



(10) **DE 10 2011 016 868 B4** 2013.05.16

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 016 868.0**  
(22) Anmeldetag: **13.04.2011**  
(43) Offenlegungstag: **13.10.2011**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **16.05.2013**

(51) Int Cl.: **G01B 11/16 (2006.01)**

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:  
**10 2010 014 865.2 13.04.2010**

(73) Patentinhaber:  
**Baumer Innotec AG, Frauenfeld, CH**

(74) Vertreter:  
**Nowlan & Stadler Patentanwälte Partnerschaft,  
88045, Friedrichshafen, DE**

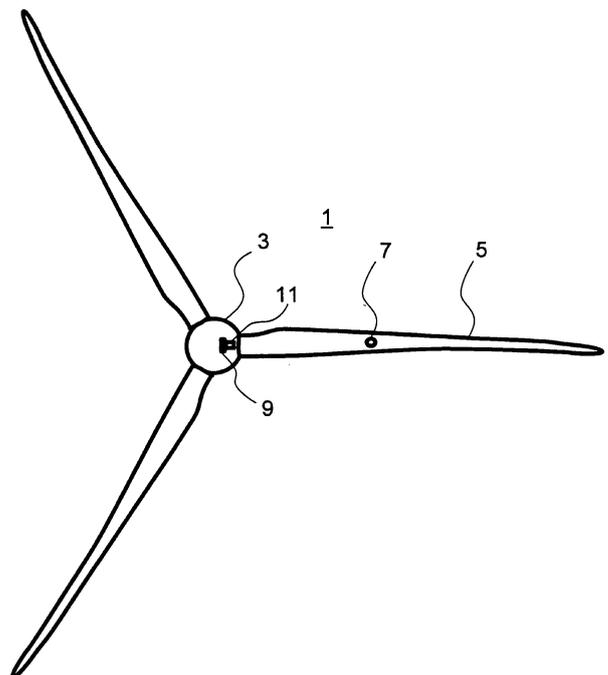
(72) Erfinder:  
**Furrer, Bernhard, Elsau Rätterschen, CH; Knaus,  
Theo, Rorschach, CH; Tiedeke, Joachim,  
Kreuzlingen, CH; Ihlefeld, Joachim, Dr., 01067,  
Dresden, DE; Kluser, Christoph, Wil, CH**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

<b>DE</b>	<b>10 2006 002 708</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>60 2006 000 063</b>	<b>T2</b>
<b>US</b>	<b>5 249 470</b>	<b>A</b>
<b>EP</b>	<b>1 361 445</b>	<b>A1</b>
<b>EP</b>	<b>1 510 809</b>	<b>A1</b>
<b>WO</b>	<b>2009/ 143 848</b>	<b>A2</b>
<b>WO</b>	<b>2009/ 143 849</b>	<b>A2</b>
<b>WO</b>	<b>2010/ 089 139</b>	<b>A1</b>

(54) Bezeichnung: **Messvorrichtung zum Messen von Verformungen elastisch verformbarer Objekte**

(57) Hauptanspruch: Einrichtung zur Messung von Verformungen eines elastisch verformbaren Objekts, vorzugsweise einer langgestreckten Trägerstruktur, umfassend zumindest eine optisch erfassbare Markierung (7, 71) an einer ersten Längsposition entlang des elastisch verformbaren Objekts, sowie zumindest eine elektronische Kamera (9) mit einem Objektiv (11) und einem Matrix-Sensor (89), wobei das Objektiv (11) der Kamera (9) auf die zumindest eine optisch erfassbare Markierung (7, 71) gerichtet ist, und eine als eine beugende Struktur ausgebildete bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung (93), durch welche die Helligkeitsverteilung der ansonsten am Ort des Matrix-Sensors (89) entstehenden Bildstrukturen zumindest geändert oder zerstört wird, sodass der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt werden kann und durch dessen Lage die Richtung, unter welcher das von der optisch erfassbaren Markierung (7, 71) reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs (11) erfasst wird, bestimmt werden kann.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft allgemein die Messung elastischer Verformungen. Insbesondere betrifft die Erfindung die Messung von Verformungen eines Objekts, wie etwa eines langgestreckten Trägers, beispielsweise eines Rotorblatts einer Windenergieanlage oder einer Tragfläche.

**[0002]** Um Verformungen von Trägerelementen festzustellen, sind insbesondere Dehnungsmessstreifen (DMS) bekannt.

**[0003]** Mit diesen Streifen können dehnende Verformungen erfasst werden. Sie bilden vielfach die Messeinrichtung von Waagen aller Größenordnungen, von Haushaltswaagen bis hin zu Kranwaagen. Auch Verformungsmessungen im Stahlbau können ebenfalls durch DMS-Messungen realisiert werden. Um die Verformung anhand der Widerstandsänderung des DMS zu messen, werden in der Regel Brückenschaltungen, wie etwa eine Wheatstone-Brücke eingesetzt. Die mechanische Kopplung des DMS erfolgt typischerweise durch Aufkleben.

**[0004]** Auch wenn die mit DMS durchgeführten Messungen von hoher Genauigkeit sind, bestehen dennoch einige Nachteile. Sind die Strukturen an welchen die Verformung gemessen werden soll, sehr lang und die Verformung selbst relativ klein, müsste für eine zuverlässige Messung ein sehr langer Dehnungsmessstreifen eingesetzt werden. Damit steigt der apparative Aufwand, sowie auch das Gewicht. Es muss ausserdem sichergestellt werden, dass die Verbindung des elastischen Trägers zum DMS langzeitstabil erhalten bleibt. Dieses jedoch kann in widriger Umgebung wie beispielsweise in Windkraftanlagen, die sowohl starker Sonneneinwirkung wie auch Frost ausgesetzt sind und sowohl in feuchter, eisbildender Umgebung als auch in sehr trockener Atmosphäre betrieben werden, sehr schwierig sein.

**[0005]** Zudem kann bei einer dauerhaften Änderung der Widerstandsparameter nicht darauf geschlossen werden, ob etwa eine dauerhafte Verformung des eigentlichen Trägers oder eventuell eine alterungsbedingte Änderung der Widerstandswerte des DMS oder der Brückenschaltung ursächlich sind.

**[0006]** In der EP 1 510 809 A1 ist eine Vorrichtung zur Prüfung von Erzeugnissen offenbart, bei welcher eine an einem rotierenden Kameratum angebrachte Kamera, Bilder von dem Prüfling erzeugt, welche einem nachgeschalteten Auswertesystem zugeführt werden. Die Kamera kann zusammen mit dem Prüfling rotieren oder der Prüfling kann während eines Schwenkwinkels der Kamera eine ganze Drehung ausführen, so dass hierdurch die gesamte Oberfläche des Prüflings der Kamera zugänglich gemacht wird.

**[0007]** Bei einer alternativen, nachveröffentlichten Anmeldung der gleichen Anmelderin, WO 2010/089139 A1, wird das Objektiv einer Kamera auf zumindest eine optisch erfassbare Markierung gerichtet und die Markierung auf einen Matrix-Sensor abgebildet. Die auf die Markierung blickende Kamera (beispielsweise in Längsrichtung entlang eines Objekts in Form einer elastisch verformbaren Trägerstruktur) führt die Bilddaten einer Bildverarbeitungsvorrichtung zu, wobei die Bildverarbeitungsvorrichtung eine Bilderkennung durchführt, so dass die Position der Markierung innerhalb des Bildfelds ermittelt wird, und mittels einer Recheneinrichtung eine Abweichung der Position der Markierung von zumindest einem Sollwert ermittelt und anhand der Position der Markierung innerhalb des Bildfelds quantifiziert wird.

**[0008]** In der DE 60 2006 000 063 T2 ist eine in-situ Überwachung eines Bauteils für ein Turbinengaswerk gezeigt, wobei eine Kamera und eine Lichtquelle vorgesehen sind und die Lichtquelle eine Beleuchtung des sich drehenden Bauteils bewirkt, während die Kamera ein Bild von dem Bauteil empfängt.

**[0009]** In der WO 2009/143848 A2 ist ein Rotorblatt für eine Windkraftanlage gezeigt. An dem Rotorblatt sind mehrere Lichtquellen und Lichtsensoren angeordnet, wobei eine mit einer Verdrehung des Rotorblatts verbundene Positionsänderung der Lichtquellen von den Sensoren detektierbar ist.

**[0010]** In der WO 2009/143849 A2 ist ein Rotorblatt für eine Windkraftanlage gezeigt. An dem Rotorblatt sind mehrere Marker und Lichtsensoren angeordnet, wobei eine mit einer Verdrehung des Rotorblatts verbundene Positionsänderung der Marker von den Sensoren detektierbar ist.

**[0011]** In der EP 1 361 445 A1 ist ein Sensor für eine Windkraftanlage zum Messen der Stärke und Richtung des Windes mittels einer Verformungsanalyse des Turmes der Windkraftanlage gezeigt, so dass die Rotorachse parallel zur Windrichtung ausgerichtet werden kann zum Optimieren der Nutzung der Windenergie.

**[0012]** In der DE 10 2006 002 708 A1 ist eine Messeinrichtung zum Messen der Durchbiegung des Rotorblatts gezeigt. Die Messeinrichtung weist eine Sendeeinheit auf, mittels welcher Strahlung in Längsrichtung des Rotorblattes aussendbar ist, mindestens ein am Rotorblatt befestigtes Reflexionsmittel und eine Empfangseinheit auf. Die Strahlung ist dabei, ausgehend von der Sendeeinheit, einem Strahlengang folgend, vom Reflexionsmittel zur Empfangseinheit reflektierbar. Mittels der Empfangseinheit ist eine durch Verformungen des Rotorblattes bedingte Veränderung des Strahlengangs detektierbar.

**[0013]** In der US 5,249,470 ist eine Vorrichtung mit mehreren Sensoren zum Messen der Durchbiegung eines Rotorblatts für einen Ventilator gezeigt. Die Sensoren sind derart angeordnet, dass sie im Wesentlichen ventilatorartig geformte Ebenen definieren. Die Messung basiert auf einer Messung der Zeit, welche von Punkten auf dem Rotorblatt zum Passieren der Ebenen benötigt wird.

**[0014]** Bildgebende Verfahren haben jedoch generell für eine Fehlerbewertung kritische Eigenschaften. So ist beispielsweise bei einem Bildvergleich zur Ermittlung von Verformungen oder Beschädigungen, eine dem Prüfling anhaftende Verschmutzung geeignet, das Prüfungsergebnis nachteilig zu beeinflussen. Die Verschmutzung kann bei einem Bildvergleich beispielsweise als Verformung erkannt werden.

**[0015]** Es kann sich auch als äußerst schwierig herausstellen, Risse oder durch Delamination erzeugte Oberflächenschäden, wie diese beispielsweise an den Rotorblättern von Windkraftanlagen auftreten können, von oberflächlichen Verschmutzungen zu unterscheiden. Ferner können durch anhaftende Verschmutzungen, wie beispielsweise durch Vereisung bewirkt, Formänderungen im aufgezeichneten Bild auftreten, die ebenfalls eine weit über die tatsächliche Verformung hinausgehende Deformation vortäuschen. Hierdurch können nachfolgende Sicherheitseinrichtungen vorzeitig zu einer Abschaltung eines an sich noch funktionstüchtigen Geräts veranlasst werden.

**[0016]** Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, die vorstehend genannten Probleme, insbesondere auch für längere Messstrecken und insbesondere auch an rotierenden Körpern zu lösen oder zumindest zu mildern. Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweiligen abhängigen Ansprüchen angegeben.

**[0017]** Mit der Erfindung soll kein Bild oder Abbild der zu prüfenden Oberfläche erzeugt, sondern lediglich eine Richtung gemessen werden, aus welcher ein optisches Signal erhalten wird.

**[0018]** Bei vielen Anwendungen sind die Messgenauigkeit sowie die Alterungsbeständigkeit und Dauerbetriebsfestigkeit Schlüsseigenschaften.

**[0019]** Windkraftanlagen müssen mit sehr hoher Zuverlässigkeit betrieben werden können, diese zum Teil extremen Wetterverhältnissen ausgesetzten Anlagen erfahren durch Wind, Eisbelag sowie Witterungsangriff Belastungen, die häufig nur durch eine zeitgerechte Abschaltung dieser Anlagen überstanden werden kann.

**[0020]** Werden bei Durchbiegungen von aerodynamischen Flügeln, wie insbesondere von Rotorblättern maximal zulässige Werte überschritten, können extreme Schäden, wie Bruch der Flügel, Beschädigungen des die Flügel tragenden Turms eintreten, welche bis zum vollständigen Verlust der Anlage unter erheblicher Gefahr für Mensch und Tier reichen.

**[0021]** Die Leistung einer solchen Windenergieanlage, mit Blick auf die zu gewinnende Energie, ist jedoch gerade dann besonders hoch, wenn die Rotorblätter stark belastet, jedoch nicht überlastet betrieben werden können. Je exakter und zuverlässiger diese Belastung gemessen werden kann, umso höher wird also die zu gewinnende Energie, bei gleichzeitig dauerhafter Erhaltung der Anlage durch deren Betrieb im zulässigen Bereich sein.

**[0022]** Ferner ist es wünschenswert, diese Belastung möglichst in Echtzeit erfassen zu können, um bei kurzzeitig und häufig schlecht vorhersehbaren Ereignissen, wie beispielsweise dem Auftreten von Böen, sofort entsprechend reagieren zu können.

**[0023]** Wegen der hohen Kosten für Wartung und Instandhaltung der meist in abseits gelegenen Gebieten oder off-shore errichteten Anlagen, besteht der Wunsch nach möglichst langen Betriebszeiten mit minimalem Wartungsaufwand.

**[0024]** Hier haben direkt bildgebende Verfahren den gravierenden Nachteil, dass kurzzeitige Verschmutzungen, wie beispielsweise durch Reif- oder Eisbildung beim Betrieb dieser Anlagen Lageänderungen der zu erfassenden Objekte vortäuschen können und somit einen unsicheren Betriebszustand der Anlage herbeiführen können, wenn diese Lageänderung immer noch einen sicheren Betriebszustand signalisiert, obwohl schon längst ein kritischer Zustand erreicht wurde.

**[0025]** Obwohl bildgebende Verfahren den großen Vorteil haben, beispielsweise bei der Erfassung von Gittern oder von Punktfeldern, die häufig schachbrett- oder zumindest matrixartig auf dem Prüfling angeordnet sind, Aussagen über das örtliche Verhalten des Prüflings wie etwa Abtragungen oder Rissbildungen machen zu können, und auch damit auf Gefahrensituation aufmerksam machen zu können, ist der damit einhergehende Rechenaufwand häufig zeitaufwendig und es bedarf bei der Bewertung dieser Bildinformation sicheren Expertenwissens. Die Unterscheidung eines Risses von beispielsweise oberflächlich aufliegenden Tierexkrementen ist nicht immer einfach oder sicher möglich.

**[0026]** Hier wird überraschend durch Aufgabe von Bildinformation und der Messung in Echtzeit und Auswertung des zeitlichen Verhaltens des Vibrations-

spektrums des elastisch verformbaren Objekts eine sehr viel sicherere und schnellere Aussage möglich.

**[0027]** Durch möglichst weit gehende Reduktion von Bildinformation, ohne dabei jedoch die benötigte Messgröße zu schädigen, kann auch der Einfluss ungewollt geänderter Bildinformation in gleicher Weise, in welcher auch geänderte Bildinformation reduziert wird, gemildert werden.

**[0028]** Im Idealfall wird nur eine Richtung gemessen, die beispielsweise die Richtung zu einer Markierung wiedergibt, ohne dabei weitere Bildinformation in der Messung oder Auswertung zu erfassen oder zu berücksichtigen.

**[0029]** Kann der Vorgang der Reduktion der Bildinformation beispielsweise optisch durchgeführt werden, so geschieht dieses bereits in Echtzeit, dies bedeutet, dass das auf den Sensor auftreffende Licht bereits entsprechend vorverarbeitet ist.

**[0030]** Basierend auf dieser gemessenen Richtung ist es möglich, in Echtzeit Winkeländerungen durch direkte Auswertung basierend auf den gemessenen Winkeln direkt Regel- oder Steuervorgänge durchzuführen. Dies kann vorzugsweise auch elektronisch in Echtzeit erfolgen.

**[0031]** Die bei bekannten Bildvergleichen durchzuführenden zwei- oder häufig auch mehrdimensionalen mathematischen Operationen, machen eine Echtzeitauswertung häufig sehr schwierig, oft sogar unmöglich.

**[0032]** Mit der Erfindung ist es jedoch möglich, schnelle Aussagen bei sogar im Wesentlichen nicht vorhandener Bildinformation treffen zu können.

**[0033]** In besonders vorteilhafter Weise können bei einer einfachen Winkelmessung, die Frequenzanalysen der in Echtzeit gemessenen Signale weitere wichtige Informationen über den Prüfling bereitstellen.

**[0034]** Bei rotierenden Systemen ist es deshalb äußerst vorteilhaft, wenn eine derartige Meßwertauswertung bereits innerhalb von weniger als einer ganzen Umdrehung des rotierenden Objekts, vorzugsweise innerhalb von weniger als einer halben Umdrehung und noch bevorzugter innerhalb einer viertel und insbesondere bevorzugt innerhalb von weniger als einer zehntel Umdrehung erfolgen kann. Bei einer Windkraftanlage kann dann beispielsweise ein Riss bei Auftreten eines Nebenmaximums des Schwingungs-, beziehungsweise Vibrationsspektrums bei einer anderen Frequenz erkannt werden.

**[0035]** Die Erfindung sieht eine Einrichtung zur Messung von Verformungen eines elastisch verform-

baren Objekts, vorzugsweise einer langgestreckten Trägerstruktur vor, umfassend zumindest eine optisch erfassbare Markierung, an einer ersten Längsposition entlang des elastisch verformbaren Objekts, sowie zumindest eine elektronische Kamera mit einem Objektiv und einem Matrix-Sensor, wobei das Objektiv der Kamera auf die zumindest eine optisch erfassbare Markierung gerichtet ist, und eine als eine beugende Struktur ausgebildete bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung, durch welche die Helligkeitsverteilung der ansonsten am Ort des Matrix-Sensors entstehenden Bildstrukturen zumindest geändert oder zerstört wird, sodass der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt werden kann und durch dessen Lage die Richtung, unter welcher das von der optisch erfassbaren Markierung reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs erfasst wird, bestimmt werden kann.

**[0036]** Vorteilhaft ist es, wenn der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt und durch dessen Lage der Winkel unter welchem das von der Markierung reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs erfasst wird, gemessen wird.

**[0037]** Diese Erfindung erlaubt eine hochgenaue Erfassung von Verformungen des elastisch verformbaren Objekts auch ohne Dehnungsmessstreifen. Der Installationsaufwand wird erheblich reduziert, da ein Verkleben des Dehnungsmessstreifens entfällt.

**[0038]** Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist die bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung ein holographisch optisches Element (HOE) oder eine optische Fouriertransformations-Einrichtung.

**[0039]** Für die zeitliche Signalanalyse wird in Weiterbildung der Erfindung eine Einrichtung zur Erfassung und Verarbeitung von Vibrationsfrequenzen der Vibrationen des elastisch verformbaren Objekts, insbesondere auch zeitlich veränderlicher Frequenzen bevorzugt verwendet. Bevorzugt wird dazu eine Einrichtung zur Messung der Veränderung der Frequenzmaxima, insbesondere basierend auf einer schnellen Fouriertransformation (FFT) und/oder zur Erfassung von spektralen Nebenmaxima eines Vibrationsspektrums des elastisch verformbaren Objekts vorgesehen. Diese Einrichtung kann insbesondere in der Recheneinrichtung implementiert sein.

**[0040]** Gemäß noch einer Weiterbildung umfasst also die Einrichtung zur Erfassung und Verarbeitung von Vibrationsfrequenzen und/oder die Einrichtung zur Messung der Veränderung der Frequenzmaxima eine Recheneinrichtung oder wird durch eine Recheneinrichtung bereitgestellt.

**[0041]** In bevorzugter Ausgestaltung der Erfindung wird die Kamera an einer von der ersten Längsposition in Längsrichtung beabstandeten zweiten Längsposition angeordnet. Ebenso ist es aber möglich, die Kamera außerhalb des elastisch verformbaren Objekts anzuordnen. Auch in diesem Fall blickt die Kamera vorzugsweise in Längsrichtung entlang des Objekts, wie insbesondere einer langgestreckten Trägerstruktur auf die Markierung. Dies kann in einfacher Weise durch eine Anordnung in Verlängerung der Längsrichtung der Trägerstruktur oder auch durch ein optisches Umlenkelement im Strahlengang, wie etwa einem Spiegel oder einem Prisma realisiert werden.

**[0042]** Insbesondere ist es günstig, vorhandene Hohlräume im Objekt auszunutzen, indem die Markierung innerhalb eines Hohlraumes angeordnet ist. Derartige Hohlräume sind insbesondere bei langgestreckten Trägerstrukturen oft vorhanden. Beispielsweise sind verschiedene Träger, wie etwa rohr- oder schachtförmige Träger innen hohl. Es ist dann im Allgemeinen zweckmäßig, die Markierung mittels einer Beleuchtungseinrichtung zu beleuchten.

**[0043]** Mit der Erfindung ist es insbesondere auch in sehr einfacher Weise möglich, Verformungen in allen Raumrichtungen zu verfolgen und zu quantifizieren. Dies kann erreicht werden, indem zumindest zwei entlang der Längsrichtung in unterschiedlichem Abstand von der Kamera beabstandete Markierungen vorgesehen werden, wobei die Recheneinrichtung eingerichtet ist, anhand eines Vergleichs der Positionen der beiden Markierungen eine Längenänderung oder eine ungleichmäßige Deformation der Trägerstruktur oder eines anderen Objekts zu ermitteln und zu quantifizieren.

**[0044]** Eine solche ungleichmäßige Deformation kann durch die Messung der Deformation in zwei Distanzen erfolgen. Liegt eine normale Deformation, wie beispielsweise eine Durchbiegung vor, dann liegen beide Markierungen auf oder in der Nähe einer Sollkurve. Eine Abweichung der Position der Markierungen von der bekannten oder zuvor bestimmten Krümmungskurve des elastisch verformbaren Objekts kann beispielsweise durch eine Knickstelle oder eine lokale Schwächung der Struktur hervorgerufen werden. Wird eine solche Abweichung detektiert, kann beispielsweise ein Warnsignal generiert oder die Vorrichtung mit dem Träger oder einem anderen elastisch verformbaren Objekt abgeschaltet, beziehungsweise in einen sicheren Zustand gefahren werden.

**[0045]** Nachfolgend wird die Erfindung in Bezug auf die Verformung eines verformbaren, bevorzugt eines elastisch verformbaren Trägers beschrieben. Die Erfindung kann in gleicher Weise dabei jeweils auch auf andere elastisch verformbare Objekte angewendet werden.

**[0046]** Um die in verschiedenen Distanzen angeordneten Markierungen unterscheiden zu können, könnten unterschiedliche Farben (Wellenlängen der Reflektion) oder Einbaurichtungen der Markierungen vorgesehen werden. Der Begriff unterschiedlicher „Farben“ der Markierungen ist hierbei nicht auf das sichtbare Spektrum beschränkt. Vielmehr wird hierunter jede die spektrale Zusammensetzung der auftreffenden Strahlung in für verschiedene Markierungen unterscheidbarer Weise ändernde Eigenschaft der Markierungen verstanden. Daher wird im Sinne der Erfindung der Begriff der Farbe auch auf nicht sichtbare Spektralbereiche ausgedehnt.

**[0047]** Es können beispielsweise mit zwei farblich verschiedene Markierungen, die benachbart angeordnet sind, in den jeweiligen Farbbereichen Winkel gemessen werden, ohne dass im wesentlichen orts aufgelöste Bildinformationen ausgewertet werden müssen. Hierdurch können außer reinen Deformationen mit diesen beiden Winkeln der verschiedenen Farbbereiche auch Drehungen oder Ausdehnungen oder Stauchungen erfasst werden.

**[0048]** Wenn unterschiedliche „Farben“ verwendet werden, können diese durch eine Farbkamera oder durch unterschiedliche Beleuchtungen unterschieden werden. Eine Kodierung verschiedener Markierungen kann in vorteilhafter Weise auch durch einen oder mehrere wellenlängenselektive Filter, wie insbesondere Farbfilter auf den Markierungen realisiert werden. Dann können in Weiterbildung der Erfindung zu unterschiedlichen Zeiten die verschiedenen Markierungen mit unterschiedlichen Wellenlängen beleuchtet und selektiv ausgewertet werden, beispielsweise durch farbige, insbesondere verschiedenfarbige Lichtpulse, vorzugsweise mit im Verhältnis zu einer Umdrehungsfrequenz eines Rotors, der mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung ausgestattet ist, höheren Frequenz.

**[0049]** Es können in Weiterbildung der Erfindung auch mehr als zwei in verschiedenen Distanzen zur Kamera angeordnete Markierungen verwendet werden. Beispielsweise können mehrere Reflektoren hintereinander angeordnet und mit der Kamera in einer Achse oder unter Winkel betrachtet werden, wobei die laterale und/oder axiale Verschiebung ausgewertet wird.

**[0050]** Weiterhin ist es auch möglich, eine Torsion des elastisch verformbaren Objekts, insbesondere eine Torsion einer langgestreckten Trägerstruktur um deren Längsachse zu ermitteln. Dazu wird in Weiterbildung der Erfindung eine Markierung mit zumindest zwei lateral zur Betrachtungsrichtung, vorzugsweise farblich verschiedenen, beabstandeten Markierungselementen verwendet, wobei anhand einer Rotation der Markierungselemente in der Bildebene eine Torsion der elastischen, langgestreckten Trägerstruktur

ermittelt und quantifiziert wird. Aufgrund der Torsion drehen sich die Markierungselemente um einen Drehpunkt in der Bildebene. Der Drehpunkt muss dabei nicht selbst innerhalb des Bildfeldes liegen. Allerdings führt die Torsion dann dennoch zu einer Änderung des Winkels der die beiden Elemente verbindenden Strecke.

**[0051]** Eine geeignete Beleuchtung der Markierung kann durch einen Laser realisiert werden, indem der Laser parallel zur Betrachtungsrichtung der Kamera auf die Markierung ausgerichtet ist. Eine günstige, platzsparende Möglichkeit ist beispielsweise, den Laser mittels eines Strahlteilers paraxial zur Blickrichtung der Kamera einzukoppeln. Die Einkopplung kann auch innerhalb des Objektivs, beziehungsweise innerhalb der Kamera erfolgen.

**[0052]** Vorzugsweise wird die Erfindung zur Ermittlung von Verformungen auf längere Distanzen hinweg eingesetzt. Die Länge des optischen Pfades zwischen dem Matrix-Sensor und der Markierung kann zumindest 4 Meter, vorzugsweise zumindest 6 Meter betragen. Wird die erfindungsgemäße Messeinrichtung im Inneren einer Trägerstruktur eingebaut, wird der Abstand zwischen der Markierung und der Kamera, beziehungsweise allgemeiner die Länge des optischen Pfades entlang der Längsrichtung der Trägerstruktur im wesentlichen nur dadurch begrenzt, dass die Markierung durch eine Durchbiegung der begrenzenden Wandungen abgeschattet wird.

**[0053]** Mit der Erfindung kann insbesondere auch eine Regelung aufgebaut werden, mit welcher Verformungen der Trägerstruktur entgegengewirkt wird. Dazu ist eine Regeleinrichtung mit einer erfindungsgemäßen Einrichtung zur Messung von Verformungen vorgesehen, wobei die Regeleinrichtung eine Stelleinrichtung mit zumindest einem Stellglied umfasst, mit welcher unter Ansprechen darauf, dass von der Recheneinrichtung eine Abweichung der Markierung quantifiziert wurde, der elastischen Verformung entgegengewirkt wird.

**[0054]** Ein Einstellen kann insbesondere davon abhängig gemacht werden, dass die Deformation einen vordefinierten Grenzwert überschreitet oder erreicht.

**[0055]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist ein aerodynamischer Flügel vorgesehen, welcher eine wie hierin beschriebene Einrichtung zur Messung von Verformungen aufweist, sowie einen Rotor einer Windkraftanlage, wobei der Rotor einen solchen aerodynamischen Flügel, also ein Rotorblatt aufweist. Dabei ist es günstig, zumindest die Markierung der Messeinrichtung im Inneren des Flügels anzuordnen und eine aktive Beleuchtung der Markierung oder sogar eine selbstleuchtende Markierung vorzusehen.

**[0056]** Die Kamera kann im Flügel, beziehungsweise Rotorblatt selbst untergebracht sein. Es bietet sich aber auch an, die Kamera in der Rotornabe anzuordnen. Damit können elektrische, beziehungsweise elektronische Elemente innerhalb des Rotorblatts vermieden werden.

**[0057]** Alternativ oder zusätzlich kann die erfindungsgemäße Einrichtung auch im Turm, welcher die Gondel und den Rotor trägt, oder der Gondel eingesetzt werden.

**[0058]** Die Erfindung kann hier in besonders vorteilhafter Weise zusammen mit einer wie oben beschriebenen Regeleinrichtung eingesetzt werden, wobei das Stellglied ein Stellglied zur Einstellung des Anstellwinkels umfasst, und wobei die Stelleinrichtung den Anstellwinkel des Rotorblatts ändert. Auch kann allgemein der Auftrieb des Flügels mittels einer oder mehrerer Stellglieder geändert werden. Gedacht ist hierbei besonders auch an die Klappen an den Tragflächen eines Flugzeugs.

**[0059]** Um eine exakte Quantifizierung einer Verformung anhand der Position der Markierung im Bildfeld der Kamera vornehmen zu können, ist die Kenntnis des Abstands der Markierung zur Kamera wertvoll. Im einfachsten Fall wird die Markierung in definiertem Abstand an der Trägerstruktur angebracht. Es ist aber auch möglich, die Messeinrichtung selbstkalibrierend auszugestalten. Dazu ist gemäß einer Ausführungsform der Erfindung vorgesehen, dass die Länge des optischen Pfades vom Matrix-Sensor zur Markierung durch eine Laufzeit-Messung eines Lichtstrahls oder anhand der Größe eines auf die Markierung projizierten Musters bestimmt wird.

**[0060]** In einfachster Ausprägung der Erfindung, kann die Markierung durch zur Umgebung der Markierung kontrastierende Punkte oder Streifen oder ähnliche Strukturen gegeben sein.

**[0061]** Aufgrund der erfindungsgemäßen Einrichtung ist dabei die Form der Markierung im Wesentlichen ohne Einfluss, solange diese einen entsprechenden Kontrast aufweist.

**[0062]** Bis zu gewissen Frequenzen lassen sich auch Vibrationen der Trägerstruktur, wie etwa eines Flügels oder Rotorblatts direkt messen. Wesentlich für die maximal erfassbare Vibrationsfrequenz ist die Bildfrequenz der Kamera.

**[0063]** Die Nutzung von modernen Digitalchips, bei denen eine ROI (Region of Interest) gesetzt werden kann und nur dieser Bereich ausgelesen werden kann, erlauben erhöhte Messfrequenzen.

**[0064]** Auch wenn die Messfrequenz limitiert ist, können höhere Frequenzen jedoch auch in ihrer Rich-

tung und Amplitude durch eine Verschmierung des Bilds der Markierung gemessen werden.

**[0065]** Eine direkte Messung der Vibrationen ist für Frequenzen bis 20 Hertz mit einer Bildwiederholungsrate von zumindest 50 Hertz, vorzugsweise zumindest 60 Hertz ohne weiteres möglich.

**[0066]** Für eine direkte Messung der Vibration der Trägerstruktur, wird eine Bildsequenz aufgenommen und anhand des aus den Einzelbildern bestimmten Verlaufs der Positionsänderung der Markierung zumindest einer der Parameter Amplitude und Frequenz der Vibration mittels der Recheneinrichtung bestimmt.

**[0067]** Generell kann die Erfindung dazu benutzt werden, die Funktionalität einer Trägerstruktur, wie etwa eines Rotorflügels einer Windkraftanlage zu überwachen, steuern und/oder regeln.

**[0068]** Ein Beispiel ist eine Vibration mit noch zulässiger, sich jedoch aufschaukelnder Amplitude. Wird beispielsweise ein derartiges Bewegungsmuster detektiert, kann frühzeitig durch eine geeignete Regelung, etwa durch Änderung des Anstellwinkels entgegengewirkt werden.

**[0069]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen und unter Bezugnahme auf die beigeschlossenen Zeichnungen näher erläutert. Dabei verweisen gleiche Bezugszeichen auf gleiche oder entsprechende Elemente.

**[0070]** Es zeigen:

**[0071]** [Fig. 1](#) eine Ansicht eines Rotors einer Windturbine mit Teilen einer Einrichtung zur Messung von Deformationen eines Rotorblatts,

**[0072]** [Fig. 2](#) einen Querschnitt durch ein Rotorblatt,

**[0073]** [Fig. 3](#) eine Kamera der Messeinrichtung,

**[0074]** [Fig. 4A](#) eine bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung in der Seitenansicht,

**[0075]** [Fig. 4B](#) eine nicht bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung aus dem Stand der Technik zum Vergleich,

**[0076]** [Fig. 5A](#) eine bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung mittels einer Raumfrequenzfilterung in einer isometrischen Ansicht und einer unverschobenen Markierung,

**[0077]** [Fig. 5B](#) eine bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung mittels einer Raumfrequenzfilterung in einer isometrischen Ansicht und einer verschobenen Markierung,

**[0078]** [Fig. 6](#) eine Variante des Rotors aus [Fig. 1](#),

**[0079]** [Fig. 7](#) eine bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung mittels einer Raumfrequenzfilterung in einer isometrischen Ansicht und mit zweien an unterschiedlichen Tiefenpositionen befindlichen Markierungen,

**[0080]** [Fig. 8](#) ein Beispiel, wie anhand eines Vergleiches der Position der beiden Markierungen eine ungleichmäßige Deformation der Trägerstruktur quantifiziert werden kann.

**[0081]** [Fig. 1](#) zeigt einen erfindungsgemäß weitergebildeten aber ansonsten üblichen Windkraftanlagen-Rotor **1** mit drei aerodynamischen Flügeln in Gestalt von Rotorblättern **5**.

**[0082]** Jedes der Rotorblätter **5** bildet eine elastisch verformbare Trägerstruktur. Der Rotor **1** beherbergt Teile einer Einrichtung zur Messung von Verformungen der Flügel, deren Prinzip nachfolgend erläutert wird.

**[0083]** Die Aufgabe der erfindungsgemäßen Einrichtung besteht nun auch darin, die Durchbiegung des Rotorblatts **5** der Windkraftanlage in zwei Achsen zu messen.

**[0084]** Die Einrichtung zur Messung von Verformungen eines elastisch verformbaren Objekts, vorzugsweise einer langgestreckten Trägerstruktur, umfasst zumindest eine optisch erfassbare Markierung **7** an einer ersten Längsposition entlang des elastisch verformbaren Objekts, sowie zumindest eine elektronische Kamera **9** mit einem Objektiv **11** und einem Matrix-Sensor, wobei das Objektiv **11** der Kamera auf die zumindest eine optisch erfassbare Markierung **7** gerichtet ist.

**[0085]** Nicht dargestellt in der vereinfachten Zeichnung der [Fig. 1](#) ist die bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung, durch welche die Helligkeitsverteilung der ansonsten am Ort des Matrix-Sensors entstehenden Bildstrukturen zumindest geändert oder zerstört wird.

**[0086]** Bei dieser Einrichtung wird der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt und durch dessen Lage die Richtung, insbesondere der Winkel unter welchem das von der Markierung reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs erfasst wird, gemessen.

**[0087]** Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist die bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung eine optische Einrichtung, insbesondere ein holographisch optisches Element (HOE), vorzugsweise ein gerechnetes digitales HOE, eine

beugende Struktur, eine optische Fouriertransformationseinrichtung, vorzugsweise mit Filterung der bildgebenden Frequenzen.

**[0088]** Ferner ist eine Einrichtung zur Erfassung und Verarbeitung zeitlich veränderlicher Frequenzen des Vibrationsspektrums des Rotorblatts, sowie eine Einrichtung zur Messung der Veränderung der Frequenzmaxima, insbesondere basierend auf einer schnellen Fouriertransformation (FFT) und/oder zur Erfassung von spektralen Nebenmaxima vorgesehen. Das Vibrationsspektrum kann von der Recheneinrichtung aus den kontinuierlich erfassten Bilddaten der Kamera und den daraus extrahierten zeitabhängigen Deformationswerten erstellt werden.

**[0089]** Die Bildverarbeitungsvorrichtung und die Recheneinrichtung sind in [Fig. 1](#) ebenfalls nicht explizit dargestellt. Allerdings können diese Einrichtungen auch in der Kamera **9** integriert sein, so dass die Kamera **9** an einem Ausgang bereits die Daten der Abweichung von der Sollposition, beispielsweise von der Position des ruhenden Rotors **1** bei Windstille ausgibt.

**[0090]** Bei der in [Fig. 1](#) gezeigten Ausführungsform ist die Kamera **9** in der Nabe **3** des Rotors **1** eingebaut. Ebenso möglich ist ein Einbau im Rotorblatt **5**. Jedenfalls ist die Kamera **9** im Inneren des Rotors **1** angeordnet. Dies ist unter anderem günstig, um die elektronische Elemente beispielsweise gegenüber einem Blitzeinschlag abzuschirmen und die Kamera **9** vor einem blitzschlagbedingtem Ausfall zu schützen.

**[0091]** Kommt es bedingt durch den anströmenden Wind im Betrieb zu einer Verformung des Rotorblatts **5**, bewegt sich die Position der Markierung **7** quer gegenüber der Längsachse des Rotorblatts **5**, welche auch die Blickrichtung der Kamera **9** darstellt. Damit verschiebt sich die Position der Abbildung der Markierung **7** auf dem Matrix-Sensor der Kamera **9**. Ist der Abstand der Kamera **9** zur Markierung **7** bekannt, kann aus der Verschiebung mittels der Recheneinrichtung die Deformation an der Stelle der Markierung leicht errechnet werden.

**[0092]** Der Abstand des Matrix-Sensors der Kamera **9** zur Markierung beträgt zwischen dem Matrix-Sensor und der Markierung vorzugsweise zumindest 4 Meter, besonders bevorzugt zumindest 6 Meter, um eine Verbiegung des Flügels mit hoher Genauigkeit messen zu können. Andererseits ist es im allgemeinen günstig, den Abstand nicht größer als 40 Meter zu wählen, da ansonsten das Rotorblatt **5** bei den auftretenden Belastungen schnell so weit verbiegt, dass die Markierung nicht mehr im Bildfeld der Kamera liegt, sondern durch die gekrümmten Wände des Rotorblatts **5** verdeckt wird.

**[0093]** Besonders bevorzugt kann allgemein eine Regeleinrichtung vorgesehen werden, mit welcher den Verformungen entgegengewirkt werden kann. Die Regeleinrichtung umfasst dazu eine Stelleinrichtung mit zumindest einem Stellglied, mit welcher unter Ansprechen darauf, dass von der Recheneinrichtung eine Abweichung der Markierung von einer Sollposition, insbesondere die Überschreitung eines Grenzwerts quantifiziert wurde, der elastischen Verformung entgegengewirkt wird. Im Falle des in [Fig. 1](#) gezeigten Windkraftanlagen-Rotors **1** wird dabei ein Stellglied zur Einstellung des Anstellwinkels der Flügel **5** verwendet, so dass die Stelleinrichtung den Anstellwinkel des Rotorblatts **5** in Abhängigkeit von der gemessenen Deformation ändert.

**[0094]** [Fig. 2](#) zeigt einen Querschnitt durch das Rotorblatt **5**. Typischerweise umfassen Rotorblätter von Windkraftanlagen, sowie auch andere aerodynamische Flügel, wie insbesondere auch Flugzeugflügel entlang ihrer Längsrichtung verlaufende Hohlräume. Bei dem in [Fig. 2](#) gezeigten Beispiel umfasst dabei der Flügel **5** eine Oberschale **51** und eine Unterschale **52**, zwischen denen ein Holm **54** angeordnet ist. Innerhalb des Holms **54** erstreckt sich ein schachtförmiger Hohlraum **56**. Auch die weiteren Zwischenräume **55** und **57** können hohl sein. Es ist nun zweckmäßig, dass wie in [Fig. 2](#) gezeigt, zumindest die Markierung **7** der Messeinrichtung im Inneren des Flügels **5** angeordnet ist. Beispielhaft ist in [Fig. 2](#) die Markierung **7** im Holm **54** im schachtförmigen Hohlraum **56** eingesetzt. Damit die Kamera **9** die Markierung **7** erfassen kann, ist eine aktive Beleuchtung der Markierung vorgesehen. [Fig. 3](#) zeigt dazu ein Beispiel einer geeigneten Kamera **9**. Bei diesem Beispiel sind um das Objektiv **11** herum am Gehäuse **91** der Kamera **9** Leuchtdioden **92** vorgesehen, welche Objekte entlang der Blickrichtung der Kamera, im eingebauten Zustand also entlang der Längsrichtung des Rotorblatts **5** beleuchten. Um einen hohen Kontrast in den aufgenommenen Bildern zu erhalten ist es dann weiterhin günstig, die Markierung **7** als Reflektor, insbesondere als Retroreflektor auszubilden. Dazu kann eine Reflektorfolie, oder, wie in [Fig. 2](#) dargestellt eine Markierung **7** in Form eines Katzenauges verwendet werden.

**[0095]** [Fig. 4A](#) zeigt beispielhaft eine bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung **93**. In [Fig. 4A](#) ist der Flügel, beziehungsweise das Rotorblatt **5** entlang seiner Längsachse aufgeschnitten dargestellt. Die bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung **93** beeinflusst die Helligkeitsverteilung bzw. die Abbildung der Markierung **7** mittels Kamera **9** bzw. mittels Objektiv **11** derart, dass keine Schädigung der benötigten Messgröße erfolgt, aber der Einfluss ungewollter geänderter Bildinformationen reduziert. Bewegt sich die Markierung **7** aufgrund einer Dehnung des Rotorblatts **5** beispielsweise Bildinformationen reduziert. Bewegt sich die Markierung **7** aufgrund einer

Dehnung des Rotorblatts **5** beispielsweise quer zur Langsachse (in [Fig. 4A](#) nur in vertikaler Richtung, für beide Richtungen ist die Situation analog), ist diese Verschiebung anhand einer analogen Verschiebung auf dem Matrixsensor **89** der Kamera **9** zu detektieren. Verschmutzungen hingegen, die bei punktgenauer Abbildung eine Verschiebung signalisieren würden, aber auf keiner tatsächlichen Verformung beruhen, werden durch die unscharfe Abbildung nicht erfasst.

**[0096]** [Fig. 4B](#) zeigt als Vergleich zu [Fig. 4A](#) eine nicht bildzerlegende und/oder bildändernde Einrichtung aus dem Stand der Technik. Einziger Unterschied zu [Fig. 4A](#) besteht darin, dass die Einrichtung **93'** nun keine bildzerlegende und/oder -ändernde Eigenschaften mehr aufweist, so dass ein scharfes, im wesentlichen maßstabsgetreues Abbild auf dem Sensor **89** erzeugt wird. und somit beispielsweise Verschmutzungen fehlerhafte Interpretationen verursachen.

**[0097]** [Fig. 5A](#) bzw. [Fig. 5B](#) zeigt schematisch die Abbildungssituation bei der die Markierung **7** – hier symbolisiert durch den Buchstaben A – einmal undeformiert ([Fig. 5A](#)) und einmal aufgrund einer Deformation verschoben ist ([Fig. 5B](#)). Das eingezeichnete Kamerabild **94** auf dem Matrixsensor stammt dabei aus der im Betrieb typischerweise kontinuierlich mit der vorgesehenen Bildwiederholungsrate aufgenommenen Bildsequenz. Im Kamerabild der [Fig. 5B](#) ist zu erkennen, dass der Ort des Signals **7'** der Markierung **7** auf dem Matrixsensor **89** gegenüber dem Ort des Signals **70'** der Referenzposition der Markierung **7** verschoben ist. In [Fig. 5A](#) bzw. in [Fig. 5B](#) ist im Gegensatz zu [Fig. 4A](#) die bildzerlegende und/oder bildändernde Einrichtung **93** mittels einer 4f-Anordnung und entsprechender Raumfrequenzfilterung in der Fourierebene **90** realisiert. Durch die Filterung in der Fourierebene **90**, wird von der Markierung **7** als Signal **7'**, beziehungsweise **70'** lediglich ein Leuchtfleck, jedoch keine Abbildung der Markierung **7** erhalten. Anhand der [Fig. 5A](#) und [Fig. 5B](#) ist auch zu erkennen, dass nur die Verschiebung des Markierung **7** zu erkennen ist. Eventuelle Verschmutzungen (in [Fig. 5B](#) durch schwarze Kreise **703** symbolisiert) der Markierungen **7** sind durch die Raumfrequenzfilterung nicht mehr sichtbar, da die Formen der Signale **7'**, **70'** auf dem Matrixsensor **89** der Kamera **9** identisch sind.

**[0098]** Die Kamera **9** und die Beleuchtung wird so gesteuert oder eingestellt, dass das Lichtsignal des Reflektors die Kamera gut aussteuert, vorzugsweise aber nicht übersteuert. Es erfolgt eine Schwerpunktbestimmung des Signals. Mit den bekannten Eigenschaften des Objektivs der Kamera wird die Auslenkung des Lichtflecks gegenüber der Referenzposition in zwei Richtungen bestimmt. Im Falle eines aerodynamischen Flügels, wie insbesondere eines Ro-

torblatts **5** stellt die Referenzposition vorzugsweise die Position der Markierung **7** ohne aerodynamische Belastung dar, bei welcher keine wesentlichen Kräfte außer den durch das Eigengewicht verursachten Momenten auf den Flügel einwirken. Im Falle eines Rotorblatts einer Windturbine kann die Referenzposition daher in einfacher Weise aus dem ausgelesenen Signal der Kamera bei Windstille ermittelt werden. Aus dem kalibrierten Abstand der Markierung zur Kamera und dem Versatz der Markierung zur Referenzposition errechnet sich aus dieser Aufnahme eine Verbiegung bestimmter Größe.

**[0099]** [Fig. 6](#) zeigt eine Variante des Rotors **1** aus [Fig. 1](#). Bei dieser Variante sind zwei entlang der Längsrichtung des Flügels in unterschiedlichem Abstand von der Kamera **9** beabstandete Markierungen **7**, **71** vorgesehen. Anhand der Position dieser Markierungen **7**, **71** ist es dann auch möglich, eine ungleichmäßige Deformation der Trägerstruktur zu ermitteln und zu quantifizieren.

**[0100]** Außerdem können die Markierungen **7**, **71** jeweils zwei oder mehrere lateral zur Betrachtungsrichtung beabstandete Markierungselemente umfassen. Dann kann auch anhand einer Rotation der Markierungselemente in der Bildebene eine Torsion der elastischen, langgestreckten Trägerstruktur, beziehungsweise im Beispiel der [Fig. 6](#) eine Torsion des Flügels **5** ermittelt und quantifiziert werden.

**[0101]** [Fig. 7](#) zeigt eine bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung mittels einer Raumfrequenzfilterung in einer isometrischen Ansicht und mit zweien an unterschiedlichen Tiefenpositionen befindlichen Markierungen **7** und **71** aus der von der Kamera **9** des in [Fig. 6](#) gezeigten Rotors **1** aufgenommenen Videosequenz. Jede der Markierungen **7**, **71** umfasst bei dem in [Fig. 7](#) dargestellten Beispiel zwei lateral beabstandete Markierungselemente. Die Markierungselemente **701**, **702** der Markierung **7** und die Markierungselemente **704**, **705** der Markierung **71** sind dabei außerdem entlang von zueinander quer verlaufenden, hier im Speziellen entlang von zueinander senkrechten Linien angeordnet. Um die Markierungen **7**, **71** voneinander unterscheiden zu können, weisen die Markierungselemente diskriminierbare Eigenschaften, wie etwa unterschiedlichen Farbe oder Form auf. Dies ist in [Fig. 7](#) durch die unterschiedliche Füllung der hier rechteckförmigen Markierungselemente symbolisiert. Eine Kodierung der verschiedenen Markierungen **7**, **71** kann in vorteilhafter Weise auch durch einen oder mehrere wellenlängenselektive Filter, wie insbesondere Farbfilter auf den Markierungen erfolgen. Werden von den Markierungen unterschiedliche Farben zur Kamera zurückreflektiert oder zurückgestreut, können in Weiterbildung der Erfindung zu unterschiedlichen Zeiten die verschiedenen Markierungen mit unterschiedlichen Wellenlängen beleuchtet und selektiv ausgewertet werden. Dies kann dann be-

sonders von Vorteil sein, wenn mehr als zwei Markierungen verwendet werden und zu diskriminieren sind.

**[0102]** Es ist wie auch in den vorhergehenden Beispielen günstig, die Markierungen **7**, **71**, beziehungsweise deren Markierungselemente **701**, **702** und **704**, **705** als Reflektoren, insbesondere Retroreflektoren auszubilden, so dass ein hoher Bildkontrast bei zur Betrachtungsrichtung paraxialer Beleuchtung, beispielsweise durch Leuchtdioden oder einen oder mehrere Laser zu erzielen.

**[0103]** Da sich der Abstand der abgebildeten Markierungselemente mit deren Entfernung ändert, kann durch eine Abstandsbestimmung nun auch in einfacher Weise eine Deformation in Längsrichtung, insbesondere eine Dehnung des Flügels erfasst und quantifiziert werden. Bei den Flügeln großer Rotoren können solche Dehnungen durchaus. Größenordnungen im Meterbereich erreichen.

**[0104]** Anhand der jeweils zwei in einer Linie angeordneten Markierungselemente – in [Fig. 7](#) in der vertikalen Richtung – wird nun auch die Messung einer Verdrehung des Flügels möglich. Tritt zwischen Kamera **9** und Markierung **7** und/oder **71** eine Torsion auf, ändert sich der Winkel der die beiden jeweils zu einer Markierung **7**, **71** gehörenden Markierungselemente verbindenden Linie in der Bildebene.

**[0105]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel können folgende Parameter für die Messeinrichtung verwendet werden:

Der Arbeitsabstand, beziehungsweise die Länge des optischen Pfades zwischen Sensor und Markierung wird innerhalb einer Distanz von etwa 40 Metern gewählt. Die Messzeit beträgt 16,6 Millisekunden entsprechend einer Bildwiederholrate von 60 Bildern pro Sekunde. Messbar sind die Größen X-Auslenkung, Y-Auslenkung, Verdrehung, Abstand der Markierung, Schwingungsamplitude und Schwingungsfrequenz bis typischerweise 20 Hertz.

**[0106]** Mit einem einfachen Kamerasensor kann bereits eine Messgenauigkeit von 1/7000 der maximalen erfassbaren Auslenkung entlang der X-Achse (der Richtung entlang der längeren Seite des in [Fig. 6](#) gezeigten Bildes) und 1/4000 der maximalen erfassbaren Auslenkung entlang der Y-Achse erzielt werden.

**[0107]** [Fig. 8](#) zeigt ein Beispiel, wie anhand eines Vergleichs der Positionen der Signale der beiden Markierungen auf dem Matrixsensor **89** eine ungleichmäßige Deformation der Trägerstruktur, hier im Speziellen einer ungleichmäßigen Durchbiegung des Flügels **5** ermittelt und quantifiziert werden kann.

**[0108]** In [Fig. 8](#) sind Diagramme der Auslenkung  $\Delta \times$  des Flügels in Abhängigkeit vom Abstand  $D$  zur Nabe

dargestellt. Die Markierung **7** ist an der Position  $d1$  und die Markierung **71** an der Position  $d2$  angeordnet.

**[0109]** Die durchgezogene Kurve zeigt beispielhaft eine normale, gleichmäßige Durchbiegung eines intakten Flügels. Die erwartete Durchbiegung ist hier mit  $\Delta \times 1$  bezeichnet. Weist der Flügel, wie insbesondere ein Rotorblatt **5** einen Knick, oder beispielsweise auch einen Riss auf, der zur Schwächung der Struktur des Flügels führt, kommt es hinter der Riss- oder Knickstelle **100** zu einer verstärkten Durchbiegung. Eine solche beispielhafte Durchbiegungskurve ist gestrichelt eingezeichnet. Entsprechend ist das Verhältnis der Auslenkungen  $\Delta \times 2$  hier größer. Wird anhand der Messdaten von der Recheneinrichtung festgestellt, dass eine solche anomale Durchbiegung dauerhaft vorliegt, beziehungsweise eine dauerhafte Abweichung von der Schar von Durchbiegungskurven eines intakten Flügels vorliegt, kann beispielsweise eine Abschaltung der Windkraft-Anlage oder das Anfahren eines sicheren Zustands eingeleitet werden. Dieser sichere Zustand kann beispielsweise durch Neutralstellung der Flügel erreicht werden, wobei der defekte Flügel nach unten weist.

**[0110]** Durch die Anbringung von zwei Reflektorpaaren in der Tiefe des Flügels kann die Biegung in zwei Distanzen gemessen werden. Dadurch ist es möglich, zu prüfen ob der Flügel gleichmäßig durchgebogen ist, oder ob eine Knickstelle vorliegt, weil die beiden Punkte nicht mehr auf der von der Struktur her bekannten Krümmungskurve liegen.

**[0111]** Bei der anhand der [Fig. 1](#) bis [Fig. 8](#) beschriebenen Messeinrichtung kann eine Verschiebung der Markierungen in allen Richtungen in der Bildebene, mithin also in zwei Dimensionen quer zur Blickrichtung der Kamera erfasst und quantifiziert werden.

**[0112]** Die vorstehenden Ausführungsbeispiele beziehen sich auf den, beziehungsweise die Rotorblätter **5** einer Windkraftanlage. Die Erfindung kann auch in entsprechender Weise für Flugzeugtragflächen eingesetzt werden. Hier bietet es sich dann an, nicht den Anstellwinkel der Tragfläche in Abhängigkeit der Verformung zu ändern, sofern die Tragflächen wie im Allgemeinen üblich, starr sind. Möglich ist aber hier, den Auftrieb mittels einer oder mehrerer Ruder und Klappen, wie etwa der Querruder und Spoiler oder Flaps zu regulieren. Auch bei Rotorblättern von Windenergieanlagen sind Klappen zur Windlast-Regelung bekannt und können alternativ oder zusätzlich zu einer Blattwinkelsteuerung angesteuert werden.

**[0113]** Da im Falle von Flugzeugen und einer Messung der Deformation der Tragflächen einer Deformation des Flügels typischerweise einer Lageänderung des Flugzeugs vorausgeht, kann durch eine Regelungseinrichtung, welche die Klappen und/oder

Ruder anhand der Messung der Durchbiegung und/oder Verwindung der Tragfläche steuert, unter anderem die Fluglage stabilisiert werden.

**[0114]** Auch im Flugzeugrumpf kann vorteilhaft eine erfindungsgemäße Messeinrichtung vorgesehen werden, um hier Belastungen der Trägerstruktur erkennen zu können.

**[0115]** Es ist dem Fachmann ersichtlich, dass die Erfindung nicht auf die vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt ist, sondern in vielfältiger Weise variiert werden kann. Insbesondere kann die Erfindung auch auf andere Trägerstrukturen und elastisch verformbare Objekte angewendet werden.

### Patentansprüche

1. Einrichtung zur Messung von Verformungen eines elastisch verformbaren Objekts, vorzugsweise einer langgestreckten Trägerstruktur, umfassend zumindest eine optisch erfassbare Markierung (7, 71) an einer ersten Längsposition entlang des elastisch verformbaren Objekts, sowie zumindest eine elektronische Kamera (9) mit einem Objektiv (11) und einem Matrix-Sensor (89), wobei das Objektiv (11) der Kamera (9) auf die zumindest eine optisch erfassbare Markierung (7, 71) gerichtet ist, und eine als eine beugende Struktur ausgebildete bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung (93), durch welche die Helligkeitsverteilung der ansonsten am Ort des Matrix-Sensors (89) entstehenden Bildstrukturen zumindest geändert oder zerstört wird, so dass der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt werden kann und durch dessen Lage die Richtung, unter welcher das von der optisch erfassbaren Markierung (7, 71) reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs (11) erfasst wird, bestimmt werden kann.

2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Lage des Schwerpunktes der Helligkeitsverteilung oder des Maximums der Helligkeitsverteilung der Winkel, unter welchem das von der Markierung (7, 71) reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs (11) erfasst wird, bestimmt werden kann.

3. Einrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die bildzerlegende und/oder -ändernde Einrichtung (93) ein holographisch optisches Element (HOE) und/oder eine optische Fouriertransformations-Einrichtung umfasst.

4. Einrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche mit einer Einrichtung zur Erfassung und

Verarbeitung von Vibrationsfrequenzen des elastisch verformbaren Objekts.

5. Einrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche mit einer Einrichtung zur Messung der Veränderung der Frequenzmaxima und/oder zur Erfassung von spektralen Nebenmaxima eines Vibrationspektrums des elastisch verformbaren Objekts.

6. Einrichtung nach dem vorstehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur Messung der Veränderung der Frequenzmaxima auf einer schnellen Fouriertransformation (FFT) basiert.

7. Einrichtung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kamera (9) an einer von der ersten Längsposition in Längsrichtung beabstandeten zweiten Längsposition angeordnet ist.

8. Einrichtung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Markierung (7, 71) innerhalb eines Hohlraumes (56) des elastisch verformbaren Objekts angeordnet ist und mittels einer Beleuchtungseinrichtung beleuchtet wird.

9. Einrichtung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Laser zur Beleuchtung der Markierung vorgesehen ist, wobei der Laser parallel zur Betrachtungsrichtung der Kamera (9) auf die Markierung (7, 71) ausgerichtet ist.

10. Regeleinrichtung mit einer Einrichtung zur Messung von Verformungen gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinrichtung eine Stelleinrichtung mit zumindest einem Stellglied umfasst, mit welcher unter Ansprechen darauf, dass von einer Recheneinrichtung eine Abweichung der Markierung von einer Sollposition quantifiziert wurde, der elastischen Verformung entgegengewirkt wird.

11. Aerodynamischer Flügel, gekennzeichnet durch eine Einrichtung zur Messung von Verformungen gemäß einem der vorstehenden Ansprüche.

12. Windkraftanlagen-Rotor (1) mit einem aerodynamischen Flügel gemäß Anspruch 11 in Form eines Rotorblatts (5).

13. Windkraftanlagen-Rotor (1) gemäß dem vorstehenden Anspruch, gekennzeichnet durch eine Regeleinrichtung gemäß Anspruch 10, wobei das Stellglied ein Stellglied zur Einstellung des Anstellwinkels umfasst, und wobei die Stelleinrichtung den Anstellwinkel des Rotorblatts (5) ändert.

14. Verfahren zur Messung von Verformungen eines elastisch verformbaren Objekts, insbesondere ei-

ner elastischen, langgestreckten Trägerstruktur, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine optisch erfassbare Markierung (7, 71) an einer ersten Längsposition entlang des elastisch verformbaren Objekts, sowie zumindest eine elektronische Kamera (9) mit einem Objektiv (11) und einem Matrix-Sensor (89) verwendet wird, wobei das Objektiv (11) der Kamera (9) auf die zumindest eine optisch erfassbare Markierung (7, 71) gerichtet ist, und mit einer als eine beugende Struktur ausgebildeten bildzerlegenden und/oder -ändernden Einrichtung (93), die Helligkeitsverteilung der ansonsten am Ort des Matrix-Sensors (89) entstehenden Bildstrukturen zumindest geändert oder zerstört wird, wobei der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt und durch dessen Lage die Richtung, unter welcher das von der Markierung (7, 71) reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs (11) erfasst wird, gemessen wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwerpunkt der Helligkeitsverteilung oder das Maximum der Helligkeitsverteilung ermittelt und durch dessen Lage der Winkel, unter welchem das von der Markierung (7, 71) reflektierte Licht relativ zur optischen Achse des Objektivs (11) erfasst wird, gemessen wird.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 oder 15, bei welchem die Veränderung von Frequenzmaxima eines Vibrationspektrums des elastisch verformbaren Objekts und/oder zur Erfassung von spektralen Nebenmaxima gemessen wird.

17. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Verformung eines aerodynamischen Flügels erfasst und quantifiziert wird und mittels zumindest eines Stellglieds in Abhängigkeit der Verformung der Anstellwinkel des Flügels oder dessen Auftrieb verändert wird.

18. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass eine Markierung (7, 71) mit zumindest zwei lateral zur Betrachtungsrichtung beabstandeten, Markierungselementen (701, 702, 704, 705) verwendet wird, wobei anhand einer Rotation der Markierungselemente (701, 702, 704, 705) in der Bildebene eine Torsion des elastisch verformbaren Objekts ermittelt und quantifiziert wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Markierungselemente (701, 702, 704, 705) farblich verschieden ausgeführt sind.

20. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 14 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Länge des optischen Pfades vom Matrix-Sensor (89) zur Markierung (7, 71) durch eine Laufzeit-Messung eines Lichtstrahls bestimmt wird.

21. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 14 bis 20, bei welchem eine Messung der Vibration des elastisch verformbaren Objekts durchgeführt wird, wobei eine Bildsequenz aufgenommen und anhand des aus den Einzelbildern bestimmten Verlaufs der Positionsänderung der Markierung (7, 71) zumindest einer der Parameter Amplitude und Frequenz der Vibration mittels der Recheneinrichtung bestimmt wird.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

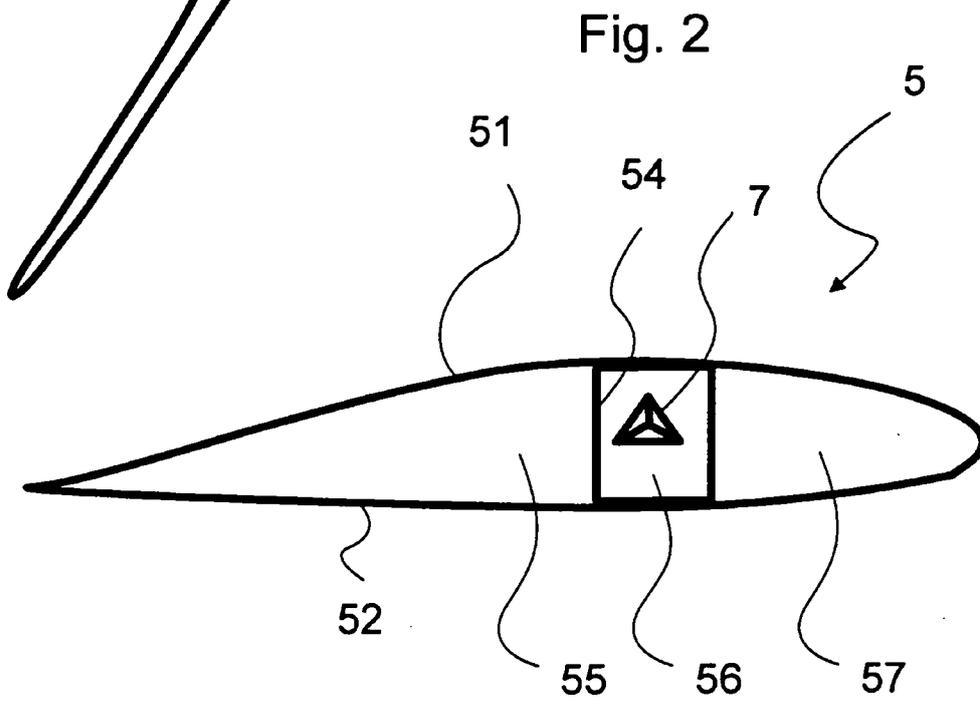
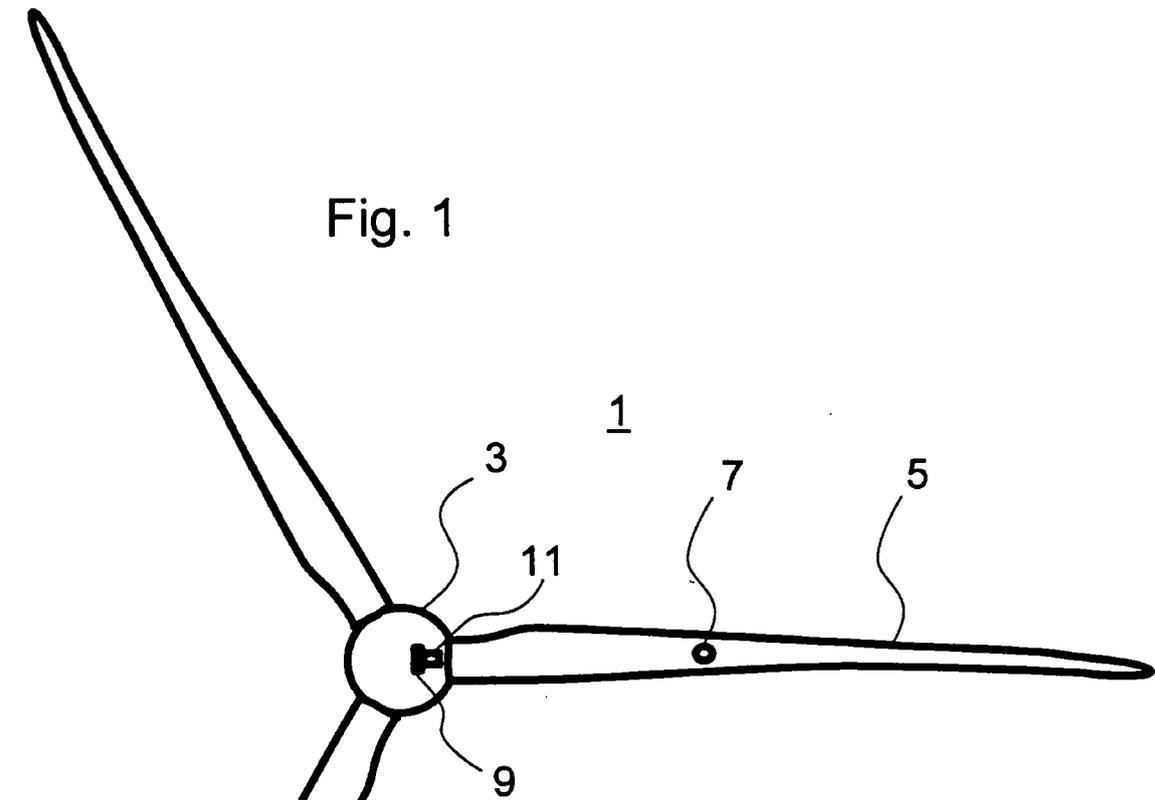


Fig. 3

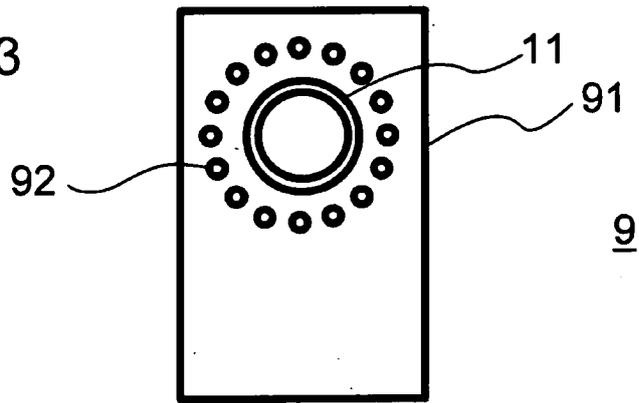
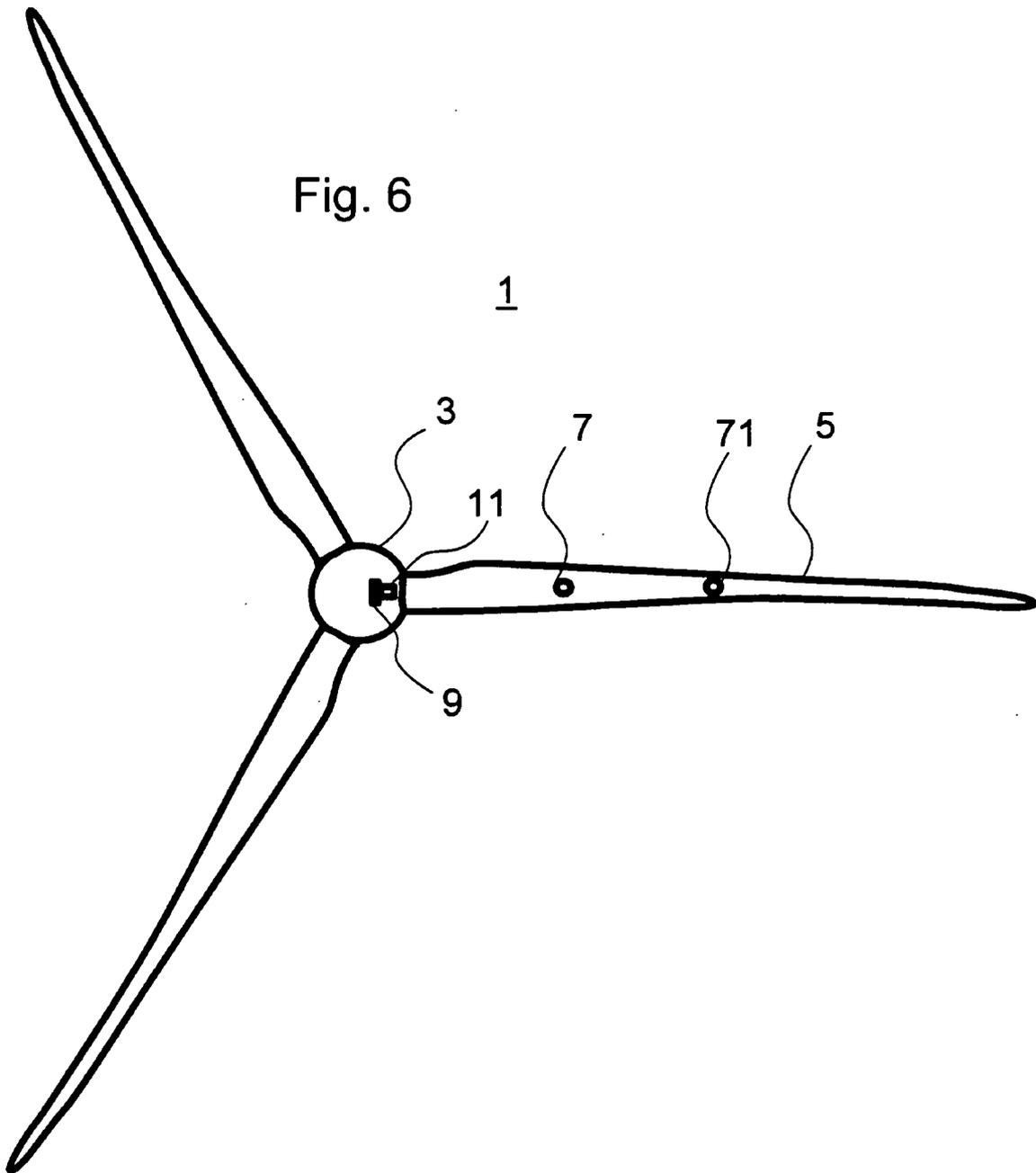
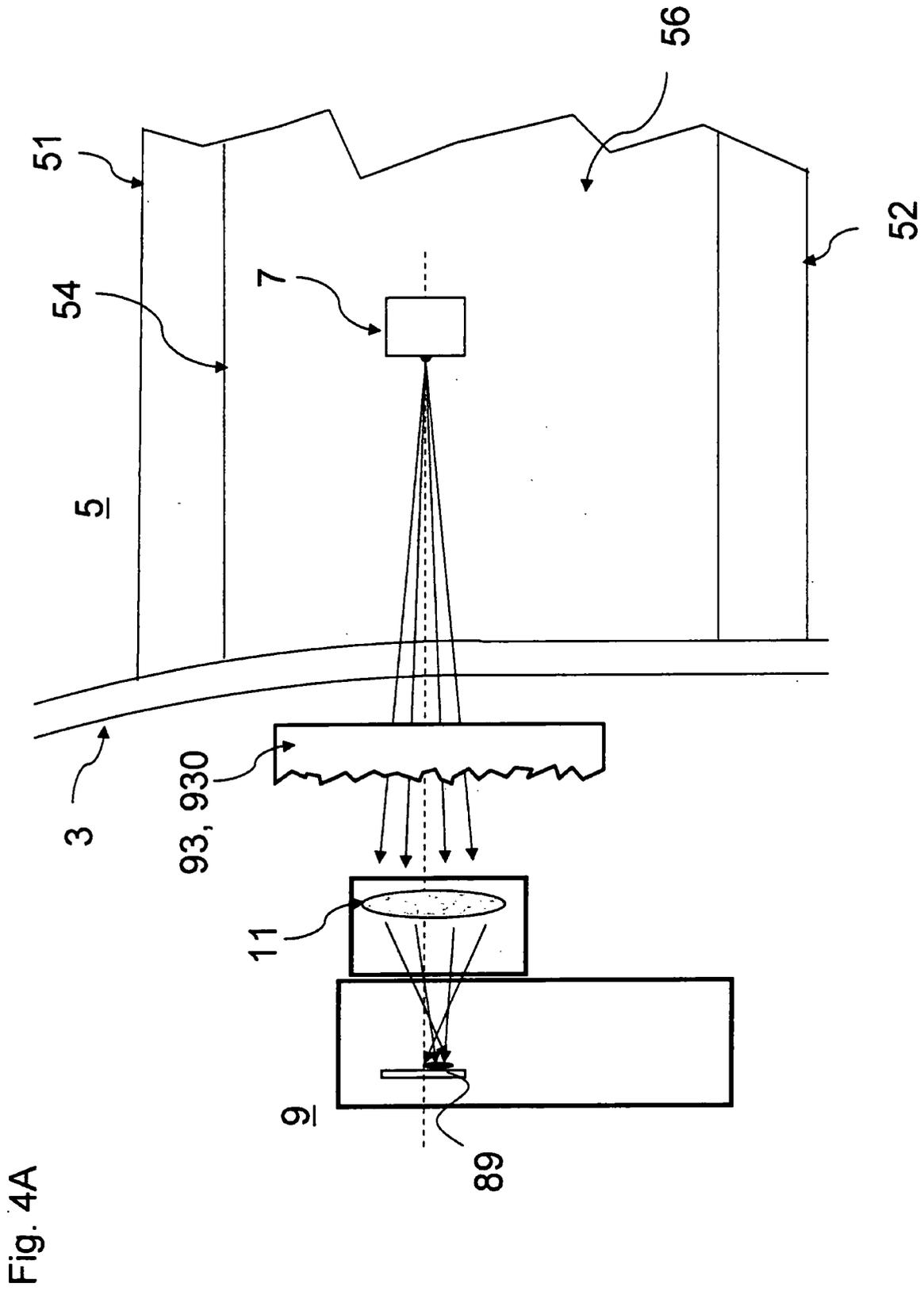


Fig. 6





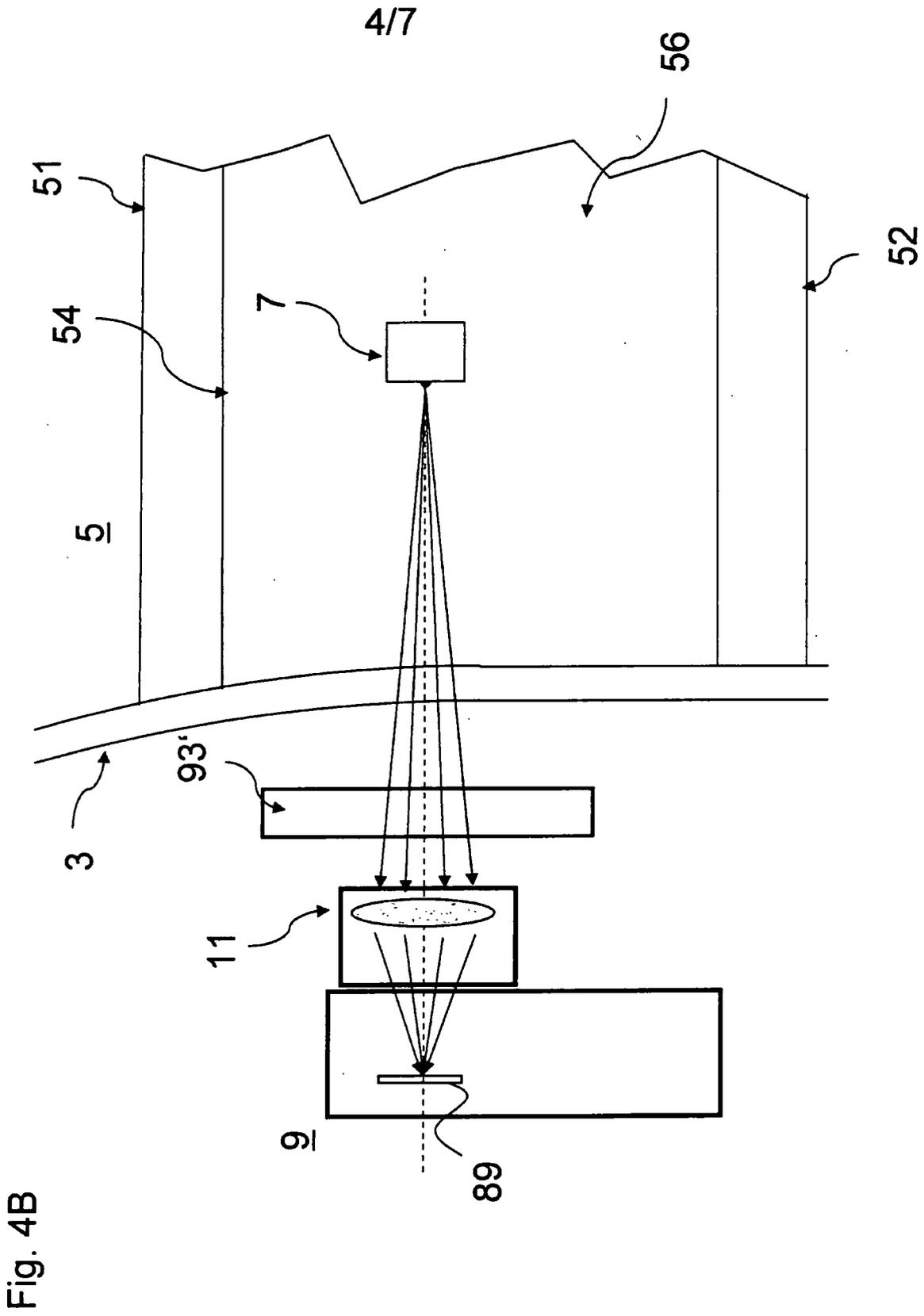


Fig. 4B

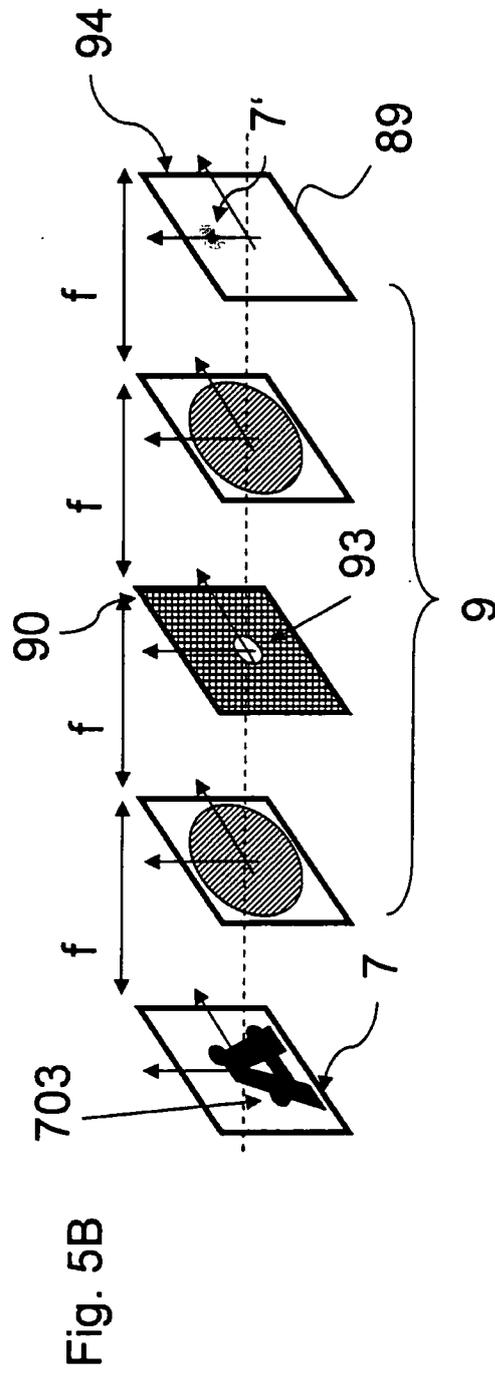
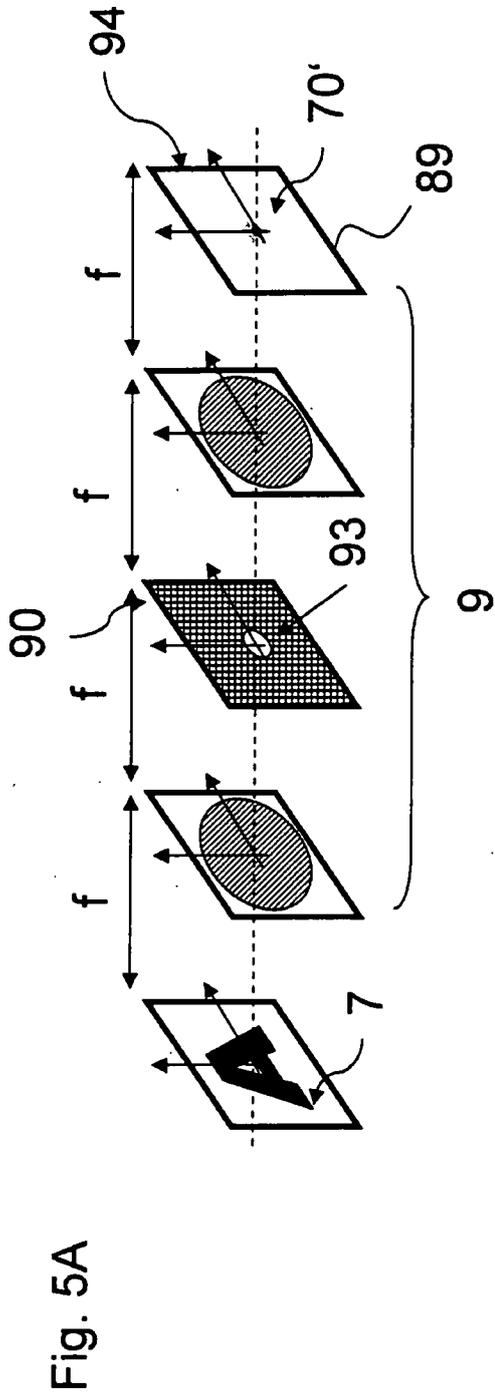
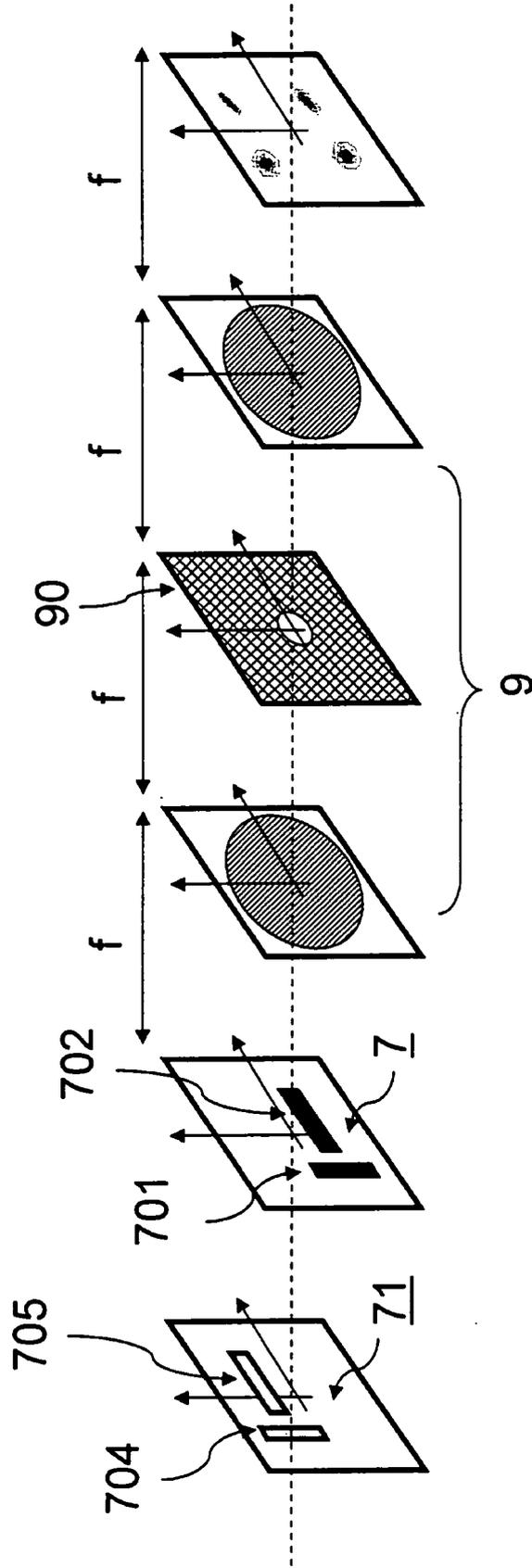


Fig. 7



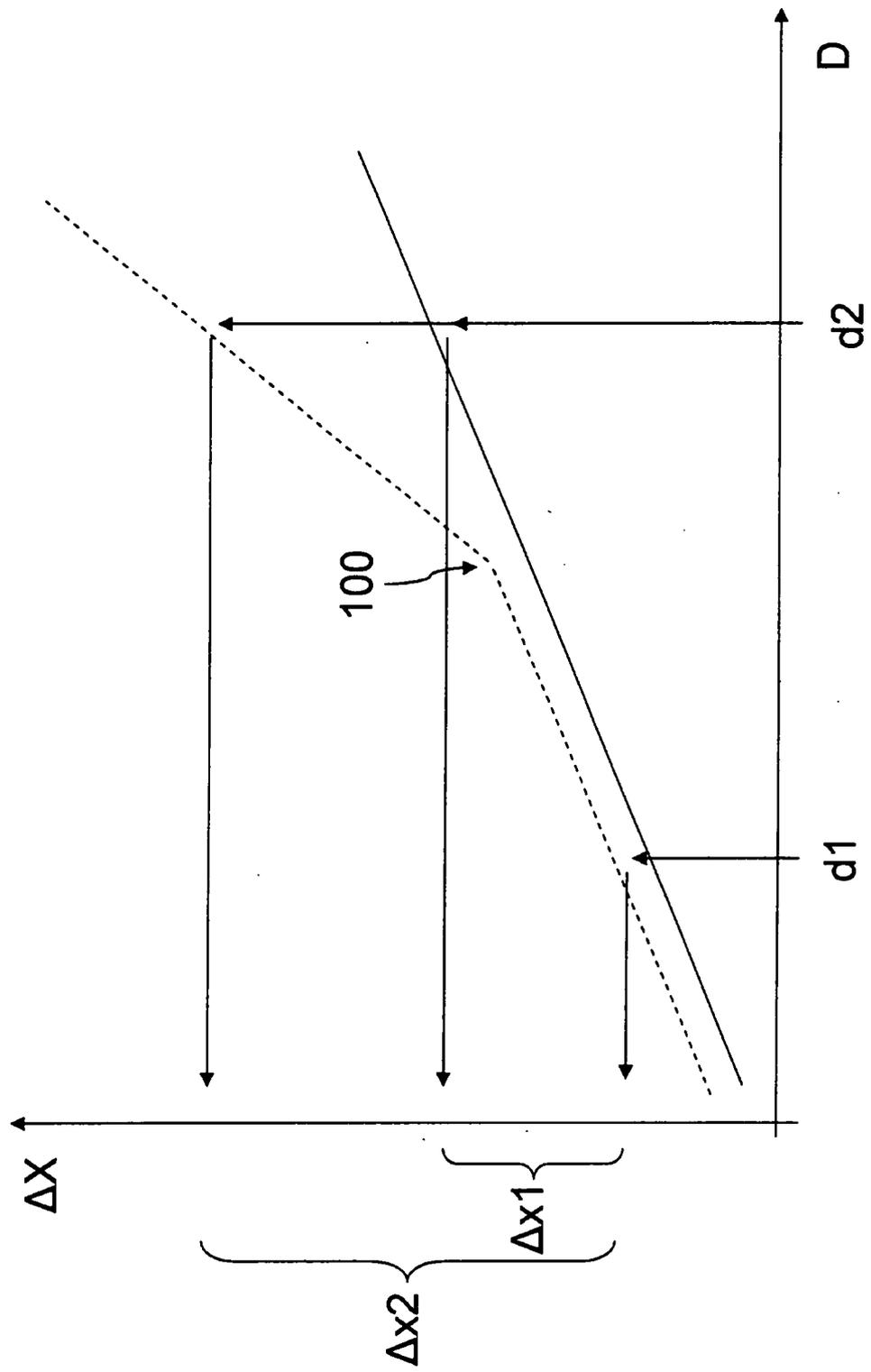


Fig. 8