(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

PCT

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
9. Juli 2009 (09.07.2009)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2009/083425 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01P 3/36 (2006.01) *G01P 3/68* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2008/067443

(22) Internationales Anmeldedatum:
12. Dezember 2008 (12.12.2008)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2007 063 355.8
28. Dezember 2007 (28.12.2007) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **FRABA AG** [DE/DE]; Carlswerkstrasse 13C, 51063 Köln (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **BERGMANN, Arno** [DE/DE]; Haverkampstrasse 46, 45889 Gelsenkirchen (DE).

(74) Anwalt: **COHAUSZ & FLORACK**; Bleichstrasse 14, 40211 Düsseldorf (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR OPTICAL MEASUREMENT OF VELOCITIES ACCORDING TO THE SPATIAL FREQUENCY FILTERING METHOD AND SENSOR FOR OPTICAL MEASUREMENT OF VELOCITIES

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR OPTISCHEN MESSUNG VON GESCHWINDIGKEITEN NACH DEM ORTSFREQUENZFILTERVERFAHREN UND SENSOR ZUR OPTISCHEN MESSUNG VON GESCHWINDIGKEITEN

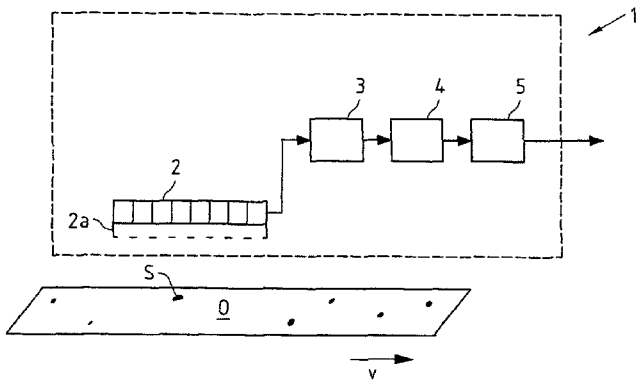


Fig.1

(57) Abstract: The invention relates to a method for measuring a velocity of an object surface (O) relative to a sensor (1) with at least one light-sensitive element (2) according to the spatial frequency filtering method, wherein the light-sensitive element (2) is read at time intervals, and wherein the spatial frequency filter is designed as at least one masking grating having a variable grating constant. The method according to the invention is characterized in that the relative velocity is first measured using a first grating constant k_1 having a large period length and/or over a short observation time period t_1 (rough measurement) and then the measurement of the relative velocity is repeated for a more exact determination using a second grating constant k_2 having a small period length and/or over a long observation time period t_2 (fine measurement). The invention further relates to a sensor for velocity measurement.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2009/083425 A2

TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

— *mit Informationen über die Einbeziehung von fehlenden Teilen und/oder Bestandteilen durch Verweis*

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche (O) und einem Sensor (1) mit wenigstens einem lichtempfindlichen Element (2) nach dem Ortsfrequenzfilterverfahren, wobei das lichtempfindliche Element (2) in zeitlichen Abständen ausgelesen wird und wobei das Ortsfrequenzfilter als wenigstens ein Maskierungsgitter mit variabler Gitterkonstante ausgebildet ist. Das erfindungsgemäße Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass die Relativgeschwindigkeit zunächst mit einer ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und/oder über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1 gemessen wird (Grobmessung) und anschließend die Messung der Relativgeschwindigkeit zwecks exakter Bestimmung mit einer zweiten Gitterkonstante k_2 mit geringer Periodenlänge und/ oder über einen langen Beobachtungs zeitraum t_2 wiederholt wird (Feinmessung). Ferner betrifft die Erfindung einen Sensor zur Geschwindigkeitsmessung.

Verfahren zur optischen Messung von Geschwindigkeiten nach dem Ortsfrequenzfilterverfahren und Sensor zur optischen Messung von Geschwindigkeiten

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und einem Sensor mit wenigstens einem lichtempfindlichen Element nach dem Ortsfrequenzfilterverfahren, wobei das lichtempfindliche Element in zeitlichen Abständen ausgelesen wird und wobei das Ortsfrequenzfilter als wenigstens ein Maskierungsgitter mit variabler Gitterkonstante ausgebildet ist. Ferner betrifft die Erfindung einen Sensor zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und dem Sensor im Ortsfrequenzfilterverfahren.

Für die Messung von Relativgeschwindigkeiten zwischen einem Beobachter bzw. Sensor und der Oberfläche eines Objekts sind Sensoren bekannt, welche nach verschiedenen Verfahren arbeiten. Generell ist bei der Messung der Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Sensor und einer Oberfläche unerheblich, ob sich der Sensor gegenüber dem Objekt bewegt oder das Objekt gegenüber dem Sensor. Schließlich basiert die Geschwindigkeitsmessung dem Grunde nach auf der Bestimmung einer Länge, beispielsweise des zurückgelegten Weges des Objekts im Messbereich des Sensors innerhalb einer bestimmten Zeit. Aus der gemessenen Verschiebung und der benötigten Zeit kann damit die Geschwindigkeit bestimmt werden. Durch einfache Integration über die gemessene Zeit kann auch die zurückgelegte Wegstrecke bzw. die Länge eines Objektes mit einem entsprechenden Sensor

bestimmt werden. Sensoren zur berührungslosen Messung einer Relativgeschwindigkeit sind daher auch zur Längenmessung geeignet.

Zur berührungslosen Messung einer Relativgeschwindigkeit sind mehrere Verfahren bekannt. Eines dieser Verfahren ist das Ortsfrequenzfilterverfahren. Bei diesem wird ein bewegtes Objekt durch ortsfeste, gitterförmige periodische Strukturen zur Geschwindigkeitsmessung beobachtet. Das zeitabhängige Ausgangssignal (Ortsfrequenzfiltersignal) der verwendeten Fotosensoranordnung ist periodisch mit einer dominanten Frequenz, welche proportional zur senkrecht zur Ausrichtung des Gitters orientierten Geschwindigkeitskomponenten des Objektes ist. Wird das Ortsfrequenzfiltersignal beispielsweise durch schnelle Fourier-Transformation weiter verarbeitet, so ist in dem zugehörigen Frequenzspektrum eine der Geschwindigkeit proportionale Maximumfrequenzvorhanden.

Das Gitter kann auf verschiedene Weise erzeugt werden. Im Falle der verbreiteten Zweistrahl-Laser-Doppler-Anemometrie wird das Ortsfrequenzfilter dadurch erzeugt, dass zwei intensitätsgleiche Teilstrahlen eines Laserstrahls unter einem Winkel φ zum Schnitt gebracht werden, wobei sich im Schnittvolumen der beiden Strahlen als Maskierungsgitter fungierende Interferenzstreifen, deren Abstand von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes und dem Kreuzungswinkel φ abhängt, erzeugt. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in dem sehr aufwendigen Aufbau des Messsystems, welches höchste Ansprüche an die Präzision der Optik stellt.

In einer weiteren Variante des Ortsfrequenzfilterverfahrens wird inkoherentes Licht zur Beleuchtung des Objekts verwendet und eine Gitterabtastung vorgenommen. Besonders eignet sich hierbei die Verwendung eines aktiven Maskierungsgitters als Ortsfrequenzfilter, d.h. das Maskierungsgitter wird durch ein eindimensionales Fotosensorenarray nachgebildet. Durch wechselweise Gewichtung der Ausgangssignale der Ausleseschaltungen der Fotosensoren kann hierbei die räumliche Gitterperiodizität erzeugt werden. Der besondere Vorteil dieser Art der Implementierung des Ortsfrequenzfilterverfahrens gegenüber der Laser-Doppler-Anemometrie besteht insbesondere darin, dass das Verfahren mit vergleichsweise geringem apparativem Aufwand realisiert werden kann und dass die Gitterperiodizität des Ortsfrequenzfilters adaptiv ist, d.h. an die mit Strukturmerkmalen unterschiedlicher Größe versehene beobachtete Objektoberfläche angepasst werden kann.

Durch die Überlagerung des bewegten Objektes mit einer Gitterstruktur wird in dem oder den lichtempfindlichen Elementen des Sensors ein periodisches Ausgangssignal erzeugt, welchem, wie bereits erwähnt, beispielsweise durch Fourier-Transformation eine charakteristische Frequenz zugeordnet werden kann, die ihrerseits direkt proportional zur zu messenden Geschwindigkeit ist. Dabei kann die Frequenzauswertung auch durch Zähltechniken oder Anwendung einer Autokorrelationstechnik bestimmt werden; in der Literatur sind weitere Verfahren bekannt. Die höchste messbare Geschwindigkeit ist beim Ortsfrequenzfilterverfahren abhängig von der Abtastrate einerseits - hier kann es sich um die Framerate einer CCD-Kamera oder die Abtastrate eines einer Fotodiode nachgeschalteten A/D-Wandlers handeln - sowie von

der Periodenlänge des Maskierungsgitters, welche durch die Gitterkonstante k bestimmt wird, andererseits. Dabei gilt unter Beachtung des Abtast-Theorems: je höher die Abtastfrequenz und je größer die Gitterkonstante k, desto größer ist die maximal messbare Geschwindigkeit. Dabei gilt jedoch einschränkend, dass mit wachsender Gitterkonstante des Maskierungsgitters auch die Frequenzauflösung der Messung und somit die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung abnimmt. Ferner gilt, dass mit einer Verlängerung des Beobachtungszeitraums t, d.h. also mit einer Vergrößerung der Anzahl der für einen Auswertungszyklus berücksichtigten Abtastwerte, die Frequenzauflösung zwar steigt, die abbildbare Dynamik der Objektbewegung jedoch in gleicher Weise sinkt, da momentane Veränderungen der Objektgeschwindigkeit nicht mehr dargestellt genau werden können.

Ausgehend hiervon liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und einem Sensor nach dem Ortsfrequenzfilterverfahren anzugeben, welches eine fein aufgelöste, präzise Messung eines Geschwindigkeitsverlaufs ohne nennenswerte Verzögerung über einen großen Geschwindigkeitsbereich mit geringem apparativem Aufwand ermöglicht.

Die Aufgabe wird mit einem Verfahren zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und einem Sensor nach dem Oberbegriff des Patentanspruches 1 dadurch gelöst, dass die Relativgeschwindigkeit zunächst mit einer ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und/oder über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1 gemessen wird (Grobmessung) und anschließend die Messung der

Relativgeschwindigkeit zwecks exakter Bestimmung mit einer zweiten Gitterkonstante k_2 mit geringer Periodenlänge und/oder über einen langen Beobachtungszeitraum t_2 wiederholt wird (Feinmessung).

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass bei der präzisen Messung einer Geschwindigkeit sowohl eine Längenänderung Δx auch die damit verbundene Zeitänderung Δt präzise beschrieben werden kann, da sich in der Praxis jede Geschwindigkeitsmessung als Auswertung eines Differenzenquotienten $\Delta x/\Delta t$ darstellen lässt. Durch eine Verfeinerung der räumlichen Auflösung der Messung in Form eines Maskierungsgitters mit reduzierter Periodenlänge kann nach der Lehre der Erfindung zum einen die Längenänderung von der Grobmessung zur Feinmessung stufenweise präziser beobachtet werden. Dabei erlaubt bei dem erfindungsgemäß zweistufig gewählten Verfahren zunächst die Grobmessung mit einer Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge die Beobachtung über einen weiten Geschwindigkeitsbereich, da die mit einem entsprechend "grob eingestellten" Maskierungsgitter einhergehende vergleichsweise niedrige dominierende Frequenz des aus den lichtempfindlichen Elementen ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals praktisch zu keinem Zeitpunkt das Abtasttheorem, nach dem die höchste messbare Frequenz unter der halben Abtastfrequenz liegen muss, verletzt. Nach erfolgter Grobmessung, wird die Messung der Relativgeschwindigkeit durch mit reduzierter Gitterkonstante k_2 des Maskierungsgitters wiederholt. Durch ein feineres Maskierungsgitter bzw. Ortsfrequenzfilter kann der Wegfortschritt Δx des Objekts und damit die interessierende Geschwindigkeit dann präziser bestimmt werden.

Ergänzend oder alternativ zu einer Variation der Gitterkonstante kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren auch der Beobachtungszeitraum im Zuge des Übergangs von der Grobmessung auf die Feinmessung verändert werden. So ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass bei der Grobmessung über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1 gemessen wird, so dass die Dynamik der Objektbewegung besser dargestellt werden kann und Aussagen über die Konstanz oder Nichtkonstanz der Geschwindigkeit gemacht werden können. Im Zuge der Feinmessung wird dann der Beobachtungszeitraum verlängert, so dass eine die Geschwindigkeit als solche präziser bestimmt werden kann, da mit einem verlängerten Beobachtungszeitraum eine größere Anzahl von Stützstellen zur Verfügung steht, was eine höhere Frequenzauflösung ermöglicht.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren kann daher eine konstante Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und einem Sensor mit geringem apparativen Aufwand und sehr hoher Präzision bestimmt werden, andererseits kann einer großen Änderung der Geschwindigkeit rasch gefolgt werden.

Nach einer ersten vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Grobmessung mit der ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und kurzem Beobachtungszeitraum t_1 zunächst wenigstens zweimal durchgeführt wird und dass für den Fall, dass die wenigstens zwei Messergebnisse im wesentlichen übereinstimmen, die Feinmessung mit der zweiten Gitterkonstante k_2 mit geringer Periodenlänge über den langen Beobachtungszeitraum t_2 durchgeführt wird. Hierbei wird somit wiederum zunächst eine Grobmessung der Geschwindigkeit vorgenommen, wobei, wie

erwähnt aufgrund der hohen abbildbaren Dynamik der gemessenen Objektgeschwindigkeit eine präzise Aussage über die vorliegende oder eben nicht vorliegende Konstanz der Geschwindigkeit getroffen werden kann, während der eigentliche Absolutwert der Geschwindigkeit nur grob bestimmbar ist. Nach der Lehre der Erfindung wird diese Grobmessung mit einer ersten großen Gitterkonstante k_1, die ihrerseits die Messungen in einem weiten Geschwindigkeitsbereich ermöglicht, über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1, welcher wiederum eine genaue Abbildung der zeitlichen Dynamik der Objektgeschwindigkeit zulässt, mehrfach, wenigstens zweifach, durchgeführt. Sodann wird betrachtet, ob die ermittelten, der zu bestimmenden Geschwindigkeit proportionalen Frequenzsignale im wesentlichen übereinstimmen, wobei beispielsweise eine 5 - 10%ige Abweichung der jeweiligen Werte voneinander als hinreichende Übereinstimmung gewertet werden kann. Wird eine solche Übereinstimmung festgestellt, so kann davon ausgegangen werden, dass eine konstante Relativgeschwindigkeit zwischen dem Objekt und dem Sensor vorliegt, so dass die Messung in einem Folgeschritt verfeinert werden kann, um den Wert der Relativgeschwindigkeit exakt zu bestimmen. Wie oeben ausgeführt, erfolgt diese verfeinerte Messung sodann mit gegenüber der Gitterkonstante k_1 reduzierten Gitterkonstante k_2 und über einen verlängerten Beobachtungszeitraum t_2, welcher entsprechend eine vergrößerte Anzahl von Abtastwerten bei der Auswertung berücksichtigt. Wie bereits erwähnt, ermöglicht diese größere Anzahl berücksichtigter Abtastwerte im Frequenzraum eine entsprechend höhere Anzahl von Stützstellen und somit eine höhere Frequenzauflösung, so dass der Geschwindigkeitswert schließlich präzise bestimmt werden kann.

Dass der verlängerte Beobachtungszeitraum t_2 die zeitliche Dynamik der Relativgeschwindigkeit nur noch unvollkommen abbilden kann, fällt bei dem erfindungsgemäßen Verfahren deshalb nicht mehr ins Gewicht, da im Rahmen der Grobmessung ja bereits die Konstanz der Geschwindigkeit verifiziert wurde.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist zu beachten, dass im Zuge der Feinmessung der Relativgeschwindigkeit in vielen Fällen das Abtasttheorem verletzt ist, da sich die Frequenz des aus dem oder den lichtempfindlichen Elementen ausgelesenen periodischen Signals infolge der verkleinerten Gitterkonstante k_2 der Nyquist-Frequenz $½f_{abtast}$ annähert. Hierdurch kommt es zum bekannten "Aliasing". Die sich daraus ergebenden Mehrdeutigkeiten im Frequenzspektrum können jedoch durch die Information aus der Grobmessung beseitigt werden, indem bei der Feinmessung derjenige Frequenzwert herausgegriffen wird, der dem bei der Grobmessung bestimmten Geschwindigkeitswert im wesentlichen entspricht.

Das als Ortsfrequenzfilter eingesetzte Maskierungsgitter mit variabler Gitterkonstante kann als eine Mehrzahl von optischen Gittern mit unterschiedlicher, jeweils aber festgelegter Gitterkonstante ausgebildet sein. Nach einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens ist vorgesehen, dass der Sensor eine Mehrzahl zueinander beabstandet angeordneter lichtempfindlicher Elemente umfasst, wobei das Maskierungsgitter, bzw. das Ortsfrequenzfilter, durch eine periodische Gewichtung der Ausgangssignale der lichtempfindlichen Elemente erzeugt wird. Durch diese Maßnahme lässt sich das Maskierungsgitter, d.h. das Ortsfrequenzfilter, problemlos in seiner Gitterkonstante k variieren, so dass durch ein einfaches Ändern der Gewichtungsfunktion die

jeweiligen Vorraussetzungen für die Grobmessung oder Feinmessung geschaffen werden können. Bei den lichtempfindlichen Elementen des Sensors handelt es sich bevorzugt um CCD-, CMOS-Bauelemente, -arrays oder -zeilen, Fotodioden oder Fototransistoren. Im Falle einer CCD-Zeilenkamera mit beispielsweise 1024 linear hintereinander angeordneten Pixeln kann das Maskierungsgitter bei mit großer Gitterkonstante k_1 beispielsweise durch das wechselweise Gewichten von Blöcken aus jeweils 64 benachbarten Pixeln realisiert werden. Ein feines Gitter mit kleiner Gitterkonstante kann beispielsweise durch Blöcke von 8 benachbarten Pixeln, die jeweils alternierend gewichtet werden, realisiert werden.

Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird bei der Grobmessung der Informationsgehalt des im Ortsfrequenzfilterverfahren aus dem wenigstens einen lichtempfindlichen Element ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals oder des Leistungsdichtespektrums mit einer dem Ortsfrequenzfiltersignal zugeordneten Frequenz f_1 kontrolliert. Bevorzugt wird zur Kontrolle des Informationsgehalts des aus dem wenigstens einen lichtempfindlichen Element ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals oder des Leistungsdichtespektrums mit der dem Ortsfrequenzfiltersignal zugeordneten Frequenz f_1 ein Qualitätsmerkmal des Signals um die Frequenz f_1 oder des Ortsfrequenzfiltersignals zur Frequenz f_1 verwendet, insbesondere die Halbwertbreite und/oder der Signal-Rausch-Abstand und/oder das logarithmische Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung und/oder der störungsfreie Dynamikbereich. Ergibt die Kontrolle des Informationsgehaltes des in der Grobmessung gemessenen Ortsfrequenzfiltersignals

zur Frequenz f_1, dass dieser zu gering ist, so kann die Messung verworfen werden.

Der zu geringe Informationsgehalt des ermittelten Frequenzsignals kann darauf zurückzuführen sein, dass die in der Grobmessung gewählte Gitterkonstante k_1 nicht auf die Dimensionen des oder der auf der Objektoberfläche beobachteten Strukturmerkmale angepasst ist. Um daher bei der Grobmessung zu validen Ergebnissen zu gelangen, ist nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung vorgesehen, dass bei der Grobmessung für eine Folgemessung die erste Gitterkonstante k_1 an ein Strukturmerkmal auf der Objektoberfläche angepasst wird.

Analog zu dem vorstehend Gesagten kann auch bei der Feinmessung der Informationsgehalt des aus dem Sensor ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals oder des Leistungsdichtespektrums mit einer dem Ortsfrequenzfiltersignal zugeordneten Frequenz f_2 kontrolliert werden, wobei bevorzugt ein Qualitätsmerkmal des Signals um die Frequenz f_2 oder des Ortsfrequenzfiltersignals zur Frequenz f_2 eingesetzt wird, insbesondere die Halbwertsbreite und/oder der Signal-Rausch-Abstand und/oder das logarithmische Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung und/oder der störungsfrei Dynamikbereich.

Wird im Zuge der Kontrolle des Informationsgehalts festgestellt, dass der Informationsgehalt für eine valide Messung zu niedrig ist, so kann die Messung verworfen werden. Zusätzlich ist es möglich, dass im Falle, dass das Ortsfrequenzfiltersignal oder die dem Ortsfrequenzfiltersignal im Leistungsdichtespektrum zugeordnete ermittelte Frequenz f_2

einen zu geringen Informationsgehalt aufweist, die Frequenz f_2 durch die zuletzt ermittelte gültige Frequenz f_2*, durch einen Mittelwert mehrerer zuletzt ermittelter gültiger Frequenzen, insbesondere ihr arithmetisches Mittel oder ihren Median, oder eine Extrapolation des Verlaufs der zuletzt ermittelten gültigen Frequenzen ersetzt wird. Bei zu geringem Informationsgehalt der Frequenz f_2 ist es schließlich vorteilhaft, für eine Folgemessung die für die Feinmessung eingestellte zweite Gitterkonstante k_2 an ein oder mehrere Strukturmerkmal auf der Objektoberfläche anzupassen.

Nach einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird nach erfolgter Feinmessung eine Plausibilitätsprüfung zwischen der im Zuge der Grobmessung bestimmten Frequenz f_1 und den in der Feinmessung bestimmten Frequenz f_2 durchgeführt. Bei einer validen Messung muss das Ergebnis der Plausibilitätsprüfung sein, dass die bei der Feinmessung bestimmte Frequenz f_2 mit den bei der Grobmessung bestimmten Frequenzen f_1 im Wesentlichen übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, so kann die Messung mangels Plausibilität der Messwerte verworfen werden.

Der Erfindung liegt ferner die Aufgabe zugrunde ein Sensor zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und dem Sensor im Ortsfrequenzfilterverfahren zu schaffen, welcher einfach aufgebaut ist und eine präzise Messung sowohl konstanter als auch sich ändernder Relativgeschwindigkeiten in einem großen Geschwindigkeitsbereich erlaubt.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einem Sensor gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruches 16 dadurch gelöst, dass die

Ansteuerungs- und Auswertemittel derart ausgelegt sind, dass die Relativgeschwindigkeit zunächst mit einer ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und/oder über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1 grob gemessen wird und anschließend die Messung der Relativgeschwindigkeit zwecks exakter Bestimmung mit einer zweiten kleinen Gitterkonstante k_2 und/oder über einen langen Beobachtungszeitraum t_2 wiederholt wird.

Der Sensor ist besonders einfach aufgebaut, da er aus wenigen Komponenten, welche kommerziell in vielfacher Ausführung verfügbar sind, besteht. Im Übrigen gilt für die Vorteile des erfindungsgemäßen Sensors das vorstehend Gesagte.

Die eingangs genannte Aufgabe wird ferner mit einem in einer Datenverarbeitungsanlage lesbaren Speichermedium mit einem darauf gespeicherten Computerprogramm gelöst, wobei das Computerprogramm Befehle enthält, die wenigstens einen Prozessor veranlassen, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 - 15 auszuführen.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand einer ein Ausführungsbeispiel darstellenden Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Fig.1 einen erfindungsgemäßen Sensor zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und dem Sensor

Fig. 2a ein Ablaufschema zur Darstellung eines Verfahrens zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche und einem Sensor und

Fig. 2b die Fortsetzung des Ablaufschemas aus Fig. 2a.

In Fig. 1 ist in stark schematisierter Ansicht ein erfindungsgemäßer Sensor 1 zur Messung einer Relativgeschwindigkeit im Ortsfrequenzfilterverfahren zwischen einer Objektoberfläche O und dem Sensor 1 dargestellt. Der Sensor 1 umfasst eine Mehrzahl zueinander beabstandet angeordneter lichtempfindlicher Elemente 2, beispielsweise in Form einer CCD-Kamerazeile, eine Optik 2a, welche die Objektoberfläche O auf die lichtempfindlichen Elemente 2 abbildet, sowie Ansteuerungsmittel 3, welche die lichtempfindlichen Elemente 2 des Sensors 1 mit einer Abtastfrequenz f_{abtast} auslesen. Zur Erzeugung eines Maskierungsgitters werden die Ausgangssignale der lichtempfindlichen Elemente alternierend positiv und negativ gewichtet, wobei bei Einstellung der Gitterkonstante k die lichtempfindlichen Elemente 2 hierbei zu Blöcken variabler Länge zusammengefasst werden können. Die Ansteuerungsmittel 3 geben die aus den lichtempfindlichen Elementen 2 ausgelesenen Helligkeitswerte an Auswertemittel 4 weiter, die ihrerseits ein zur zu messenden Relativgeschwindigkeit proportionales Signal erzeugen. Dieses wird als Geschwindigkeitswert an eine Ausgabeeinheit 5 geleitet, wo es dann an den Nutzer ausgegeben werden kann.

In den Ansteuerungsmitteln 3 und Auswertemitteln 4 werden die Signale der lichtempfindlichen Elemente 2 - beispielsweise in einem Signalprozessor - in der folgenden Weise ausgewertet:

In den Fig. 2a und 2b ist das erfindungsgemäße Verfahren zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen der

Objektoberfläche O und dem Sensor 1 nach dem Ortsfrequenzfilterverfahren in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt.

Erfindungsgemäß erfolgt die Messung der Relativgeschwindigkeit zunächst wenigstens zweimal mit einer ersten großen Gitterkonstante k_1 über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1. Dieser als "Grobmessung" bezeichnete Vorgang ist in Fig. 2a dargestellt. Ferner ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass für den Fall, dass die wenigstens zwei Messergebnisse im Wesentlichen übereinstimmen, die Messung der Relativgeschwindigkeit zwecks exakter Bestimmung mit einer zweiten kleinen Gitterkonstante k_2 über einen langen Beobachtungszeitraum t_2 wiederholt wird. Dies wird als "Feinmessung" bezeichnet und ist hinsichtlich seines genauen Ablaufs in Fig. 2b dargestellt.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird nun anhand der Fig. 2a und 2b im Detail beschrieben. Ein Objekt mit einer Oberfläche O, beispielsweise eine Materialbahn, wird mit einer Geschwindigkeit v unter dem Sensor 1 hinwegbewegt. Im Rahmen der Grobmessung werden nun die lichtempfindlichen Elemente n-fach ausgelesen, wobei durch die Ansteuerungsmittel 3 durch entsprechende Gewichtung der Ausgangssignale der einzelnen lichtempfindlichen Elemente 2 eine große Gitterkonstante k_1 eingestellt ist. Handelt es sich bei den lichtempfindlichen Elementen beispielsweise um eine CCD-Zeilenkamera mit 1024 Pixeln, so kann das Maskierungsgitter dadurch erzeugt werden, dass jeweils Blöcke von benachbart angeordneten Pixeln zusammengefasst werden und alternierend positiv und negativ gewichtet werden. Im Falle der groben Gitterkonstante k_1 umfassen die Blöcke beispielsweise 64 benachbarte Pixel. Neben

der groß gewählten Gitterkonstante k_1 erfolgt jeder der n-Auslesevorgänge über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1, beispielsweise 1 Millisekunde. Ein kurzer Beobachtungszeitraum t_1 hat den Vorteil, dass eine genaue Abbildung der zeitlichen Dynamik der Objektgeschwindigkeit möglich ist, so dass genaue Aussagen getroffen werden können, ob sich das Objekt mit konstanter oder nicht konstanter Geschwindigkeit bewegt.

Durch die alternierende, blockweise Gewichtung der Pixelsignale wird n-mal ein zeitlich periodisches Signal in den Ansteuerungsmitteln 3 erzeugt, welches dann an die Auswertemittel 4 weitergegeben wird. In diesem werden die n zeitabhängigen Ortsfrequenzfiltersignale mittels schneller Fuorier-Transformationen FFT oder einem alternativen Verfahren, beispielsweise einer Autokorrelationsanalyse, ihren dominanten n Frequenzen f_1^1 - f_1^n zugeordnet. Der Informationsgehalt dieser Frequenzwerte f_1^1 - f_1^n wird in den Auswertemitteln nun anhand eines, bevorzugt mehrerer, Qualitätsmerkmale der einzelnen Ortsfrequenzfiltersignale zu f_1^1 - f_1^n überprüft. Als Qualitätsmerkmale eignen sich hierzu die Halbwertsbreite $FWHM_1$ und/oder der Signal-Rausch-Abstand SNR_1 und/oder das logarithmische Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung $SINAD_1$ und/oder der störungsfreie Dynamikbereich $SFDR_1$. Ergibt sich anhand der vorstehend genannten Qualitätskriterien, dass der Informationsgehalt eines oder mehrerer Ortsfrequenzfiltersignale zu f_1^1 - f_1^n zu gering ist, so wird das n-fache Auslesen der lichtempfindlichen Elemente vorzugsweise mit einer an die auf der Objektoberfläche O vorhandenen Strukturmerkmale S besser angepassten ersten Gitterkonstante k_1 wiederholt. Sind die Strukturmerkmale beispielsweise derart klein, dass sie durch das über die Gewichtungsfunktion der Ausgangssignale der

lichtempfindlichen Elemente 2 erzeugte Maskierungsgitter nicht aufgelöst werden können, so muss die Gitterkonstante k_1 verkleinert werden. Der Beobachtungszeitraum t_1 bleibt hierbei hingegen bevorzugt unverändert.

Ergibt ein erneutes n-faches Auslesen der lichtempfindlichen Elemente 2 und die anschließende Ermittlung der zugehörigen dominanten Frequenzen f_1^1 - f_1^n der Ortsfrequenzfiltersignale, dass der Informationsgehalt der Ortsfrequenzfiltersignale zu f_1^1 - f_1^n ausreichend ist, so wird im Folgeschritt untersucht, ob die ermittelten Frequenzsignale bzw. die hierzu streng proportionalen Geschwindigkeitswerte im Wesentlichen übereinstimmen. Eine Abweichung von 5 - 10% kann hierbei als hinreichende Übereinstimmung gewertet werden. Besteht eine solche Übereinstimmung nicht, so muss, da das Objekt sich zum Zeitpunkt der Messung offensichtlich nicht mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, die Messung zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden; die durchgeführte Messung muß verworfen werden.

Wird eine hinreichende Übereinstimmung festgestellt, so wird die Geschwindigkeitsmessung im Folgenden verfeinert, wie in Fig. 2b dargestellt.

Die Feinmessung erfolgt nun mit gegenüber der Gitterkonstante k_1 verkleinerter Gitterkonstante k_2 (z.B. Blöcke aus jeweils 8 Pixeln) und über einen verlängerten Beobachtungszeitraum t_2, welcher entsprechend eine vergrößerte Anzahl von Abtastwerten bei der Auswertung berücksichtigt. Der verlängerte Beobachtungszeitraum beträgt beispielsweise beispielsweise 4 Millisekunden. Diese größere Anzahl berücksichtigter Abtastwerte ermöglicht im Fourier-transformierten Signal eine

entsprechend höhere Anzahl von Stützstellen und somit eine höhere Frequenzauflösung, so dass das Frequenzsignal f_2 und damit der zu ermittelnde Geschwindigkeitswert schließlich präzise bestimmbar ist.

Der Informationsgehalt des im Rahmen der Feinmessung ermittelten Ortsfrequenzfiltersignals oder des durch FFT erzeugten Leistungsdichtespektrums zu f_2 wird wiederum bevorzugt anhand von Qualitätskriterien, wie beispielsweise der Halbwertsbreite $FWHM_2$ und/oder dem Signal-Rausch-Abstand SNR_2 und/oder dem logarithmischen Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung $SINAD_2$ und/oder dem störungsfreien Dynamikbereich $SFRD_2$ des Frequenzsignals f_2 ermittelt. Erweist sich der Informationsgehalt des Ortsfrequenzfiltersignals zu f_2 nicht als ausreichend, so muss wiederum unter Anpassung der Gitterkonstante k_2 auf die Strukturmerkmale S des Objekts O ein erneutes Auslesen der lichtempfindlichen Elemente erfolgen, wobei weiterhin die Gitterkonstante k_2 kleiner zu wählen ist als die Gitterkonstante k_1.

Ist der Informationsgehalt des Ortsfrequenzfiltersignals zu f_2 - ggf. nach wiederholter Messung - ausreichend, so erfolgt vorliegend eine Plausibilitätskontrolle, im Rahmen derer untersucht wird, ob die präzise bestimmte Frequenz f_2 im Wesentlichen mit den grob bestimmten Frequenzen f_1^1 - f_1^n übereinstimmt. Ist dies der Fall, so kann die Frequenz f_2 als dazu proportionaler Geschwindigkeitswert an die Ausgabeeinheit 5 ausgegeben werden. Ist das Frequenzsignal f_2 dagegen nicht plausibel, stimmt es folglich nicht mit denen zuvor grob ermittelten Frequenzen f_1^1 - f_1^n überein, so kann entweder die Messung verworfen werden oder aber die Frequenz f_2 wird durch die zuletzt ermittelte gültige Frequenz f_2* überblendet.

Alternativ kann auch der Mittelwert mehrerer zuletzt ermittelter gültiger Frequenzen, insbesondere das arithmetische Mittel oder der Median oder auch eine Extrapolation des Verlaufs der zuletzt ermittelten gültigen Frequenzen herangezogen werden. Dieser Wert kann dann anstelle der nicht plausiblen Frequenz f_2 an die Ausgabeeinheit 5 ausgegeben werden.

LO/hs 071389WO
12. Dezember 2008

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche (O) und einem Sensor (1) mit wenigstens einem lichtempfindlichen Element (2) nach dem Ortsfrequenzfilterverfahren, wobei das lichtempfindliche Element (2) in zeitlichen Abständen ausgelesen wird und wobei das Ortsfrequenzfilter als wenigstens ein Maskierungsgitter mit variabler Gitterkonstante ausgebildet ist,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
die Relativgeschwindigkeit zunächst mit einer ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und/oder über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1 gemessen wird (Grobmessung) und anschließend die Messung der Relativgeschwindigkeit zwecks exakter Bestimmung mit einer zweiten Gitterkonstante k_2 mit geringer Periodenlänge und/oder über einen langen Beobachtungszeitraum t_2 wiederholt wird (Feinmessung).

2. Verfahren nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
die Grobmessung mit der ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und kurzem Beobachtungszeitraum t_1 zunächst wenigstens zweimal durchgeführt wird und dass für den Fall, dass die wenigstens zwei Messergebnisse im wesentlichen übereinstimmen, die Feinmessung mit der zweiten Gitterkonstante k_2 mit geringer Periodenlänge über den langen Beobachtungszeitraum t_2 durchgeführt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
der Sensor (1) eine Mehrzahl zueinander beabstandet angeordneter lichtempfindlicher Elemente (2) umfasst,
wobei das Maskierungsgitter durch eine periodische Gewichtung der Ausgangssignale der lichtempfindlichen Elemente (2) erzeugt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
bei der Grobmessung der Informationsgehalt des aus dem wenigstens einen lichtempfindlichen Element (2) ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals oder des Leistungsdichtespektrums mit einer dem Ortsfrequenzfiltersignal zugeordneten Frequenz f_1 kontrolliert wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
zur Kontrolle des Informationsgehaltes des aus dem wenigstens einen lichtempfindlichen Element (2) ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals oder des Leistungsdichtespektrums mit der dem Ortsfrequenzfiltersignal zugeordneten Frequenz f_1 ein Qualitätsmerkmal des Signals um die Frequenz f_1 oder des Ortsfrequenzfiltersignals zur Frequenz f_1 verwendet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
das Qualitätsmerkmal die Halbwertsbreite ($FWHM_1$) und/oder der Signal-Rausch-Abstand (SNR_1) und/oder das logarithmische Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung ($SINAD_1$) und/oder der störungsfreie Dynamikbereich ($SFDR_1$) ist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
bei zu geringem Informationsgehalt des Ortsfrequenzfiltersignals zur Frequenz f_1 die Messung verworfen wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
bei der Grobmessung für eine Folgemessung die erste Gitterkonstante k_1 an wenigstens ein Strukturmerkmal (S) auf der Objektoberfläche (O) angepasst wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s
bei der Feinmessung der Informationsgehalt des aus dem Sensor (1) ausgelesenen Ortsfrequenzfiltersignals oder des Leistungsdichtespektrums mit einer dem Ortsfrequenzfiltersignal zugeordneten Frequenz f_2 kontrolliert wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
zur Kontrolle des Informationsgehaltes ein Qualitätsmerkmal des Signals um die Frequenz f_2 oder des Ortsfrequenzfiltersignals zur Frequenz f_2 verwendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Qualitätsmerkmal die Halbwertsbreite ($FWHM_2$) und/oder der Signal-Rausch-Abstand (SNR_2) und/oder das logarithmische Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung ($SINAD_2$) und/oder der störungsfreie Dynamikbereich ($SFDR_2$) ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11,
dadurch gekennzeichnet, dass
bei zu geringem Informationsgehalt die Messung verworfen wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 12,
dadurch gekennzeichnet, dass
im Falle, dass das Ortsfrequenzfiltersignal oder die dem Ortsfrequenzfiltersignal im Leistungsdichtespektrum zugeordnete Frequenz f_2 einen zu geringen Informationsgehalt aufweist, die Frequenz f_2 durch die zuletzt gültige Frequenz f_2^*, durch einen Mittelwert mehrerer zuletzt ermittelter gültiger Frequenzen, insbesondere ihr arithmetisches Mittel oder ihren Median, oder eine Extrapolation des Verlaufs der zuletzt ermittelten gültigen Frequenzen ersetzt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass für eine Folgemessung die zweite Gitterkonstante k_2 an ein Strukturmerkmal (S) auf der Objektoberfläche (O) angepasst wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass nach erfolgter Feinmessung eine Plausibilitätsprüfung zwischen der in der Grobmessung bestimmten Frequenz f_1 und der in der Feinmessung bestimmten Frequenz f_2 durchgeführt wird, wobei bei mangelnder Plausibilität die Messung verworfen wird.

16. Sensor zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche (O) und dem Sensor (1) im Ortsfrequenzfilterverfahren, wobei der Sensor (1) wenigstens ein lichtempfindliches Element (2) und wenigstens ein Maskierungsgitter mit variabler Gitterkonstante als Ortsfrequenzfilter umfasst, wobei der Sensor (1) ferner Ansteuerungs- und Auswertemitteln (3, 4) umfasst, wobei die Ansteuerungsmittel (3) das wenigstens eine lichtempfindliche Element (2) des Sensors (1) in zeitlichen Abständen auslesen und die Auswertemittel (4) jeweils ein zur zu messenden Geschwindigkeit proportionales Signal erzeugen, dadurch gekennzeichnet, dass die Ansteuerungs- und Auswertemittel (3, 4) derart ausgelegt sind, dass die Relativgeschwindigkeit zunächst mit einer ersten Gitterkonstante k_1 mit großer Periodenlänge und/oder über einen kurzen Beobachtungszeitraum t_1 grob gemessen wird und

anschließend die Messung der Relativgeschwindigkeit zwecks exakter Bestimmung mit einer zweiten Gitterkonstante k_2 mit kleiner Priodenlänge und/oder über einen langen Beobachtungszeitraum t_2 wiederholt wird.

17. Sensor (1) nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass der Sensor (1) eine Mehrzahl zueinander beabstandet angeordneter lichtempfindlicher Elemente (2) aufweist, wobei das Maskierungsgitter durch eine periodische Gewichtung der lichtempfindlichen Elemente (2) oder durch wenigstens ein festes Maskierungsgitter erzeugbar ist.

18. Sensor (1) nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die lichtempfindlichen Elemente (2) des Sensors (1) CCD-, CMOS-Bauelemente, -Arrays oder -Zeilen, Photodioden oder Phototransistoren sind.

19. Sensor (1) zur Messung einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer Objektoberfläche (O) und dem Sensor, dadurch gekennzeichnet, dass in den Sensor mehrere Sensoren (1) nach einem der Ansprüche 16 bis 18 integriert sind.

20. Ein mittels einer Datenverarbeitungsanlage lesbares Speichermedium mit einem darauf gespeicherten Computerprogramm, wobei das Computerprogramm Befehle enthält, die wenigstens einen Prozessor veranlassen, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15 auszuführen.

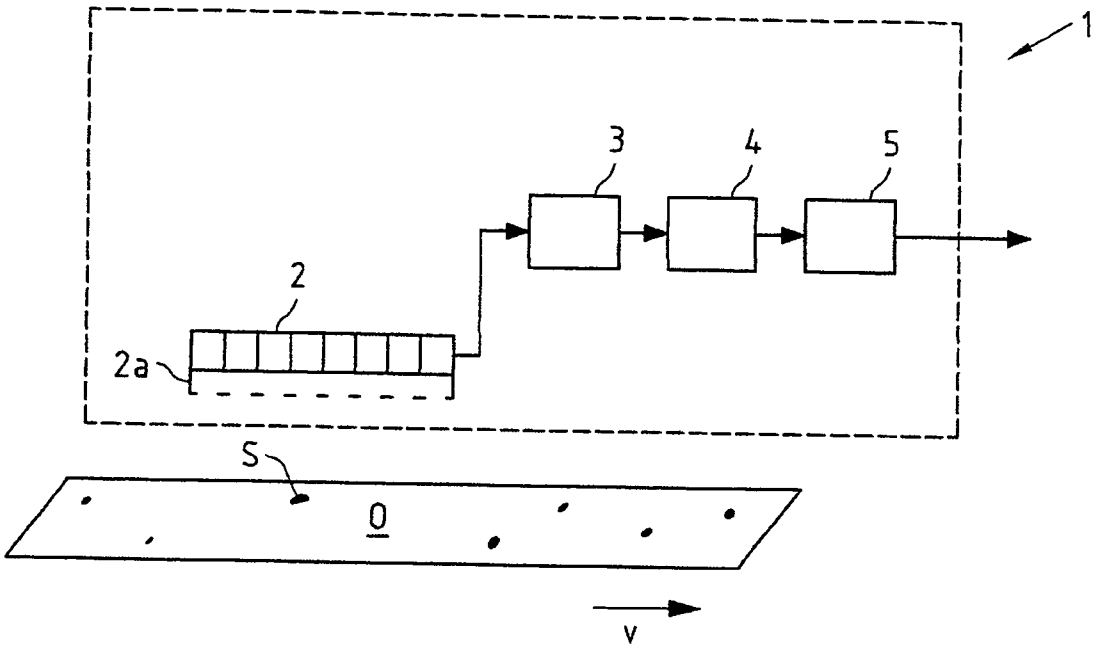


Fig.1

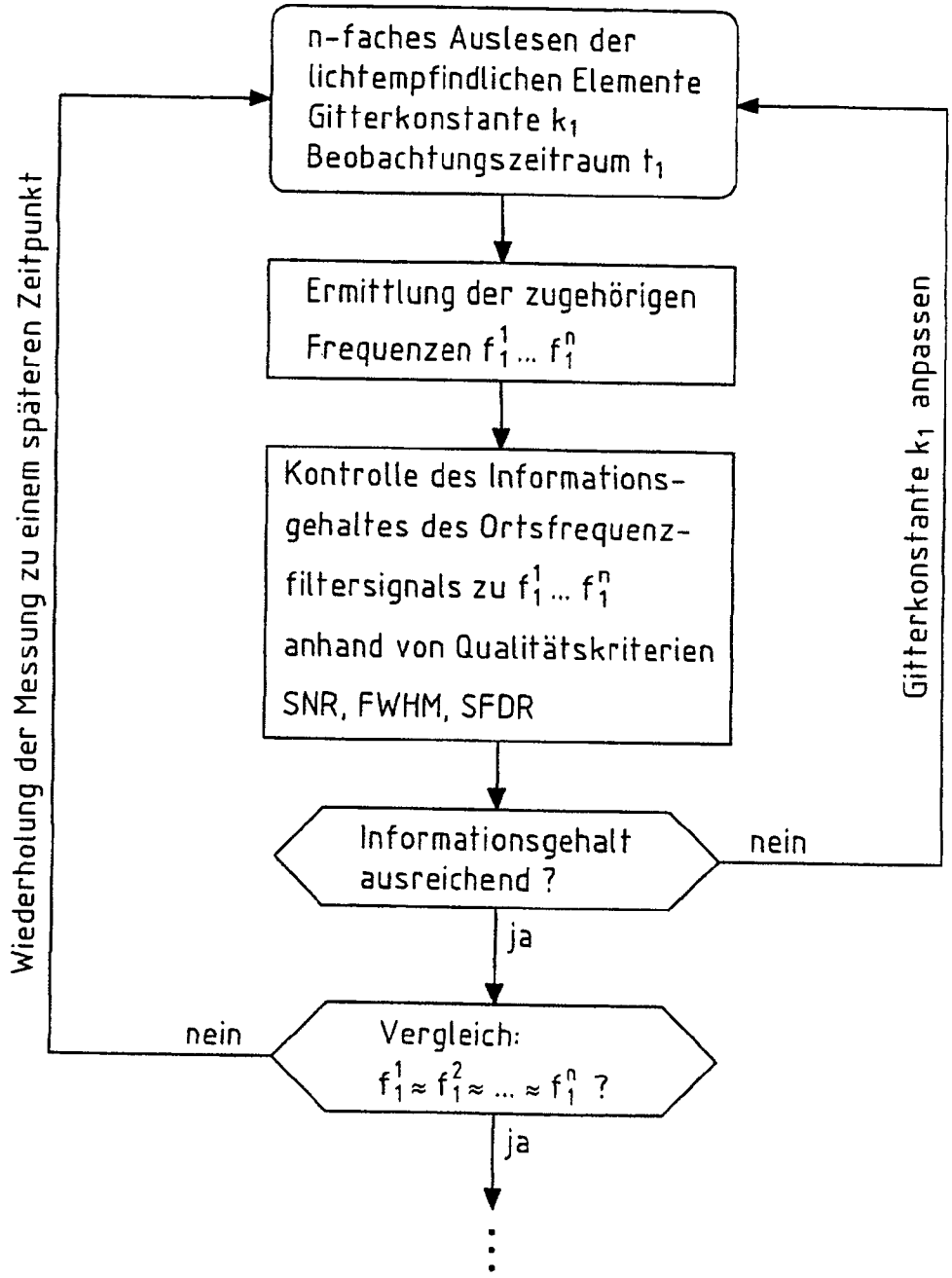

n-faches Auslesen der lichtempfindlichen Elemente Gitterkonstante k_1 Beobachtungszeitraum t_1
Ermittlung der zugehörigen Frequenzen $f_1^1 \ldots f_1^n$
Kontrolle des Informationsgehaltes des Ortsfrequenzfiltersignals zu $f_1^1 \ldots f_1^n$ anhand von Qualitätskriterien SNR, FWHM, SFDR
Informationsgehalt ausreichend ?
nein
Gitterkonstante k_1 anpassen
ja
Vergleich: $f_1^1 \approx f_1^2 \approx \ldots \approx f_1^n$?
nein
Wiederholung der Messung zu einem späteren Zeitpunkt
ja

Fig.2a

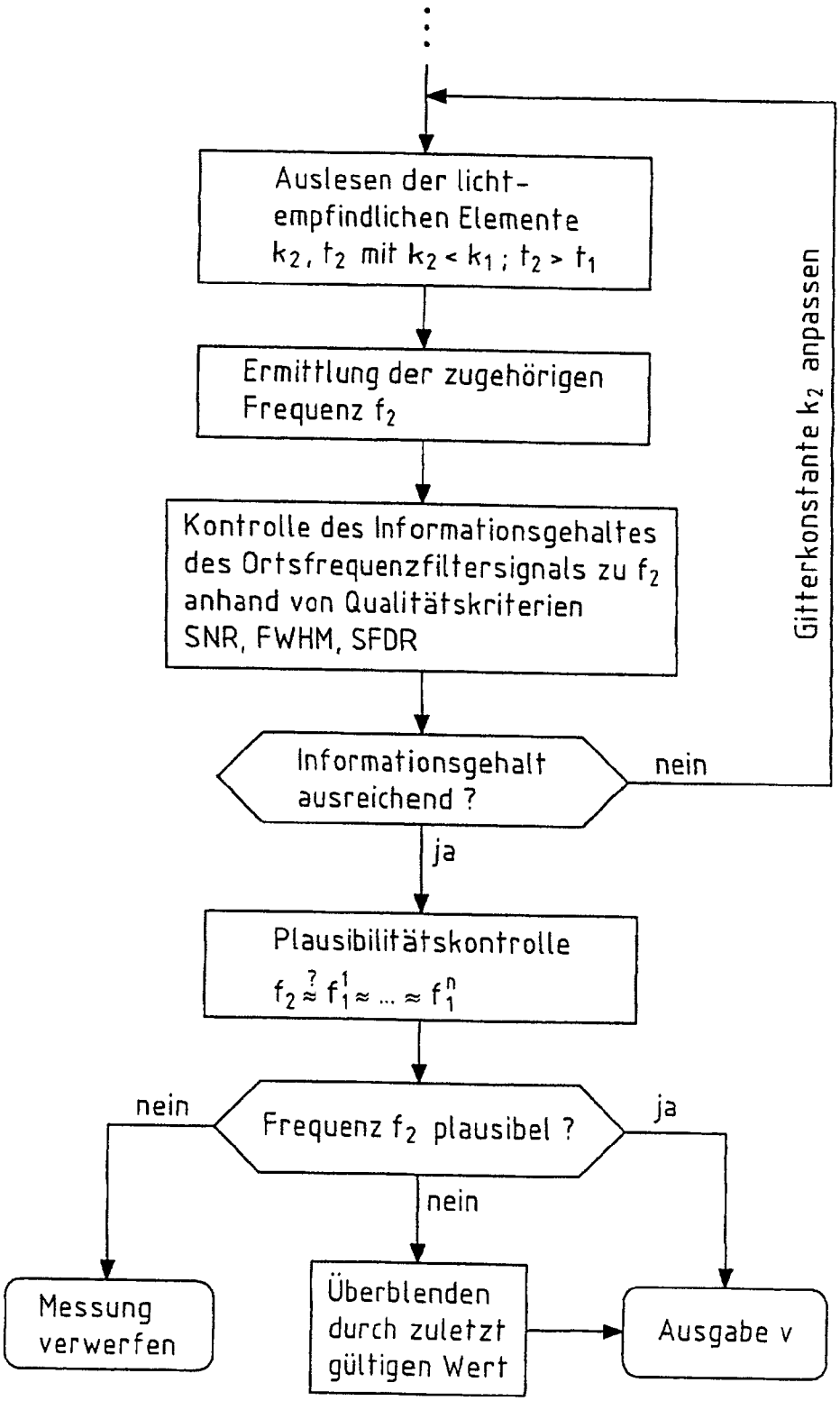

Auslesen der licht-empfindlichen Elemente k_2, t_2 mit $k_2 < k_1$; $t_2 > t_1$
Ermittlung der zugehörigen Frequenz f_2
Kontrolle des Informationsgehaltes des Ortsfrequenzfiltersignals zu f_2 anhand von Qualitätskriterien SNR, FWHM, SFDR
Informationsgehalt ausreichend ?
nein
Gitterkonstante k_2 anpassen
ja
Plausibilitätskontrolle $f_2 \stackrel{?}{\approx} f_1^1 \approx \ldots \approx f_1^n$
Frequenz f_2 plausibel ?
nein
ja
nein
Messung verwerfen
Überblenden durch zuletzt gültigen Wert
Ausgabe v

Fig.2b