée par

- (a) détermination de l'intensité de remplissage q_n ,
- (b) calcul d'une limite inférieure L_n^0 pour la longueur de l'embouteillage en fonction de q_n ,
- (c) détermination de la pente m_n en comparant L_n^0 avec $L_{n-1}(\delta_n)$ avec une pente donnée appropriée m_{n-1} .

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel la pente m_{n-1} est déterminée par un emploi récurrent du procédé selon la revendication 5 avec des conditions initiales appropriées pour m_0 et δ_0 .

7. Procédé selon l'une des revendications 4-6, dans lequel l'index d'embouteillage lissé $\hat{\delta}_n$ est calculé en tant que combinaison convexe de δ_n et δ_{n-1} selon $\hat{\delta}_n = \alpha \delta_n + (1-\alpha) \delta_{n-1}$, $\alpha \in [0,1]$.

8. Procédé selon l'une des revendications 5-7, dans lequel l'intensité de circulation q_n est mesurée à l'aide des détecteurs se trouvant devant les stations de chargement.

9. Procédé selon l'une des revendications 5-8, dans lequel la limite inférieure L_n^0 de la longueur de l'embouteillage est indiquée en tant que fonction linéaire de q_n .

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel la pente de $L_n^0(q_n)$ est donnée en fonction de la durée pendant laquelle le détecteur, durant une période de la phase de prise en charge, est occupé en permanence.

11. Procédé selon l'une des revendications 5-10, dans lequel la pente m_n par rapport à m_{n-1} est changée, si la deuxième valeur est attribuée à δ_n et $L_n^0 > L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1} \delta_n$ ou bien si la première valeur est attribuée à δ_n et $L_n^0 < L_{n-1}(\delta_n) = m_{n-1} \delta_n$, et sinon $m_n = m_{n-1}$ est appliqué.

12. Procédé selon l'une des revendications 5-11, dans lequel l'ajustement de la pente m_n sur une valeur lissée $L'_n = \beta L_n^0(q_n) + (1-\beta)L_{n-1}(\delta_n)$ avec $\beta > 0$ est effectué.

13. Procédé pour déterminer la durée requise de saturation, t_n^B , qui correspond à la durée requise moyenne d'une unité lors d'un flux saturé pendant la phase de passage, par

- (a) détermination de l'index d'embouteillage selon l'une des revendications 1-3,
- (b) détermination de l'intensité de circulation q_n ,
- (c) détermination de la durée requise de saturation t_n^B en employant une durée de passage t_n^g et une condition de départ appropriée pour t_0^B selon

$$t_n^B = \begin{cases} t_n^g / q_n & \text{si } \delta_n = \delta_{n-1} \text{ égal à la deuxième valeur,} \\ \text{ou } t_{n-1} & \text{sinon} \end{cases}$$

14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel la durée requise de saturation t_n^B à chaque n-ième phase de prise en charge est changée au maximum d'une valeur donnée maximale par rapport à la durée requise de saturation de la (n-1)-ième phase de prise en charge.

15. Procédé selon la revendication 13 ou 14, dans lequel l'intensité de circulation q_n est mesurée par le détecteur placé devant la station de chargement.

16. Procédé pour la détermination de la longueur de refoulement L_n par

- (a) détermination de la durée requise de saturation t_n^B selon l'une des revendications 13-15,
- (b) détermination de la durée requise de saturation propre au modèle τ_n^B selon $\tau_n^B = \tau_{n-1}^B + c_d(t_n^B - t_{n-1}^B)$ en employant le (n-1)-ième modèle de la durée requise de saturation τ_{n-1}^B et un c_d approprié sélectionné,
- (c) calcul d'une limite inférieure de la longueur de l'embouteillage L_n^0 en fonction de q_n ,
- (d) calcul d'une estimation de longueur de refoulement avec un modèle de file d'attente en utilisant une durée requise de saturation propre au modèle,
- (e) calibrage de la durée requise de saturation propre au modèle en comparant l'estimation de la longueur de refoulement avec la limite inférieure L_n^0 ,
- (f) calcul de la longueur de refoulement propre au modèle avec un modèle de file d'attente en utilisant la durée requise de saturation propre au modèle calibré.

17. Procédé selon la revendication 16, dans lequel le calcul de la longueur de refoulement se fait avec une intensité de circulation modifiée, en tenant compte des perturbations lors de l'écoulement.

18. Procédé selon la revendication 17, dans lequel la compensation de perturbation est calculée, en comptant lors d'un intervalle de temps, les intervalles de temps déterminés d'avance lors de la phase de prise en charge, surtout les secondes entières, quand le détecteur est occupé de manière permanente.

5 19. Procédé selon l'une des revendications 16-18, dans lequel le calibrage de la durée requise de saturation propre au modèle est fait selon un procédé se référant à un régulateur PID classique.

10 20. Procédé selon l'une des revendications 16-19, dans lequel l'estimation de la longueur de refoulement est lissée, en formant une combinaison convexe à partir de L_n^o et L_n'' selon $L_n = \gamma L_n^o + (1-\gamma)L_n''$, $\gamma \in [0,1]$.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1:

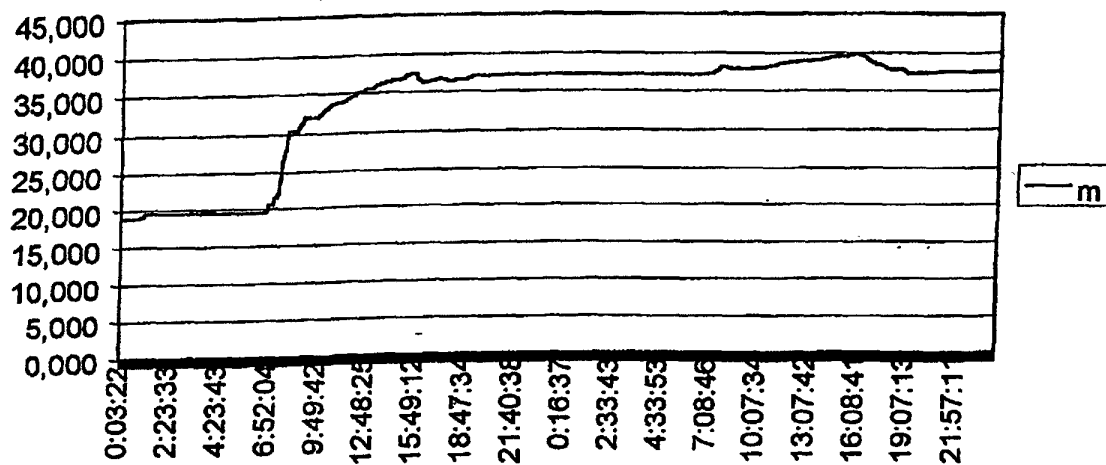


Fig.2:

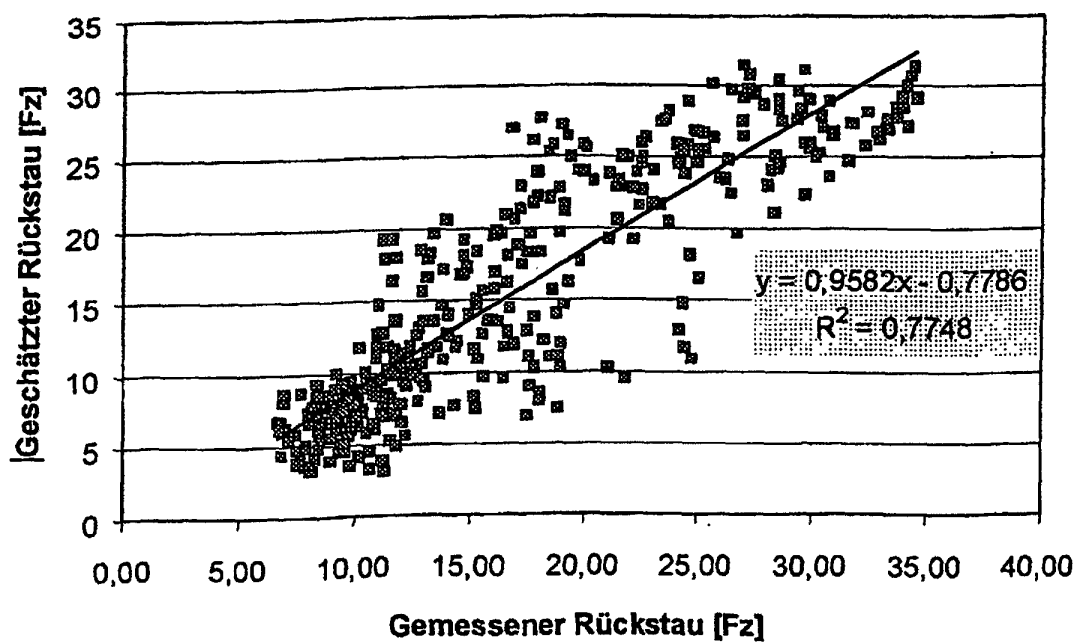


Fig. 3:

