

(12)

## Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50586/2012  
(22) Anmeldetag: 13.12.2012  
(45) Veröffentlicht am: 15.03.2014

(51) Int. Cl. : **G01G 19/02** (2006.01)  
**G01G 19/03** (2006.01)  
**G01G 19/04** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
JP 2010107246 A  
WO 2012026517 A1  
JP 2003166870 A

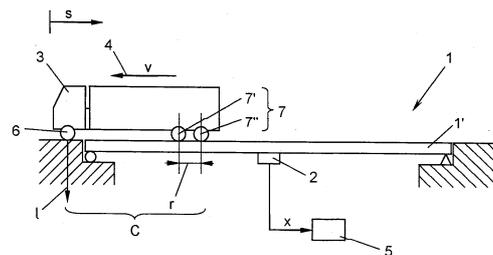
(73) Patentinhaber:  
UNIVERSITÄT WIEN  
1010 WIEN (AT)

### (54) Verfahren zum Vermessen eines fahrenden Fahrzeugs

(57) Verfahren zum Vermessen eines auf einer Fahrbahn (1), insbesondere Brücke (1'), fahrenden Fahrzeugs (3) mithilfe zumindest eines die Belastungsverformung der Fahrbahn (1) messenden Sensors (2), umfassend:

Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufs  $(x(t))$  des Sensormesswerts  $(x)$  während des Vorbeifahrens des Fahrzeugs (3) am Sensor (2);

Wiederholen einer Minimierung, in der ein Maß  $(\epsilon_m)$  für die Abweichung einer parametrisierten Referenzfunktion  $(x_{ref,m}(t))$ , welche eine Summe einer Anzahl  $(N_m)$  rationaler Funktionen  $(f_{m,n}(t))$  umfasst, vom aufgezeichneten Verlauf  $(x(t))$  durch Anpassen ihrer Parameter  $(a_{m,n}, t_{m,n}, \sigma_{m,n})$  minimiert wird, unter Verwendung jeweils einer anderen Anzahl  $(N_m)$  in jeder Wiederholung, u.zw. so oft, bis das Abweichungsmaß  $(\epsilon_m)$  einen Grenzwert  $(S)$  unterschreitet, und dann Auswählen der zu diesem Abweichungsmaß  $(\epsilon_p)$  gehörigen Referenzfunktion  $(x_{ref,m}(t))$  als ausgewählte Referenzfunktion  $(x_{ref,p}(t))$ ; und  
Ermitteln der Anzahl  $(N_p)$  an rationalen Funktionen  $(f_{p,n}(t))$  der ausgewählten Referenzfunktion  $(x_{ref,p}(t))$  als Achsanzahl  $(C)$  des Fahrzeugs (3).



**Fig. 1**

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vermessen eines auf einer Fahrbahn, insbesondere Brücke, fahrenden Fahrzeugs mit Hilfe zumindest eines die Belastungsverformung der Fahrbahn messenden Sensors.

**[0002]** Systeme zum Vermessen von fahrenden Fahrzeugen durch Messen der Belastungsverformung der Fahrbahn sind unter dem Begriff BWIM (bridge weigh in motion) bekannt. Mittels BWIM-Verfahren können Fahrzeuggewichte, Achslasten, Achsabstände, Achsanzahlen usw. der vorbeifahrenden Fahrzeuge ermittelt werden.

**[0003]** Ursprünglich wurden Verformungssensoren in Tragwerken von Brücken verwendet, um Schäden oder Ermüdungserscheinungen an der Brücke frühzeitig erkennen zu können. In Moses, F., Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, ASCE, Transportation Engineering Journal, 1979, Bd. 105, Nr. 3, Seiten 233 -249, wurde vorgeschlagen, mit Hilfe solcher Brückensensoren auch Achslasten und Fahrzeuggewichte zu bestimmen, wozu Fahrzeuggeschwindigkeit und Achsabstände vorab bekannt sein müssen. Gemäß der US 5 111 897 werden zu diesem Zweck Achsabstände und Fahrzeuggeschwindigkeit mit separaten Sensoren, die vor der Brücke installiert werden, bestimmt.

**[0004]** Žnidarič et al., Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE), Report of Work Package 1.2, Bridge WIM Systems, 4th Framework Program Transport, RTD-Project RO-96-SC 403, Dublin, 2001, beschreiben ein BWIM-Fahrzeugvermessungsverfahren mit einem aufwändigen Powell-Optimierungsalgorithmus, wobei eine Differenz aus berechneten und gemessenen Tragwerksreaktionen gebildet wird; dazu sind umfangreiche Vorab-Messungen zur Modellbildung und rechenintensive Optimierungsschritte zur Fahrzeugvermessung erforderlich.

**[0005]** Die Schrift WO 2012/13 9145 A1 offenbart Anordnungen und Datennetzwerkarchitekturen für verteilte Brückensensoren und eine zentrale Auswerteeinrichtung, wobei zur Erfassung der Fahrzeuge und ihrer Achsen und Abmessungen an der Brücke eine Kamera angebracht wird.

**[0006]** Die Erfindung setzt sich zum Ziel, ein Verfahren zum Vermessen eines fahrenden Fahrzeugs zu schaffen, das über BWIM-Sensoren hinaus keine zusätzlichen Sensoren benötigt und dabei ohne großen Vorbereitungs- und Rechenaufwand hohe Genauigkeit bietet.

**[0007]** Dieses Ziel wird erfindungsgemäß mit einem Verfahren der einleitend genannten Art erreicht, das sich auszeichnet durch:

Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufs des Sensormesswerts während des Vorbeifahrens des Fahrzeugs am Sensor;

Wiederholen einer Minimierung, in der ein Maß für die Abweichung einer parametrisierten Referenzfunktion, welche eine Summe einer Anzahl rationaler Funktionen umfasst, vom aufgezeichneten Verlauf durch Anpassen ihrer Parameter minimiert wird, unter Verwendung jeweils einer anderen Anzahl in jeder Wiederholung, u.zw. so oft, bis das Abweichungsmaß einen Grenzwert unterschreitet, und dann Auswählen der zu diesem Abweichungsmaß gehörigen Referenzfunktion als ausgewählte Referenzfunktion; und

Ermitteln der Anzahl an rationalen Funktionen der ausgewählten Referenzfunktion als Achsanzahl des Fahrzeugs.

**[0008]** Mithilfe der genannten rationalen Funktionen kann die Belastungsverformung der Fahrbahn sehr einfach durch Anpassen weniger Parameter nachgebildet werden. Durch Überlagerung zweier oder mehrerer solcher rationaler Funktionen zu einer parametrisierten Referenzfunktion lassen sich beliebige in der Realität vorkommende Verläufe des Sensormesswerts annähern. Indem solange voneinander verschiedene Referenzfunktionen in ihrer Abweichung vom aufgezeichneten zeitlichen Verlauf minimiert werden, bis eine passende Referenzfunktion ausgewählt und zum Ermitteln der Achsen benutzt werden kann, ist das Verfahren besonders robust und liefert auch mit einfachen Optimierungsalgorithmen hervorragende Ergebnisse beim Ermitteln von Achsanzahlen, da nicht jede der Referenzfunktionen den aufgezeichneten zeitli-

chen Verlauf bis ins letzte Detail nachbilden muss.

**[0009]** Bevorzugt werden zwischen den genannten Schritten des Aufzeichnens und Wiederholens Amplitudenpeaks im aufgezeichneten Verlauf gezählt und der Zählwert wird als erste Anzahl rationaler Funktionen verwendet. Dies reduziert die Anzahl an Wiederholungen der Minimierung, da die erste Referenzfunktion bereits von einem realistischen Startwert ausgeht und nur wenige weitere Wiederholungen notwendig sind, um den zeitlichen Verlauf des Sensormesswerts anzunähern.

**[0010]** Zur weiteren Verbesserung der Treffsicherheit des Verfahrens ist es vorteilhaft, wenn das Minimieren so oft wiederholt wird, bis auch zumindest einer der Parameter innerhalb vorgegebener Grenzen liegt. Dadurch werden Fälle vermieden, bei denen aufgrund ungünstiger Überlagerungen im zeitlichen Verlauf des Sensormesswerts eine möglicherweise per se gute Annäherung des Sensormesswertverlaufs zu einer fehlerhaften Schlussfolgerung führen könnten.

**[0011]** Besonders bevorzugt hat jede der Referenzfunktionen die Form

$$x_{ref,m}(t) = \sum_{n=1}^{N_m} f_{m,n}(t) = \sum_{n=1}^{N_m} \frac{a_{m,n}}{1 + \left( \frac{t - t_{m,n}}{\sigma_{m,n}} \right)^2}$$

mit

$N_m$  ..... Anzahl der rationalen Funktionen  $f_{m,n}(t)$  der  $m$ -ten Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$ ; und

$a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$  ..... Parameter der  $n$ -ten rationalen Funktion  $f_{m,n}(t)$  der  $m$ -ten Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$ .

**[0012]** Eine aus rationalen Funktionen dieser Form zusammengesetzte Referenzfunktion erleichtert durch das Variieren lediglich dreier Parameter in jeder rationalen Funktion das Anpassen an den aufgezeichneten zeitlichen Verlauf, wobei die drei Parameter jeweils der Maximalamplitude, Halbwertsbreite und der Zeitlage der rationalen Funktion entsprechen.

**[0013]** Besonders vorteilhaft ist es, wenn die genannten Abweichungsmaße gemäß

$$\mathcal{E}_m = \|x(t) - x_{ref,m}(t, a_{m,n}, t_{m,n}, \sigma_{m,n})\|$$

bestimmt werden, mit

$x(t)$  ..... aufgezeichneter zeitlicher Verlauf des Sensormesswerts; und

$\|\cdot\|$  ..... L1- oder L2-Norm-Operator.

**[0014]** Beide Normen stellen eine mathematisch einfache, standardisierte Methode zur Bestimmung der Abweichungsmaße dar.

**[0015]** Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung erfolgt das genannte Minimieren mittels des Gradientenverfahrens. Dieses Optimierungsverfahren ist mit geringem Rechenaufwand verbunden und liefert robuste Ergebnisse. Gerade wenn lediglich die Achsanzahlen ermittelt werden sollen, ist auch ein frühzeitiges Abbrechen eines iterativen Minimierungsverfahrens möglich, wenn die Änderungen von einem zum folgenden Iterationsschritt einen vorgegebenen Grenzwert unterschreiten, wodurch Rechenaufwand gespart wird.

**[0016]** Bevorzugt wird das Vorbeifahren eines Fahrzeugs detektiert, wenn der zeitliche Verlauf des Sensormesswerts einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet. So kann auch ohne

zusätzliche Sensoren das Vorbeifahren eines Fahrzeugs sicher erkannt und das Verfahren angewendet werden.

**[0017]** Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird die Belastungsverformung der Fahrbahn durch zumindest zwei quer über die Fahrbahn verteilte Sensoren gemessen, wobei der Sensormesswert jenes Sensors verwendet wird, welcher die größte Amplitude liefert. Das Verfahren ist dadurch unempfindlicher in Bezug auf die von einem vorbeifahrenden Fahrzeug gewählte Fahrspur: Der zeitliche Verlauf mit der stärker ausgeprägten Amplitude kann einfacher und präziser durch Referenzfunktionen angenähert werden.

**[0018]** Neben der Achszahl können nach dem erfindungsgemäßen Verfahren weitere Kenngrößen der Fahrzeuge vermessen werden. So wird bevorzugt aus zumindest einem Parameter einer rationalen Funktion der ausgewählten Referenzfunktion eine Achslast des Fahrzeugs bestimmt. Besonders bevorzugt repräsentiert der genannte Parameter die Maximalamplitude dieser rationalen Funktion. So kann nicht nur die Belastung der Fahrbahn bzw. der Brücke bestimmt und eine Überlast erkannt werden, sondern auch das Fahrzeuggewicht und sogar die Verteilung des Ladeguts im Fahrzeug gemessen und wenn gewünscht gemeldet werden.

**[0019]** Ebenso ist es vorteilhaft, wenn die Geschwindigkeit des vorbeifahrenden Fahrzeugs gemessen und aus jeweils zumindest einem Parameter zweier rationaler Funktionen der ausgewählten Referenzfunktion in Verbindung mit der gemessenen Geschwindigkeit ein Achsabstand des Fahrzeugs bestimmt wird, insbesondere wenn der genannte Parameter die Zeitlage der maximalen Amplitude der jeweiligen rationalen Funktion repräsentiert. Dies ermöglicht eine zusätzliche Kontrolle bzw. Vermessung der Fahrzeuge durch das Ermitteln ihrer Achsabstände.

**[0020]** In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung werden die ermittelten Achszahlen, Achsabstände und/oder Achslasten eines Fahrzeugs mit Referenzwerten bekannter Fahrzeugtypen verglichen, und der Fahrzeugtyp mit der größten Übereinstimmung wird ermittelt. Eine solche Erkennung des Fahrzeugtyps ermöglicht statistische Auswertungen sowie die Anwendung des Verfahrens bei Zugangs- bzw. Benutzungsberechtigungsprüfungen, in einigen Fällen sogar zur individuellen Fahrzeugerkennung, wenn sich diese in den genannten ermittelten Kenngrößen der Achsen unterscheiden. Ferner kann so die Fahrtrichtung eines Fahrzeugs bestimmten Typs anhand der Anordnung der ermittelten Achsen detektiert bzw. sein Beladungszustand erkannt werden.

**[0021]** Das erfindungsgemäße Verfahren ist flexibel und in unterschiedlichen Bereichen vorteilhaft einsetzbar. Einerseits kann die Fahrbahn eine Straße, insbesondere Straßenbrücke, und das Fahrzeug ein Lastkraftwagen sein, andererseits kann es auch eingesetzt werden, wenn die Fahrbahn ein Gleis, insbesondere eine Eisenbahnbrücke, und das Fahrzeug ein Zug ist.

**[0022]** Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung für den Einsatz an Gleisen kann beim Einfahren in einen vorgegebenen Gleissektor und beim Ausfahren aus diesem Gleissektor jeweils die Achszahl eines Zuges ermittelt und eine mangelnde Übereinstimmung gemeldet werden. So wird neben einer Achszählung und einer optionalen ergänzenden Belastungserkennung, mit deren Hilfe auch die Ladegutverteilung ermittelt werden kann, auch die Möglichkeit geschaffen, anhand der Differenz aus ein- und ausfahrenden Achsen Frei- bzw. Besetzt-Meldungen für Gleissektoren zu erzeugen. Ein Einbau zusätzlicher Achssensoren und Auswerteeinrichtungen entfällt.

**[0023]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand von in den beigefügten Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. In den Zeichnungen zeigen:

**[0024]** Fig. 1 eine Brücke mit Sensor zum Messen der Belastungsverformung gemäß der Erfindung in einer Seitenansicht;

**[0025]** Fig. 2 ein Flussdiagramm des Verfahrens der Erfindung zum Vermessen eines fahrenden Fahrzeugs mittels der Anordnung von Fig. 1;

- [0026]** Fig. 3 ein Beispiel für einen zeitlichen Verlauf des Messwerts des Sensors von Fig. 1 während des Vorbeifahrens des Fahrzeugs;
- [0027]** die Fig. 4a und 4b Beispiele für Referenzfunktionen zum Annähern an den zeitlichen Verlauf von Fig. 3;
- [0028]** die Fig. 5a und 5b die Bestimmung der Abweichung der Referenzfunktionen von Fig. 4 an den zeitlichen Verlauf von Fig. 3; und
- [0029]** Fig. 6 eine Fahrbahn mit mehreren Sensoren zum Messen der Belastungsverformung gemäß der Erfindung in einer Draufsicht.

**[0030]** Gemäß Fig. 1 ist eine Fahrbahn 1, hier eine Brücke 1', mit einem Sensor 2 versehen. Auf der Fahrbahn 1 fährt ein Fahrzeug 3 mit einer Geschwindigkeit  $v$  in einer Fahrtrichtung 4. Der Sensor 2 misst die Verformung der Fahrbahn 1 durch die Belastung des darüberfahrenden Fahrzeugs 1. Der Ausgang des Sensors 2 mit dem die Belastungsverformung repräsentierenden Sensormesswert  $x$  ist einer Auswerteeinrichtung 5 zugeführt. Der Sensor 2 kann ein auf Zug oder Druck ansprechender Sensor im Unterbau der Fahrbahn 1 bzw. Brücke 1' sein, z.B. ein Dehnungsmessstreifen, er kann aber auch durch Abstandsbestimmung von einem fixen Ort aus, z.B. auf optischem Weg, die Belastungsverformung der Fahrbahn 1 messen. Die Fahrbahn 1 kann anstelle der dargestellten Straßenbrücke 1' auch eine Straße, ein Gleis oder eine Eisenbahnbrücke für einen Zug sein od.dgl.

**[0031]** Das Fahrzeug 3 hat in dem Beispiel von Fig. 1 eine einzelne Vorderachse 6 und im hinteren Bereich eine Mehrachsgruppe 7 aus zwei Hinterachsen 7', 7'', also eine Achszahl  $C = 3$ . Die Vorderachse 6 hat eine beispielhaft eingezeichnete Achslast 1, und die beiden Hinterachsen 7', 7'' einen beispielhaft eingezeichneten Achsabstand  $r$ .

**[0032]** Gemäß Fig. 2 wird in einem ersten Schritt 8 der zeitliche Verlauf  $x(t)$  des Sensormesswerts  $x$  über der Zeit  $t$  während des Vorbeifahrens des Fahrzeugs 3 am Sensor 2 von der Auswerteeinrichtung 5 aufgezeichnet. Das Aufzeichnen 8 kann fortlaufend, z.B. in einem Ringpuffer-Speicher der Auswerteeinrichtung 5, oder nur während des Vorbeifahrens des Fahrzeugs 3 am Sensor 2 erfolgen. Um im letzteren Fall die Aufzeichnung zu steuern, kann z.B. der Sensormesswert  $x$  laufend überwacht werden, wobei das Vorbeifahren eines Fahrzeugs 3 am Überschreiten eines vorgegebenen Schwellwerts erkannt wird. Alternativ kann ein separater Detektor an der Fahrbahn 1 montiert sein, um ein vorbeifahrendes Fahrzeug 3 zu detektieren und das Aufzeichnen auszulösen.

**[0033]** Fig. 3 zeigt einen beispielhaften zeitlichen Verlauf  $x(t)$  des Sensormesswerts  $x$  über der Zeit  $t$ , welche bei bekannter Geschwindigkeit  $v$  gleichzeitig dem Weg bzw. der Position  $s$  entlang des Fahrzeugs 3 proportional ist. Der Verlauf  $x(t)$  (bzw.  $x(s)$ ) spiegelt die Anordnung der Achsen 6, 7', 7'' des Fahrzeugs 3 wider, indem zunächst ein einzelner Amplitudenpeak 9 des Sensormesswerts  $x$  zum Auftrittszeitpunkt  $t_1$  (bzw. Ort  $s_1$ ) der Vorderachse 6 und im weiteren Verlauf zwei zeitlich kurz aufeinanderfolgende Amplitudenpeaks 10', 10'' zu den Zeitpunkten  $t_2, t_3$  (bzw. Orten  $s_2, s_3$ ) der Hinterachse 7', 7'' mit einander teilweise überlappenden Anstiegs- bzw. Abfallflanken aufgezeichnet wurden.

**[0034]** In einem Schritt 11 wird anschließend der aufgezeichnete Verlauf  $x(t)$  durch eine oder mehrere Referenzfunktionen  $x_{ref,1}(t), x_{ref,2}(t), \dots$ , allgemein  $x_{ref,m}(t)$ , angenähert bzw. nachgebildet. Jede der Referenzfunktionen  $x_{ref,m}(t)$  umfasst eine Summe von  $N_m$  Stück rationalen Funktionen  $f_{1,n}(t), f_{2,n}(t), \dots$ , allgemein  $f_{m,n}(t)$ , d.h.:

$$x_{ref,m}(t) = \sum_{n=1}^{N_m} f_{m,n}(t) = \sum_{n=1}^{N_m} \frac{a_{m,n}}{1 + \left( \frac{t - t_{m,n}}{\sigma_{m,n}} \right)^2} \quad (1)$$

**[0035]** In Gleichung (1) bezeichnen  $a_{m,n}, t_{m,n}, \sigma_{m,n}$  Parameter der  $n$ -ten rationalen Funktion  $f_{m,n}(t)$  in der  $m$ -ten Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$ . Jede der rationalen Funktionen  $f_{m,n}(t)$  kann einen der

Amplitudenpeaks 9, 10', 10" des Verlaufs  $x(t)$  modellieren; der Parameter  $a_{m,n}$  bestimmt dabei die Amplitude, der Parameter  $t_{m,n}$  die Zeitlage und der Parameter  $\sigma_{m,n}$  die Halbwertsbreite des von der rationalen Funktion  $f_{m,n}(t)$  modellierten Amplitudenpeaks. Verschiedene Referenzfunktionen  $x_{ref,m}(t)$  haben jeweils unterschiedliche Anzahlen  $N_m$  rationaler Funktionen  $f_{m,n}(t)$ , sodass sie jeweils Zeitverläufe  $x(t)$  mit unterschiedlichen Anzahlen von Amplitudenpeaks modellieren können.

**[0036]** Zwischen den Schritten des Aufzeichnens 8 und Annäherns 11 können in einem - optionalen - Schritt 8' die Amplitudenpeaks 9, 10', 10" gezählt werden und der Zählwert als Startwert für die Anzahl  $N_m$  rationaler Funktionen  $f_{m,n}(t)$ , d.h. als erste Anzahl  $N_1$  der ersten Referenzfunktion  $x_{ref,1}(t)$ , für das folgende Annähern 11 des aufgezeichneten Verlaufs  $x(t)$  verwendet werden.

**[0037]** Fig. 4a zeigt ein Beispiel einer ersten Referenzfunktion  $x_{ref,1}(t)$  mit  $N_1 = 2$  rationalen Funktionen  $f_{1,1}(t)$  und  $f_{1,2}(t)$ . Fig. 4b zeigt ein Beispiel einer zweiten Referenzfunktion  $x_{ref,2}(t)$  mit  $N_2 = 3$  rationalen Funktionen  $f_{2,1}(t)$ ,  $f_{2,2}(t)$  und  $f_{2,3}(t)$ .

**[0038]** Es versteht sich, dass die Referenzfunktionen  $x_{ref,m}(t)$  auch weitere Summanden mit optionalen Parametern haben können, um beispielsweise eine Offset-Anpassung an den Verlauf  $x(t)$  vorzunehmen oder bekannte Effekte, z.B. infolge von Unebenheiten der Fahrbahn 1, im Verlauf  $x(t)$  nachzubilden.

**[0039]** In Schritt 11 wird nun ein Maß  $\varepsilon_m$  für die Abweichung der Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$  vom aufgezeichneten Verlauf  $x(t)$  bestimmt zu

$$\varepsilon_m = \left\| x(t) - x_{ref,m}(t, a_{m,n}, t_{m,n}, \sigma_{m,n}) \right\| \quad (2)$$

**[0040]** In Gleichung (2) bezeichnet  $\|\cdot\|$  einen L1- oder L2-Norm-Operator; es kann jedoch anstelle einer L1- bzw. L2-Norm auch jede andere dem Fachmann/der Fachfrau bekannte Operation zum Bestimmen von Abweichungsmaßen zwischen zwei Funktionen (bzw. zwischen einer Abtastwertfolge und einer Funktion, wenn der Verlauf  $x(t)$  diskretisiert ist) verwendet werden.

**[0041]** Zur Annäherung des zeitlichen Verlaufs  $x(t)$  werden in Schritt 11 die Parameter  $a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$  der rationalen Funktionen  $f_{m,n}(t)$  in der Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$  solange variiert, bis das Abweichungsmaß  $\varepsilon_m$  jeweils minimiert ist; der Schritt 11 kann deshalb in weiterer Folge auch als Minimierungsschritt bzw. Minimierung 11 bezeichnet werden. Zum Minimieren kann jedes in der Mathematik bekannte Optimierungsverfahren, z.B. das iterative Gradientenverfahren, das Downhill-Simplex-Verfahren, das Sekantenverfahren, das Newton-Verfahren, od. dgl. verwendet werden. Ein iterierendes Minimieren kann z.B. vorzeitig abgebrochen werden, wenn die Veränderung des Abweichungsmaßes  $\varepsilon_m$  von einer zur nächsten Iteration einen vorgegebenen Minimalwert unterschreitet.

**[0042]** Da jede rationale Funktion  $f_{m,n}(t)$  gleichsam eine Achse des Fahrzeugs 3 nachbildet, kann zudem das Variieren der Parameter  $a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$  auf realistische Geometrien üblicher Fahrzeugtypen begrenzt werden. So sind beispielsweise die Zeitlagen  $t_{m,n}$  der Amplitudenpeaks 9, 10', 10" nicht völlig beliebig, sondern von der Geschwindigkeit  $v$  und den Achsabständen  $r$  des Fahrzeugs 3 abhängig.

**[0043]** Das Ergebnis des Minimierungsschritts 11 ist eine an den Sensormesswert-Verlauf  $x(t)$  bestmöglich angenäherte Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$  mit ihrem minimalen Abweichungsmaß  $\varepsilon_m$ . Die Fig. 5a und 5b zeigen dies beispielhaft für zwei verschiedene Referenzfunktionen  $x_{ref,1}(t)$  und  $x_{ref,2}(t)$ , u.zw. mit  $N_1 = 2$  rationalen Funktionen in Fig. 5a und  $N_2 = 3$  rationalen Funktionen in Fig. 5b, und deren Abweichungsmaßen  $\varepsilon_1$  bzw.  $\varepsilon_2$  gegenüber dem Verlauf  $x(t)$  von Fig. 3. Als Abweichungsmaß  $\varepsilon_m$  wurde hier eine L2-Norm verwendet, d.h. eine Flächendifferenz, welche schraffiert dargestellt ist. Wie ersichtlich ist das Abweichungsmaß  $\varepsilon_2$  der zweiten Referenzfunktion  $x_{ref,2}(t)$  von Fig. 5b mit drei rationalen Funktionen  $f_{2,1}(t)$ ,  $f_{2,2}(t)$ ,  $f_{2,3}(t)$ , welche den Verlauf von  $x(t)$  mit drei Amplitudenpeaks 9, 10', 10" am besten annähert, kleiner als das Maß  $\varepsilon_1$  von Fig. 5a.

**[0044]** In einer anschließenden Entscheidung 12 wird geprüft, ob das in Schritt 11 minimierte Abweichungsmaß  $\varepsilon_m$  der Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$  einen Grenzwert S unterschreitet. Trifft dies nicht zu, so wird nach der Entscheidung 12 zu einem Schritt 13 verzweigt, in welchem die Anzahl  $N_m$  rationaler Funktionen  $f_{m,n}(t)$  für eine weitere Referenzfunktion  $x_{ref,m+1}(t)$  geändert, z.B. inkrementiert, wird, woraufhin der Minimierungsschritt 11 mit der geänderten Referenzfunktion  $x_{ref,m+1}(t)$  wiederholt wird.

**[0045]** Schritt 11 wird über die Schleife 11 - 12 - 13 so oft wiederholt, bis in der Entscheidung 12 eine Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$  mit einem den Grenzwert S unterschreitenden minimierten Abweichungsmaß  $\varepsilon_m$ , d.h. mit guter Annäherung an den Sensormesswert-Verlauf  $x(t)$ , festgestellt wird. In diesem Fall wird zu einem Schritt 14 verzweigt, in welchem die zu diesem Abweichungsmaß  $\varepsilon_m$  gehörige Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$  als „ausgewählte“ Referenzfunktion  $x_{ref,p}(t)$  weiterverwendet wird. Aus der ausgewählten Referenzfunktion  $x_{ref,p}(t)$  (hier:  $x_{ref,2}(t)$ ) kann die Anzahl  $N_p$  (hier:  $N_2 = 3$ ) an rationalen Funktionen  $f_{p,n}(t)$  nun beispielsweise als Achszahl C des Fahrzeugs 3 herangezogen werden und stellt ein erstes Ergebnis des Fahrzeugvermessungsverfahrens dar.

**[0046]** In der Entscheidung 12 kann - zusätzlich zu der Überprüfung des Abweichungsmaßes  $\varepsilon_m$  - auch geprüft werden, ob zumindest einer der Parameter  $a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$  innerhalb vorgegebener Grenzen liegt, und dies als zusätzliche Bedingung für die Verzweigung zu Schritt 14 herangezogen werden. So kann beispielsweise gewünscht sein, dass der die Halbwertsbreite einer rationalen Funktionen  $f_{m,n}(t)$  bestimmende Parameter  $\sigma_{m,n}$  nicht zu groß ist, da z.B. möglich wäre, dass sich selbst bei guter Annäherung eines breiten Amplitudenpeaks mit nur einer rationalen Funktion  $f_{m,n}(t)$  unter dem Amplitudenpeak mehr als nur eine Fahrzeugachse verbirgt.

**[0047]** Neben der Achszahl C kann mithilfe der ausgewählten Referenzfunktion  $x_{ref,p}(t)$  zu jeder Achse 6, 7', 7" auch die zugehörige Achslast 1 - zumindest näherungsweise - ermittelt werden, indem der Amplitudenparameter  $a_{p,n}$  der jeweiligen rationalen Funktion  $f_{p,n}(t)$  z.B. mit bekannten Belastungsverformungen der Fahrbahn 1 aus einer Tabelle - gegebenenfalls unter zusätzlicher Interpolation bzw. Extrapolation - verglichen wird. Aus den einzelnen Achslasten 1 der Achsen 6, 7', 7" kann ferner das Gesamtgewicht des Fahrzeugs 3 bzw. seine Lastverteilung bestimmt werden.

**[0048]** Des Weiteren kann auch der Achsabstand  $r$  jeweils zweier Achsen 6, 7', 7" mithilfe der Zeitlagenparameter  $t_{p,n}$  der rationalen Funktionen  $f_{p,n}(t)$  der ausgewählten Referenzfunktion  $x_{ref,p}(t)$  ermittelt werden. Dazu wird die Geschwindigkeit  $v$  des vorbeifahrenden Fahrzeugs 3 z.B. nach dem unten in Zusammenhang mit Fig. 6 beschriebenen oder einem anderen, dem Fachmann/der Fachfrau bekannten Verfahren gemessen. Mithilfe der bestimmten Geschwindigkeit  $v$  und der Parameter  $t_{p,n}$  kann dann der Achsabstand  $r$  gemäß  $r = v \cdot [t_{p,n+1} - t_{p,n}]$  ermittelt werden.

**[0049]** Die ermittelten Achszahlen C, Achsabstände  $r$  und/oder Achslasten 1 eines Fahrzeugs 3 können ferner zum Bestimmen des Fahrzeugtyps herangezogen werden, indem sie mit Referenzwerten bekannter Fahrzeugtypen verglichen und dabei der Fahrzeugtyp mit der größten Übereinstimmung ermittelt wird.

**[0050]** Fig. 6 zeigt die Verwendung mehrerer quer über die Fahrbahn 1 verteilter Sensoren 2. Die Amplitudenpeaks 9, 10', 10" im Verlauf  $x(t)$  des Sensormesswerts  $x$  eines Sensors 2 sind umso deutlicher ausgeprägt, je näher die Fahrspur des Fahrzeugs 3 über einen Sensor 2 führt. Bei einer Sensoranordnung nach Fig. 6 wird für das Verfahren nach den Fig. 2 - 5 der Sensormesswert  $x$  jenes Sensors 2 verwendet, dessen zeitlicher Verlauf  $x(t)$  die größten Amplitudenpeaks 9, 10', 10" zeigt. Bei der Ermittlung der Achslast 1 bzw. des Gesamtgewichts des Fahrzeugs 3 können z.B. auch Messwerte  $x$  eines zweiten bzw. weiterer der Sensoren 2 zur Kalibrierung herangezogen werden. Es können auch mehr oder weniger als vier Sensoren 2 für jeden Fahrstreifen 15 der Fahrbahn 1 vorgesehen werden, wobei die Sensoren 2 auch asymmetrisch über jeden Fahrstreifen 15 verteilt sein können.

**[0051]** Fig. 6 zeigt ferner weitere Sensoren 16, die gegenüber den Sensoren 2 in Fahrtrichtung 4, 4' versetzt sind. Anhand eines zeitlichen Versatzes der Verläufe  $x(t)$  der Messwerte  $x$  der

Sensoren 2, 16 kann die Geschwindigkeit  $v$  des Fahrzeugs 3 ermittelt werden.

**[0052]** Wenn die Fahrbahn 1 ein Gleis ist, kann das vorliegende Verfahren ferner zur Frei- bzw. Besetzt-Meldung von Gleissektoren für Züge eingesetzt werden, indem beim Einfahren in einen vorgegebenen Gleissektor und beim Ausfahren daraus jeweils die Achszahl  $C$  eines Zuges ermittelt und der Gleissektor bei mangelnder Übereinstimmung als besetzt und im anderen Fall als frei gemeldet wird. Auch kann so der Verlust einzelner oder mehrerer Waggons eines Zuges erkannt und gemeldet werden.

**[0053]** Die Erfindung ist nicht auf die dargestellten Ausführungsformen beschränkt, sondern umfasst alle Varianten und Modifikationen, die in den Rahmen der angeschlossenen Ansprüche fallen. So kann beispielsweise der zeitliche Verlauf  $x(t)$  des Sensormesswerts  $x$  zunächst mithilfe der gemessenen Geschwindigkeit  $v$  auf das Ortsmaß  $s$  umskaliert wird, um das gesamte Verfahren auf Basis des Ortsmaßes  $s$  anstatt der Zeit  $t$  einzusetzen. Ebenso können Schäden bzw. Ermüdungserscheinungen an Fahrbahnen und insbesondere Brücken in Folge der Gewichtsbelastung ermittelt werden.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Vermessen eines auf einer Fahrbahn (1), insbesondere Brücke (1'), fahrenden Fahrzeugs (3) mithilfe zumindest eines die Belastungsverformung der Fahrbahn (1) messenden Sensors (2), umfassend:

Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufs ( $x(t)$ ) des Sensormesswerts ( $x$ ) während des Vorbeifahrens des Fahrzeugs (3) am Sensor (2);

Wiederholen einer Minimierung, in der ein Maß ( $\epsilon_m$ ) für die Abweichung einer parametrisierten Referenzfunktion ( $x_{ref,m}(t)$ ), welche eine Summe einer Anzahl ( $N_m$ ) rationaler Funktionen ( $f_{m,n}(t)$ ) umfasst, vom aufgezeichneten Verlauf ( $x(t)$ ) durch Anpassen ihrer Parameter ( $a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$ ) minimiert wird, unter Verwendung jeweils einer anderen Anzahl ( $N_m$ ) in jeder Wiederholung, u.zw. so oft, bis das Abweichungsmaß ( $\epsilon_m$ ) einen Grenzwert ( $S$ ) unterschreitet, und dann Auswählen der zu diesem Abweichungsmaß ( $\epsilon_m$ ) gehörigen Referenzfunktion ( $x_{ref,m}(t)$ ) als ausgewählte Referenzfunktion ( $x_{ref,p}(t)$ ); und

Ermitteln der Anzahl ( $N_p$ ) an rationalen Funktionen ( $f_{p,n}(t)$ ) der ausgewählten Referenzfunktion ( $x_{ref,p}(t)$ ) als Achsanzahl ( $C$ ) des Fahrzeugs (3).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen den genannten Schritten des Aufzeichnens und Wiederholens Amplitudenpeaks (9, 10', 10") im aufgezeichneten Verlauf ( $x(t)$ ) gezählt werden und der Zählwert als erste Anzahl ( $N_m$ ) rationaler Funktionen ( $f_{m,n}(t)$ ) verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Minimieren so oft wiederholt wird, bis auch zumindest einer der Parameter ( $a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$ ) innerhalb vorgegebener Grenzen liegt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass jede der Referenzfunktionen ( $x_{ref,m}(t)$ ) die Form

$$x_{ref,m}(t) = \sum_{n=1}^{N_m} f_{m,n}(t) = \sum_{n=1}^{N_m} \frac{a_{m,n}}{1 + \left( \frac{t - t_{m,n}}{\sigma_{m,n}} \right)^2}$$

hat, mit

$N_m$  ..... Anzahl der rationalen Funktionen  $f_{m,n}(t)$  der  $m$ -ten Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$ ; und

$a_{m,n}$ ,  $t_{m,n}$ ,  $\sigma_{m,n}$  ..... Parameter der  $n$ -ten rationalen Funktion  $f_{m,n}(t)$  der  $m$ -ten Referenzfunktion  $x_{ref,m}(t)$ .

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die genannten Abweichungsmaße ( $\epsilon_m$ ) gemäß

$$\epsilon_m = \left\| x(t) - x_{ref,m}(t, a_{m,n}, t_{m,n}, \sigma_{m,n}) \right\|$$

bestimmt werden, mit

$x(t)$  ..... aufgezeichneter zeitlicher Verlauf des Sensormesswerts; und

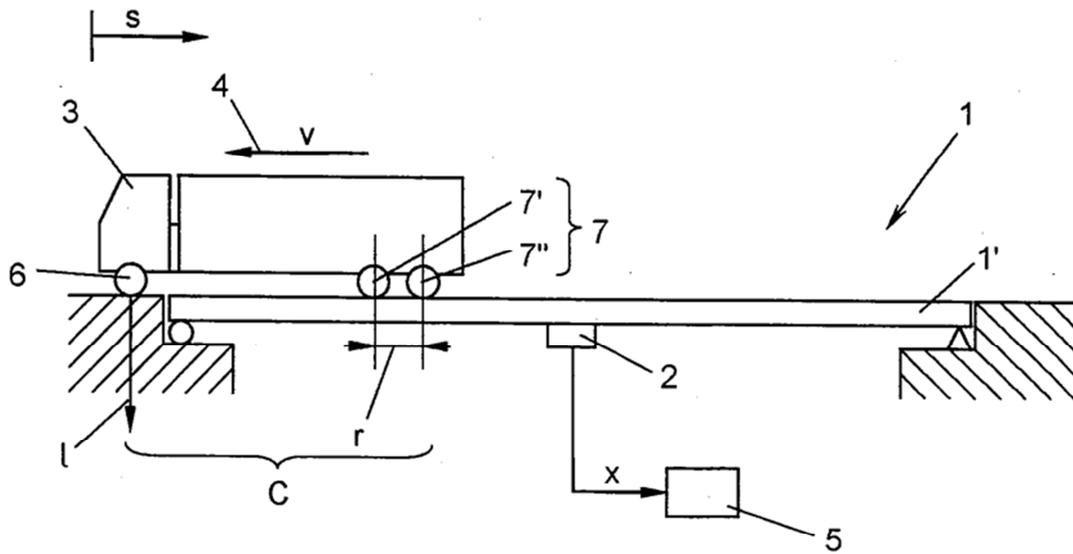
$\| \cdot \|$  ..... L1- oder L2-Norm-Operator.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das genannte Minimieren mittels des Gradientenverfahrens erfolgt.

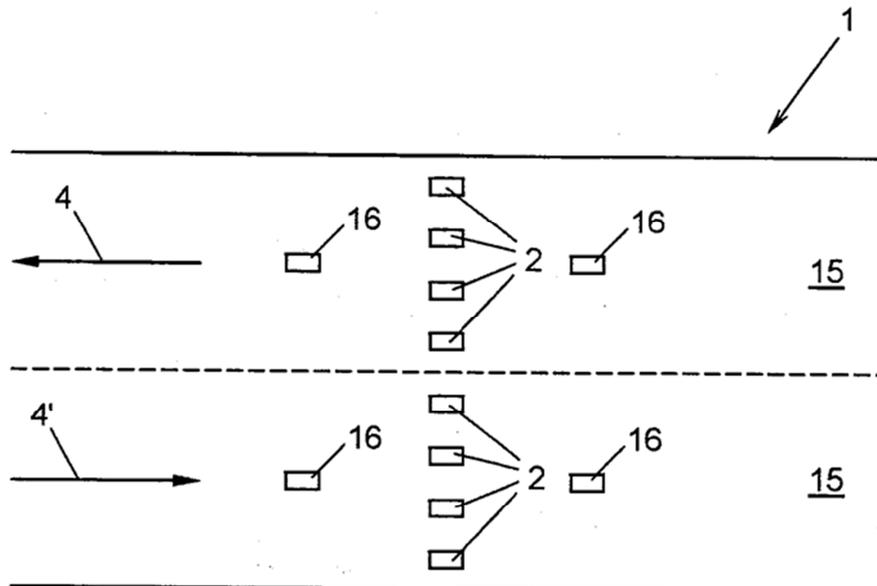
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Vorbeifahren eines Fahrzeugs (3) detektiert wird, wenn der zeitliche Verlauf ( $x(t)$ ) des Sensormesswerts ( $x$ ) einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Belastungsverformung der Fahrbahn (1) durch zumindest zwei quer über die Fahrbahn (1) verteilte Sensoren (2) gemessen wird, wobei der Sensormesswert ( $x$ ) jenes Sensors (2) verwendet wird, welcher die größte Amplitude (9, 10', 10") liefert.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus zumindest einem Parameter ( $a_{p,n}$ ) einer rationalen Funktion ( $f_{p,n}(t)$ ) der ausgewählten Referenzfunktion ( $x_{ref,p}(t)$ ) eine Achslast (1) des Fahrzeugs (3) bestimmt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der genannte Parameter ( $a_{p,n}$ ) die maximale Amplitude dieser rationalen Funktion ( $f_{p,n}(t)$ ) repräsentiert.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Geschwindigkeit ( $v$ ) des vorbeifahrenden Fahrzeugs (3) gemessen und aus jeweils zumindest einem Parameter ( $t_{p,n+1}$ ,  $t_{p,n}$ ) zweier rationaler Funktionen ( $f_{p,n}(t)$ ,  $f_{p,n+1}(t)$ ) der ausgewählten Referenzfunktion ( $x_{ref,p}(t)$ ) in Verbindung mit der gemessenen Geschwindigkeit ( $v$ ) ein Achsabstand ( $r$ ) des Fahrzeugs (3) bestimmt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der genannte Parameter ( $t_{p,n}$ ) die Zeitlage der maximalen Amplitude der jeweiligen rationalen Funktion ( $f_{p,n}(t)$ ) repräsentiert.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ermittelten Achsanzahlen ( $C$ ), Achsabstände ( $r$ ) und/oder Achslasten (1) eines Fahrzeugs (3) mit Referenzwerten bekannter Fahrzeugtypen verglichen und der Fahrzeugtyp mit der größten Übereinstimmung ermittelt wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fahrbahn (1) eine Straße, insbesondere Straßenbrücke (1'), und das Fahrzeug (3) ein Lastkraftwagen ist.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fahrbahn (1) ein Gleis, insbesondere Eisenbahnbrücke (1'), und das Fahrzeug (3) ein Zug ist.
16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Einfahren in einen vorgegebenen Gleissektor und beim Ausfahren aus diesem Gleissektor jeweils die Achszahl ( $C$ ) eines Zuges ermittelt und eine mangelnde Übereinstimmung gemeldet wird.

**Hierzu 3 Blatt Zeichnungen**

1/3

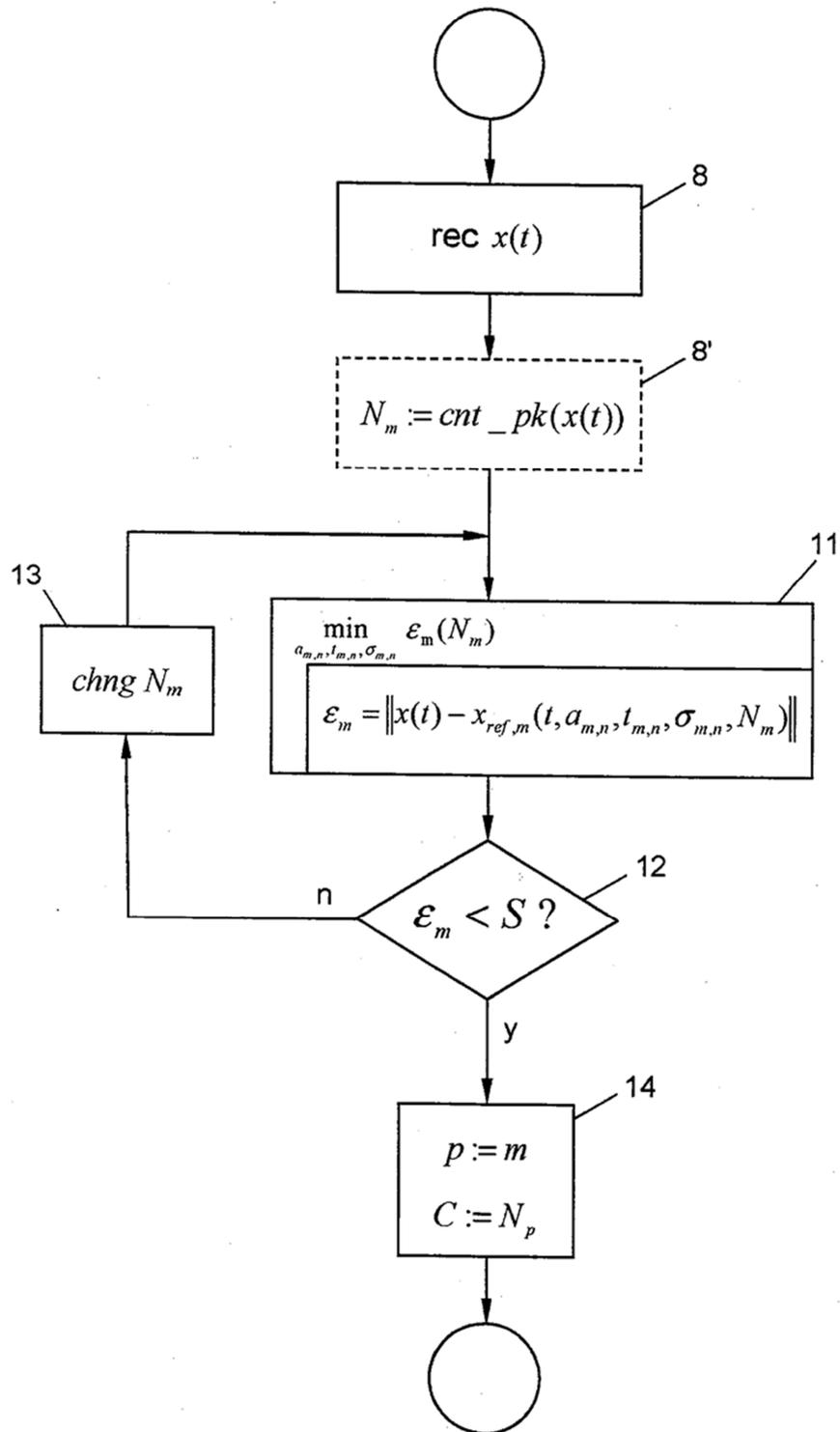


**Fig. 1**



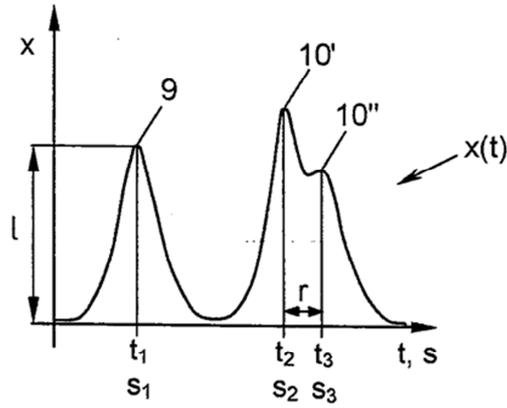
**Fig. 6**

2/3

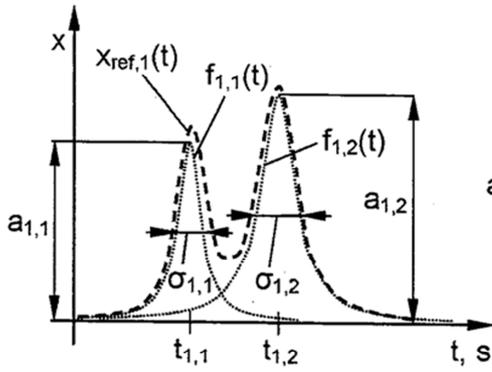


**Fig. 2**

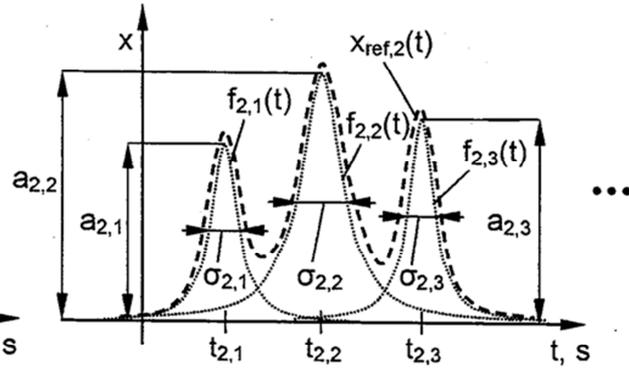
3/3



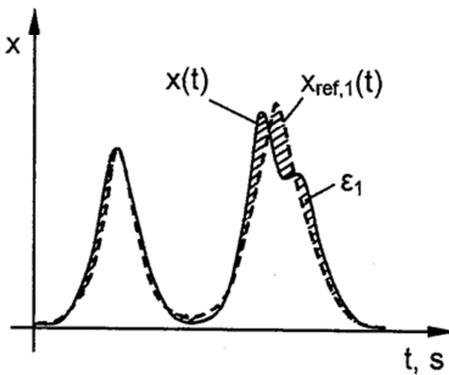
**Fig. 3**



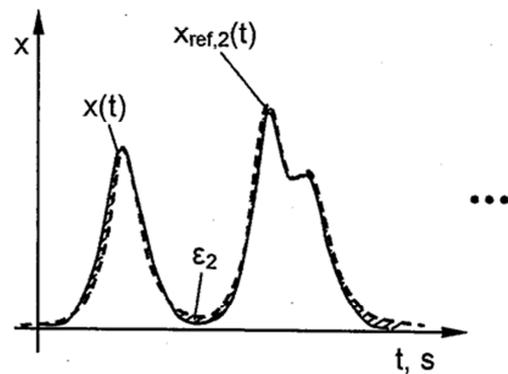
**Fig. 4a**



**Fig. 4b**



**Fig. 5a**



**Fig. 5b**