



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 053 317.6**

(22) Anmeldetag: **06.09.2011**

(43) Offenlegungstag: **07.03.2013**

(51) Int Cl.: **F03D 7/02 (2011.01)**
G01C 9/00 (2011.01)

(71) Anmelder:
**GL Garrad Hassan Deutschland GmbH, 25709,
Kaiser-Wilhelm-Koog, DE**

(72) Erfinder:
Heining, Nils, 25421, Pinneberg, DE

(74) Vertreter:
**Vonnemann, Kloiber & Kollegen, 20099, Hamburg,
DE**

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

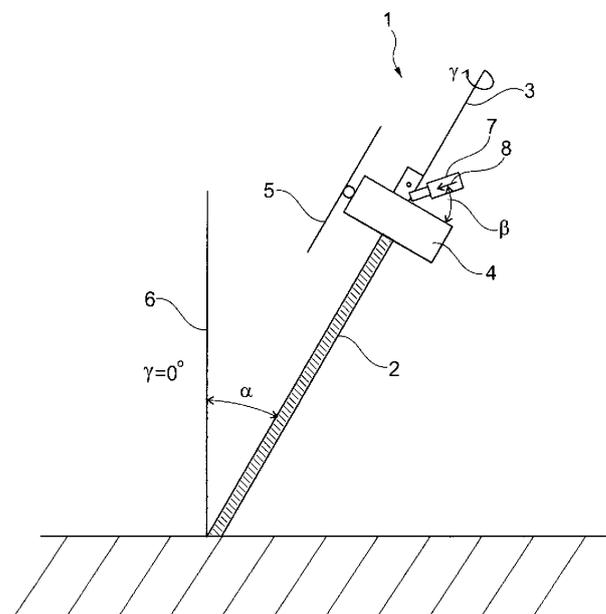
US 2011 / 0 140 420 A1
EP 2 133 563 A1

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen der Neigung eines Turmes**

(57) Zusammenfassung: Um ein Verfahren zum Bestimmen der Neigung eines Turmes (2), insbesondere einer Windenergieanlage (1), im Verhältnis zum Schwerfeld mittels Auswertung des Ausgangssignals eines zur Aufnahme einer statischen Beschleunigung in Richtung einer Sensor-Messachse ausgebildeten Beschleunigungssensors (7), anzugeben, welches einfach anwendbar ist und an beliebigen Windenergieanlagen zum Beispiel durch Messpersonal mit einer mobilen Messeinrichtung beispielsweise im Rahmen von regelmäßigen Untersuchungen durchgeführt werden kann, wird vorgeschlagen, dass der Beschleunigungssensor (7) an einem um die Längsachse (3) des Turms (2) in einem Azimutwinkelbereich von mindestens 180°, vorzugsweise von 360°, drehbaren Bauteil (4), vorzugsweise einem Hauptrahmen, derart befestigt ist, dass die Sensor-Messachse (8) im wesentlichen parallel zur Drehebene des Bauteils (4) orientiert ist, wobei das Ausgangssignal nacheinander bei verschiedenen Azimutwinkeln gemessen und aufgezeichnet wird, indem das Bauteil (4) zwischen Messungen gedreht wird, wobei die Neigung durch Auswertung der so erhaltenen Messreihe bestimmt wird.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen der Neigung eines Turms, insbesondere einer Windenergieanlage, im Verhältnis zum Schwerfeld mittels Auswertung des Ausgangssignals eines zur Aufnahme einer statischen Beschleunigung in Richtung einer Sensor-Messachse ausgebildeten Beschleunigungssensors.

[0002] Speziell im Bereich der Bauten von Windenergieanlagen im Offshore-Bereich stellt sich das Problem der Verlagerung der Gründungen. Durch die ausgeprägte Schwingfähigkeit der langgestreckten Windenergieanlagen wird die Problematik der Verlagerung bei diesen noch verschärft. Um derartige unerwünschte Verlagerungen, die bei Windenergieanlagen verschiedenste unerwünschte Auswirkungen haben könnten, wie zum Beispiel ungleichmäßige Belastung von Lagern, festzustellen, besteht daher der Bedarf an gattungsgemäßen Verfahren zum Bestimmen der Neigung.

[0003] Die Messung ist schwierig, da die Windenergieanlage häufig bei der Durchführung der Messung in Schwingbewegungen stehen kann, welche Beschleunigungen verbunden ist, die das Messsignal eines Beschleunigungssensors mit einer Amplitude beeinflussen, welche jene des durch die Lagerung hervorgerufenen Messsignals deutlich übersteigt.

[0004] In der EP 2 133 563 A1 ist ein solches Verfahren offenbart, wobei in Folge einer mehrere Schritte umfassenden Signalauswertung basierend auf Messwerten eines Beschleunigungssensors in der Gondel der Windenergieanlage die Beschleunigung, Geschwindigkeit, Stellung sowie Neigung der Gondel bestimmt werden.

[0005] Eine andere in der Praxis eingesetzte Methode zur Bestimmung der Neigung von Windenergieanlagen basiert darauf, dass Libellen einer Wasserwaage über eine Videokamera ausgelesen werden. Diese Methode ist messtechnisch in jeder Hinsicht unbefriedigend. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die zu messende Neigung so gering sein kann, dass Schiefstellungen in Bezug auf die Turmhochachse des für die Messung eingesetzten Beschleunigungssensors das Messergebnis bis zur Unkenntlichkeit verfälschen könnten.

[0006] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Bestimmen der Neigung eines Turmes der eingangs genannten Art anzugeben, welches einfach anwendbar ist und an beliebigen Windenergieanlagen zum Beispiel durch Messpersonal mit einer mobilen Messeinrichtung beispielsweise im Rahmen von regelmäßigen Untersuchungen durchgeführt werden kann.

[0007] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit einem Verfahren zum Bestimmen der Neigung eines Turms der eingangs genannten Art gelöst, bei welchem der Beschleunigungssensor an einem um die Längsachse des Turms in einem Azimutwinkelbereich von mindestens 180°, vorzugsweise von 360°, drehbaren Bauteil, vorzugsweise einem Hauptrahmen, derart befestigt ist, dass die Sensor-Messachse im wesentlichen parallel zur Drehebene des Bauteils orientiert ist, wobei das Ausgangssignal nacheinander bei verschiedenen Azimutwinkeln gemessen und aufgezeichnet wird, in dem das Bauteil zwischen Messungen gedreht wird, wobei die Neigung durch Auswertung der so erhaltenen Messreihe bestimmt wird. Erfindungsgemäß kann beispielsweise ein Beschleunigungssensor eingesetzt werden, welcher aus anderen Gründen, in der Regel zu Zwecken der Schwingungsmessung der Windenergieanlage, bereits vorhanden ist. Die Aufzeichnung des Ausgangssignals bei verschiedenen Azimutwinkeln der Gondel hat gegenüber bekannten Verfahren zur Neigungsmessung unter Einsatz von Beschleunigungssensoren den Vorteil, dass eine Vielzahl von mit dem gesuchten Messwert im funktionalen Zusammenhang stehenden Datenpunkten erhalten werden kann, welche eine gute statistische Mittelung der Messwerte ermöglichen. Dies ist aufgrund der eingangs erwähnten Schwingungen, unter dem das Messobjekt in der Regel stehen wird, vom großen Vorteil. Im Rahmen der Erfindung geeignete Beschleunigungssensoren kommen alle bekannten Beschleunigungssensoren in Frage, welche auch konstante Beschleunigungen messen können, um die Erdbeschleunigung und deren Richtung erfassen zu können. Beispielsweise können im einfachsten Fall Geräte mit einer verschiebbaren Prüfmassse verwendet werden. Aber auch Systeme basierend auf biegsamen Quarzstäben oder magnetisch stabilisierten Massen kommen in Frage schließlich sind mikroelektromechanische Systeme (MIMS) für die Neigung gemessen. In jedem Falle kommt es darauf an, dass die Geräte die Beschleunigung entlang nur einer Messachse ausgeben. Insbesondere kann der Beschleunigungssensor im Rahmen der Erfindung um die Turmachse drehbaren Maschinenhauses angebracht sein. Die Messreihe wird idealer Weise für verschiedene Azimutwerte in einem Bereich von 360° entsprechen einer vollständigen Umdrehung des Bauteils durchgeführt. Dies hat insbesondere den Vorteil, dass bei Erreichen einer 180° Stellung bezüglich des Azimutwinkels das Messsignal verdoppelt werden kann. Wenn eine volle 360° Umdrehung durchgeführt werden kann, erhält man aus Symmetriegründen eine redundante Messreihe zu der Messung bei dem Winkelbereich 0° bis 180°, welche zur weiteren statistischen Verbesserung der Messwerte führt.

[0008] Das Bauteil kann in gleichmäßigen Azimutwinkelschritten gedreht werden, um die Auswertung

der Messreihe zwecks Bestimmung der Neigung zu erleichtern. Beispielsweise können Messungen in 10° Schritten bezüglich des Azimutwinkels durchgeführt werden, um eine Messreihe umfassend 36 Werte zu erhalten.

[0009] Die statistische Eliminierung von durch Schwingungen des Turms hervorgerufenen Messfehlern wird begünstigt, wenn zu jedem gegebenen Azimutwinkel nacheinander eine Reihe von Ausgangssignalen gemessen und aufgezeichnet wird und anschließend aus der Reihe von Ausgangssignalen ein gemittelter Wert bestimmt und aufgezeichnet und der Messreihe zugrundegelegt wird. Beispielsweise kann bei jeder gegebenen Azimutwinkelposition, zu welcher eine Messung vorgenommen werden soll, über drei Minuten mit einer hohen Abtastrate gemessen werden. Bei der Mittelung heben sich dann zeitabhängige Anteile der Beschleunigungsmesswerte zum großen Teil heraus.

[0010] In Ausbildung der Erfindung kann bei dem Verfahren die Auswertung die Bestimmung eines Maximalwertes und eines Minimalwertes der Messreihe sowie der Bestimmung der Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum umfassen. Dabei wird ein maximaler Wert des Beschleunigungssignals zu erwarten sein, wenn ein Beschleunigungssensor mit dessen Messachse so ausgerichtet ist, dass eine maximale Richtungskomponente vertikal ausgerichtet ist. Der zugehörige Minimalwert wird dem entsprechenden Messwert der Reihe für einen Azimutwinkel um 180° verschoben entsprechen.

[0011] Insbesondere kann erfindungsgemäß die Neigung anhand folgender Formel berechnet werden:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2} \frac{a_{\max} - a_{\min}}{g} \right],$$

wobei α der Neigungswinkel, g die Erdbeschleunigung, a_{\max} den Maximalwert der Messreihe und a_{\min} den Minimalwert der Messreihe bezeichnen. Geometrische Überlegungen, die weiter unten im Zusammenhang mit den Figuren im Einzelnen erläutert sind, zeigen, dass der gesuchte Neigungswinkel des Turmes gegenüber der Lotrichtung mit dieser Formel zu bestimmen ist, wenn Werte an einer maximalen und minimalen Beschleunigung bei einer Messreihe, welche für Messpunkte, die zu einer vollständigen Drehung des drehbaren Bauteils um einen Azimutwinkelbereich von 0° bis 360° gehören, ausgewertet werden. Dabei entspricht der Maximalwert einer Azimutstellung des drehbaren Bauteils, bei welcher die vertikale Komponente der Sensor-Messachse parallel zur Vertikalen nach unten ausgerichtet ist. Demgegenüber entspricht der Minimalwert einem Azimutwinkelwert des Bauteils, bei welchem die Vertikalkompo-

nente der Sensor-Messachse maximal vertikal nach oben, also der Schwerkraft entgegen gerichtet, ausgerichtet ist.

[0012] Das Verfahren wird wesentlich verbessert, wenn die Neigung anhand folgender Formel berechnet wird:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2} \frac{a_{\max} - a_{\min}}{g \cdot \cos(\beta)} \right],$$

wobei β die Schiefstellung der Sensor-Messachse gegenüber der Drehebene bezeichnet. Eine Berücksichtigung einer etwaigen Schiefstellung der Sensor-Messachse gegenüber der Drehebene des Bauteils wird, wie geometrische Überlegungen, die im Zusammenhang mit der Figurenbeschreibung erläutert sind, durch diesen funktionalen Zusammenhang berücksichtigt. Wenn somit erfindungsgemäß der Schiefstellungswinkel β bekannt ist, lässt sich dessen Einfluss bei der Auswertung der Messreihe exakt berechnen, um den Neigungswinkel α zu ermitteln.

[0013] In bevorzugter Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Schiefstellung der Sensor-Messachse gegenüber der Drehebene aus der Messreihe bestimmt, vorzugsweise in dem man Offset eines variablen Anteils der Messreihe bestimmt wird, und wird bei der Bestimmung der Neigung berücksichtigt. Geometrische Betrachtungen, die weiter unten im Zusammenhang mit den Figuren näher erläutert sind, zeigen, dass eine Schiefstellung der Sensor-Messachse gegenüber der Drehebene des Bauteils dazu führt, dass ein mit dem Azimutwinkel variierender Teil bei einer nicht verschwindenden Schiefstellung β der Sensor-Messachse gegenüber der Drehebene gegenüber dem Nullpunkt in Form eines Offset verschoben wird. Die Bestimmung des Offsets aus der Messreihe ist mit üblicher Signalverarbeitung unter Verwendung üblicher, für sich genommen wohlbekannter Methoden zur Kurvendiskussion ohne weiteres möglich.

[0014] Insbesondere kann erfindungsgemäß das Offset bestimmt werden, indem die Summe aus dem Maximalwert und dem Minimalwert gebildet und durch zwei geteilt wird. Für den Fall einer bei der Drehung aus geometrischen Gründen zu erwartenden sinusoidalen Variation des Messsignals in Abhängigkeit des Azimutwinkels ist der mit dem Azimutwinkel variable Anteil bei verschwindendem Schiefstellungswinkel β symmetrisch um die horizontale Achse, so dass die Summe aus Maximalwert und Minimalwert null ergibt.

[0015] In bevorzugter Ausgestaltung des Verfahrens nach der Erfindung für die Schiefstellung aus dem Offset anhand folgender Formel berechnet:

$$\beta = \arcsin \left[\frac{\alpha_0}{g} \right],$$

wobei β die Schiefstellung, g die Erdbeschleunigung und α_0 das Offset des variablen Anteils der Messreihe bezeichnen. Der Offset kann aus geometrischen Überlegungen zu dem erfindungsgemäßen Messverfahren, die mit Bezug auf die Figuren weiter unten im Einzelnen näher beschrieben sind, der Offset-Wert der gemessenen Beschleunigung mit dem Wert identifiziert werden, den man erhält, wenn der Azimutwinkel so eingestellt ist, dass die Sensor-Messachse so ausgerichtet ist, dass für verschwindende Schiefstellung keine Neigung in vertikaler Richtung der Sensor-Messachse vorläge.

[0016] Zur Erhöhung des Vertrauensbereichs des erfindungsgemäßen Messverfahrens kann ein zweiter Beschleunigungssensor derart an dem Bauteil befestigt sein, dass die Sensor-Messachse im wesentlichen parallel zur Drehebene des Bauteils und rechtwinklig zur Sensor-Messachse des ersten Beschleunigungssensor orientiert ist, wobei das Ausgangssignal des zweiten Beschleunigungssensor neben dem Ausgangssignal des ersten Beschleunigungssensors gemessen und aufgezeichnet wird, wobei die Neigung zusätzlich durch Ausgestaltung der so erhaltenen zweiten Messreihe bestimmt wird. Aus Geometrieüberlegungen zu dem Messverfahren ergibt sich, dass die Messreihe, welche mit dem zweiten Beschleunigungssensor der ersten Messreihe, verschoben um 90° hinsichtlich des Azimutwinkels, entspricht. Die Auswertung der Messreihe des zweiten Beschleunigungssensors, welcher erfindungsgemäß zu dem ersten Beschleunigungssensor gekreuzt ist, liefert somit eine Redundanz, welche in Vorteil zur statistischen Mittelung der erhaltenen Neigungswerte herangezogen werden kann. Zudem sind viele Windenergieanlagen bereits mit gekreuzten Beschleunigungssensoren oder integrierten Zweiachsbeschleunigungssensoren versehen. Das erfindungsgemäße Verfahren kann mit Vorteil daher bei derartigen Windenergieanlagen durchgeführt werden, indem bei der Drehung des Maschinenhauses die Ausgangssignale dieser beiden Beschleunigungssensoren auszuwerten sind. Hinsichtlich der Überlegungen zu einer Schiefstellung des zweiten Beschleunigungssensors gegenüber der Drehebene gelten die analogen Überlegungen und erfindungsgemäßen Verfahren zu deren Ermittlung aus der Messreihe, wie die oben ausgeführten Überlegungen zum ersten Beschleunigungssensor.

[0017] Eine weitere Verbesserung des erfindungsgemäßen Verfahrens erhält man, wenn ein weiterer Beschleunigungssensor an dem Bauteil derart befestigt ist, dass die Sensor-Messachse im wesentlichen senkrecht zur Drehebene des Bauteils orientiert ist, wobei das Ausgangssignal des weiteren Beschleuni-

gungssensors neben dem Ausgangssignal des ersten Beschleunigungssensors gemessen und aufgezeichnet wird, wobei die Neigung zusätzlich Auswertung der so erhaltenen weiteren Messreihe bestimmt wird. Erfindungsgemäß ist dieser weitere Beschleunigungssensor senkrecht zu dem ersten Beschleunigungssensor und auch senkrecht zu einem etwaig eingesetzten zweiten Beschleunigungssensor ausgerichtet. Das Ausgangssignal dieses weiteren Beschleunigungssensors wird aus gemischten Überlegungen theoretisch invariant gegenüber Variation des Azimutwinkels sein und vermag daher als Referenz für die Messreihen der anderen Beschleunigungssensoren zu dienen. Insbesondere kann der senkrechte Beschleunigungssensor eingesetzt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen, wenn eine große Querempfindlichkeit der Sensoren vorhanden ist, um den Einfluss der Querempfindlichkeit zu verringern. Mit Querempfindlichkeit ist zu verstehen, dass ein Beschleunigungssensor auch von Beschleunigungen, welche im rechten Winkel zur Sensor-Messachse auftreten, empfindlich ist.

[0018] Schließlich kann in vorteilhafter Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zu dem Ausgangssignal der Azimutwinkel bestimmt und die Messreihe, die zweite Messreihe und/oder die weitere Messreihe durch Aufzeichnung des jedem Ausgangssignals zugeordneten Azimutwinkels zu einem aus geordneten Paaren bestehenden Funktionsgraphen ergänzt werden, um eine Richtung der Neigung zu ermitteln. Wohingegen es somit für das Grundprinzip des erfindungsgemäßen Verfahrens nicht erforderlich ist, Absolutwerte des Azimutwinkels aufzuzeichnen, da lediglich Maximal- und Minimalwerte sowie Offsets für die Auswertung herangezogen werden, kann eine Bestimmung des Azimutwinkels absolut zur Charakterisierung der Ausrichtung der Sensor-Messachse verwendet werden. Dies ermöglicht unter anderem die Feststellung einer Neigungsrichtung.

[0019] Schließlich wird dieser Erfindung zugrundeliegende Aufgabe gelöst durch eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach der Erfindung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12. Die Vorrichtung umfasst eine Auswerteeinheit sowie Mittel zum Auslesen von Ausgangssignalen der Beschleunigungssensoren, welche entweder bereits Bestandteil der auszumessenden Windenergieanlage sind oder welche als Bestandteil der erfindungsgemäßen Vorrichtung an die auszumessene Windenergieanlage anzuschließen sind. Die Auswerteeinheit ist zur Durchführung der in den Verfahrensansprüchen erläuterten Auswertungen ausgestaltet.

[0020] Die Erfindung wird in einer bevorzugten Ausführungsform unter Bezugnahme auf eine Zeichnung beispielhaft beschrieben, wobei weitere vorteilhafte Einzelheiten den Figuren der Zeichnung zu entnehmen sind.

[0021] Funktionsmäßig gleiche Teile sind dabei mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0022] Die Figuren der Zeichnung zeigen im Einzelnen:

[0023] **Fig. 1**: schematische Seitenansicht einer geneigten Windenergieanlage, bei welcher das Maschinenhaus in einer Azimutwinkelstellung von 0° orientiert ist;

[0024] **Fig. 2**: Darstellung wie **Fig. 1**, wobei jedoch das Maschinenhaus in einer Azimutwinkelstellung von 180° gedreht ist;

[0025] **Fig. 3**: Darstellung wie **Fig. 1** und **Fig. 2**, jedoch mit einer Azimutwinkelstellung von 90° des Maschinenhauses;

[0026] **Fig. 4**: Darstellung wie **Fig. 1**, **Fig. 2**, **Fig. 3**, jedoch mit Azimutwinkel von 270° ;

[0027] **Fig. 5**: beispielhafte Darstellung des Graphen einer Messreihe für einen Beschleunigungssensor ohne Schiefstellung relativ zur Hochachse des Azimutlagers.

[0028] **Fig. 1** zeigt in einer Seitenansicht eine Windenergieanlage **1** mit einem Turm **2**, einem am oberen Ende des Turms **2** um die Längsachse **3** des Turms **2** unterschiedliche Azimutwinkel γ rotierbaren Maschinenhaus **4**. Zur Orientierung ist an dem Maschinenhaus **4** schematisch ein Rotor **5** angedeutet. Der Turm **2** ist mit seiner Längsachse **3** gegenüber der Vertikalen **6** und damit gegenüber der Richtung, in welche die Schwerkraft wirkt, um einen Winkel α geneigt ausgerichtet. An dem Maschinenhaus **4** ist ein Beschleunigungssensor **7** angebracht, dessen Messachse **8** durch einen Pfeil angedeutet ist. Die Messachse **8** ist gegenüber der durch die Oberkante des Maschinenhauses **4** angedeuteten Drehebene des Maschinenhauses **4** um einen Schiefwegwinkel β geneigt angeordnet.

[0029] **Fig. 2** zeigt denselben Darstellungskonventionen wie **Fig. 1** die Windenergieanlage. Abweichend zu der in **Fig. 1** gezeigten Situation ist jedoch das Maschinenhaus **4** um die Längsachse **3** des Turms **2** gegenüber der in **Fig. 1** gezeigten Stellung um 180° gedreht. Dies ist dadurch zu erkennen, dass der Rotor **5** in der Seitenansicht rechts am Maschinenhaus **4** gezeigt ist. Es ist zu erkennen, dass der Beschleunigungssensor **7** und dessen Beschleunigungssensor-Messachse **8** gegenüber der Vertikalen **6** einen anderen Winkel einnimmt als bei der in **Fig. 1** gezeigten Stellung. Bei diesem Ausführungsbeispiel wird davon ausgegangen, wie bei Windenergieanlagen üblich, das Maschinenhaus **4** um die Längsachse **3** des Turms **2** drehbar ist, so dass die Drehebene senkrecht auf der Längsachse

3 des Turms **2** steht. Das erfindungsgemäße Verfahren kann mit entsprechenden Anpassungen an die Signalauswertung jedoch auch für Fälle angewendet, in welcher die Drehachse des Maschinenhauses **4** nicht mit der Längsachse **3** des Turms **2** zusammenfällt. In **Fig. 3** ist schließlich mit denselben Darstellungskonventionen wie in **Fig. 1** und **Fig. 2** die Windenergieanlage **1** gemäß den **Fig. 1** und **Fig. 2** gezeigt. Dabei ist abweichend zu den **Fig. 1** und **Fig. 2** das Maschinenhaus **4** gegenüber **Fig. 1** um 90° um die Längsachse **3** des Turms **2** rotiert. Dies ist dadurch ersichtlich, dass der Rotor **5** schematisch unterhalb der Zeichenebene dargestellt ist. Die Orientierung der Beschleunigungssensor-Messachse **8** des Beschleunigungssensors **7** ist in dieser Stellung rechtwinklig in die Zeichenebene hinein, wie durch ein Kreuz angedeutet. Die Beschleunigungssensor-Messachse **8** hat bei der in **Fig. 3** gezeigten Azimutwinkelstellung von $\beta = 90^\circ$ keine Komponente parallel zur Zeichenebene.

[0030] In **Fig. 4** ist schließlich die Windenergieanlage **1** gemäß den **Fig. 1**, **Fig. 2**, **Fig. 3** gezeigt in einer Azimutwinkelstellung von 280° . Diese Azimutwinkelstellung ist schematisch verdeutlicht dadurch, dass der Rotor **5** nunmehr in Bezug auf die Zeichenebene über dem Maschinenhaus **4** steht. Entsprechend zeigt die Beschleunigungssensor-Messachse **8** des Beschleunigungssensors **7** in dieser Stellung aus der Zeichenebene heraus, wie durch einen Punkt angedeutet.

[0031] Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird das Maschinenhaus **4** und damit der daran befestigte Beschleunigungssensor **7** in gleichmäßigen Inkrementen ausgehend von der Azimutwinkelstellung $\gamma = 0^\circ$ gemäß **Fig. 1** über die Azimutwinkelstellungen von 90° gemäß **Fig. 3**, von 180° gemäß **Fig. 2** sowie 270° gemäß **Fig. 4** zurück in die Ausgangsstellung gemäß **Fig. 1** gedreht. Zu jeder Stellung des Azimutwinkels γ wird das Ausgangssignal des Beschleunigungssensors **7** aufgenommen. Um zeitlich variable Komponenten des Ausgangssignals möglichst gut zu eliminieren, wird die Messung für ein Zeitintervall von beispielsweise 3 Minuten mit einer verhältnismäßig hohen Abtastrate durchgeführt. Anschließend wird ein gemittelter Wert aus der Zeitreihe bestimmt und als mit dem jeweiligen Azimutwinkel assoziierter Messwert einer Messreihe aufgefangen.

[0032] **Fig. 5** zeigt eine graphische Darstellung in idealisierter Weise zweier mit dem beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren gewonnenen Messreihen. Die vertikale Achse gibt dabei die ermittelten – zeitlich gemittelten – Beschleunigungswerte α in Einheiten von der Erdbeschleunigung g an. Die horizontale Achse gibt hingegen die Winkelwerte des Azimutwinkels γ , also den Drehwinkel des Maschinenhauses **4** um die Längsachse **3** des Turms **2** der Wind-

energieanlage 1, an. Dabei ist es für das Verfahren grundsätzlich nicht unbedingt erforderlich, dass auf der horizontalen Achse Winkelwerte für γ aufgetragen werden. Vielmehr genügt es, wenn sichergestellt ist, dass die Messreihen in gleichmäßigen Inkrementen des Azimutwinkels γ aufgetragen sind.

[0033] Die untere, mit Diamanten gekennzeichnete Messreihe der Fig. 5 zeigt eine Kurve von idealisierten Messreihen, welche man erhalten würde, wenn der Winkel β der Schiefelage der BeschleunigungsSensor-Messachse 8 gegenüber der Drehebene des Maschinenhauses 4 null beträgt, so dass keine Schiefelage vorliegt. In diesem Fall erkennt man, dass sich ein um die Nulllinie symmetrischer Verlauf des Funktionsgraphen ergibt. Zur Auswertung der Messreihe kann nun erfindungsgemäß eine Bestimmung eines Maximalwertes 9 sowie eines Minimalwertes 10 vorgenommen werden. Anschließend kann die Differenz 11 zwischen dem Maximalwert 9 und dem Minimalwert 10 bestimmt werden. Aus dieser Differenz lässt sich anhand der Formel

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2} \frac{a_{\max} - a_{\min}}{g} \right]$$

der gesuchte Neigungswinkel α bestimmen.

[0034] Wenn man nun die obere, durch Quadrate gekennzeichnete Messreihe in Fig. 5, die eine idealisierte Messreihe für einen Beschleunigungssensor, dessen Sensorachse in einem nichtverschwindenden Winkel β zur Drehebene orientiert ist, ergibt sich folgendes. Bei der Auswertung wird wiederum ein Maximalwert 12 sowie ein Minimalwert 13 ermittelt. Zusätzlich wird jedoch ein Offset 14 der Messreihe gegenüber der Nulllinie ermittelt. Der Offset gibt die Verschiebung des mit γ variablen Anteils des Messsignals gegenüber der Nulllinie an. Zur Auswertung der oberen Messreihe gemäß Fig. 5 wird nun anhand der Formel

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2} \frac{a_{\max} - a_{\min}}{g \cdot \cos(\beta)} \right]$$

der gesuchte Neigungswinkel α bestimmt. Dabei wird zuvor anhand des Offset-Wertes 14 anhand folgender Formel

$$\beta = \arcsin \left[\frac{a_0}{g} \right]$$

der Winkel β bestimmt, der in die zuvor genannte Formel einfließt.

[0035] Hintergrund ist, dass geometrische Überlegungen basierend auf den prinzipiellen geometrischen Gegebenheiten gemäß den Fig. 1 bis Fig. 4

zeigen, dass die gemessenen Beschleunigungswerte in folgendem funktionalen Zusammenhang mit dem Neigungswinkel α und der Schiefelage des Messensors angebenen Winkel β aufweisen $a_{\text{sensor}} = g \cdot \sin(\beta + \alpha \cos \gamma)$. Sowohl anhand der Formel als auch anhand der Fig. 1 bis Fig. 4 ist ersichtlich, dass die Maximalwerte 9 bzw. 12 für $\gamma = 0$ bzw. $\gamma = 360^\circ$, wie in Fig. 1 gezeigt, erhalten werden, bei welcher die Schiefelage β des Sensors 7 zu einer Überhöhung des gemessenen Beschleunigungswertes führt. Gleichermaßen sind die Minimalwerte 10 bzw. 13 mit der in Fig. 2 veranschaulichten Azimutlage von 180° assoziiert. Zum Verständnis ist stets zu beachten, dass der Beschleunigungssensor 7 stets nur die Komponente der Beschleunigung misst, welche in Richtung der BeschleunigungsSensor-Messachse 8 ausgerichtet ist. Bezug nehmend auf die Fig. 3 und Fig. 4 lässt sich die Bestimmung und Bedeutung des Offsets 14 veranschaulichen. Bei den Azimutstellungen von 90° bzw. 270° trägt der Neigungswinkel α keine Beschleunigungskomponente in Richtung der BeschleunigungsSensor-Messachse 8 bei. Dementsprechend rührt ein von null verschiedener Beschleunigungssensorwert bei diesen Stellungen des Azimutwinkels ausschließlich von einer Schiefelage um den Winkel β her.

[0036] Dabei beruht die Auswertung der Messreihen, wie mit Bezug auf Fig. 5 veranschaulicht, nicht auf einer genauen Kenntnis des Absolutwertes des Azimutwinkels γ , da ausschließlich Maximalwerte 9, 12 bzw. Minimalwerte 10, 13 ausgewertet werden müssen, unabhängig von deren Lage auf der horizontalen Achse. Der Offset 14 im einfachsten Falle bestimmt werden, indem durch Subtrahieren des Minimalwertes 13 vom Maximalwert 12 und anschließenden Subtrahieren der Hälfte dieser Differenz von dem Maximalwert 12.

[0037] Es versteht sich, dass die hier vorgestellte Beschreibung von idealisierten Verhältnissen ausgeht. In der Praxis wird zunächst eine geeignete Signalglättung mit dem Fachmann wohlbekannten Verfahren erforderlich sein.

[0038] In Fig. 5 nicht dargestellt, jedoch anhand dieser Figur leicht ersichtlich, würde die Hinzufügung eines zweiten Beschleunigungssensors, welcher ebenfalls im wesentlichen in der Drehebene des Maschinenhauses 4, jedoch um 90° zu dem Beschleunigungssensor 7 gedreht, zu entsprechenden Kurven führen, welche jedoch horizontal um 90° verschoben wären. Die Auswertung eines derartigen zweiten Beschleunigungssensors könnte in analoger Weise erfolgen, wobei ein ggf. von der Schiefelage des ersten Beschleunigungssensors unterschiedlicher Schiefelagewinkel in analoger Weise zu berücksichtigen wäre. Zur Überprüfung von Effekten durch etwaige Querempfindlichkeiten der Beschleunigungssensoren kann ein weiterer Beschleunigungssensor ver-

wendet werden, welcher in Richtung der Längsachse **3** des Maschinenhauses **4** und damit senkrecht zur Drehebene montiert ist.

[0039] Somit ist erfindungsgemäß ein Verfahren zur Messung einer Neigung eines Turms, insbesondere einer Windenergieanlage, im Verhältnis zum Schwerfeld mittels Auswertung des Ausgangssignals eines zur Aufnahme einer statischen Beschleunigung in Richtung einer Sensor-Messachse ausgebildeten Beschleunigungssensors angegeben, welches einfach anzuwenden ist, da es auf keine besondere Präzision bei der Anbringung der Beschleunigungssensoren bedarf. Die Drehung des Maschinenhauses **4** um die Längsachse **3** des Turms **2** ist bei allen üblichen Windenergieanlagen **1** vorgesehen, um eine optimale Ausrichtung zum Wind zu ermöglichen. Somit kann das erfindungsgemäße Messverfahren mit Vorteil ohne Modifikationen der Windenergieanlage durchgeführt werden. Da, wie eingangs bereits erwähnt, die meisten Windenergieanlagen ohnehin bereits mit einem Beschleunigungssensor **7**, möglicherweise sogar mit mehreren Beschleunigungssensoren, versehen sind, kann in vielen Fällen sogar die Installation eines Beschleunigungssensors zur Durchführung der Messung entfallen. Stattdessen muss lediglich das Signal der Bordeigenen Beschleunigungssensoren abgegriffen werden.

Bezugszeichenliste

- 1** Windenergieanlage
- 2** Turm
- 3** Längsachse
- 4** Maschinenhaus
- 5** Rotor
- 6** Vertikale
- 7** Beschleunigungssensor
- 8** Beschleunigungssensor-Messachse
- 9** Maximalwert, keine Schiefelage
- 10** Minimalwert, keine Schiefelage
- 11** Differenz, keine Schiefelage
- 12** Maximalwert, Schiefelage
- 13** Minimalwert, Schiefelage
- 14** Offset

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 2133563 A1 [[0004](#)]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen der Neigung eines Turmes (2), insbesondere einer Windenergieanlage (1), im Verhältnis zum Schwerfeld mittels Auswertung des Ausgangssignals eines zur Aufnahme einer statischen Beschleunigung in Richtung einer Sensor-Messachse ausgebildeten Beschleunigungssensors (7), **dadurch gekennzeichnet**, dass der Beschleunigungssensor (7) an einem um die Längsachse (3) des Turms (2) in einem Azimutwinkelbereich von mindestens 180°, vorzugsweise von 360°, drehbaren Bauteil (4), vorzugsweise einem Hauptrahmen, derart befestigt ist, dass die Sensor-Messachse (8) im wesentlichen parallel zur Drehebene des Bauteils (4) orientiert ist, wobei das Ausgangssignal nacheinander bei verschiedenen Azimutwinkeln gemessen und aufgezeichnet wird, indem das Bauteil (4) zwischen Messungen gedreht wird, wobei die Neigung durch Auswertung der so erhaltenen Messreihe bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Bauteil (4) in gleichmäßigen Azimutwinkelschritten gedreht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zu jedem gegebenen Azimutwinkel nacheinander eine Reihe von Ausgangssignalen gemessen und aufgezeichnet wird und anschließend aus der Reihe von Ausgangssignalen ein gemittelter Wert bestimmt und aufgezeichnet und der Messreihe zugrundegelegt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswertung die Bestimmung eines Maximalwertes (9, 12) und eines Minimalwertes (10, 13) der Messreihe sowie der Bestimmung der Differenz (11) zwischen dem Maximalwert (9, 12) und dem Minimalwert (10, 13) umfasst.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Neigung anhand folgender Formel berechnet wird:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2} \frac{a_{\max} - a_{\min}}{g} \right],$$

wobei α der Neigungswinkel, g die Erdbeschleunigung, a_{\max} den Maximalwert (9, 12) der Messreihe und a_{\min} den Minimalwert (10, 13) der Messreihe bezeichnen.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Neigung anhand folgender Formel berechnet wird:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{1}{2} \frac{a_{\max} - a_{\min}}{g \cdot \cos(\beta)} \right],$$

wobei β die Schiefstellung der Sensor-Messachse (8) gegenüber der Drehebene bezeichnet.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Schiefstellung der Sensor-Messachse (8) gegenüber der Drehebene aus der Messreihe bestimmt, vorzugsweise indem ein Offset (14) eines variablen Anteils der Messreihe bestimmt wird, und bei der Bestimmung der Neigung berücksichtigt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Offset (14) bestimmt wird, indem die Summe aus dem Maximalwert (9, 12) und dem Minimalwert (10, 13) gebildet und durch zwei geteilt wird und das Ergebnis von dem Maximalwert (9, 12) subtrahiert wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schiefstellung aus dem Offset (14) anhand folgender Formel berechnet wird:

$$\beta = \arcsin \left[\frac{a_0}{g} \right],$$

wobei β die Schiefstellung, g die Erdbeschleunigung und a_0 das Offset (14) des variablen Anteils der Messreihe bezeichnen.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein zweiter Beschleunigungssensor derart an dem Bauteil (4) befestigt ist, dass die Sensor-Messachse im wesentlichen parallel zur Drehebene des Bauteils (4) und rechtwinklig zur Sensor-Messachse des ersten Beschleunigungssensors (7) orientiert ist, wobei das Ausgangssignal des zweiten Beschleunigungssensors neben dem Ausgangssignal des ersten Beschleunigungssensors (7) gemessen und aufgezeichnet wird, wobei die Neigung zusätzlich durch Auswertung der so erhaltenen zweiten Messreihe bestimmt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein weiterer Beschleunigungssensor an dem Bauteil (4) derart befestigt ist, dass die Sensor-Messachse im wesentlichen senkrecht zur Drehebene des Bauteils (4) orientiert ist, wobei das Ausgangssignal des weiteren Beschleunigungssensors neben dem Ausgangssignal des ersten Beschleunigungssensors (7) gemessen und aufgezeichnet wird, wobei die Neigung zusätzlich durch Auswertung der so erhaltenen weiteren Messreihe bestimmt wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zu jedem Ausgangssignal der Azimutwinkel bestimmt und die Messreihe, die zweite Messreihe und/oder die weitere Messreihe durch Aufzeichnung des jedem Ausgangssignal zugeordneten Azimutwinkels zu einem aus geordneten Paaren bestehenden Funktionsgraphen ergänzt wird, um eine Richtung der Neigung zu ermitteln.

13. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 12.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

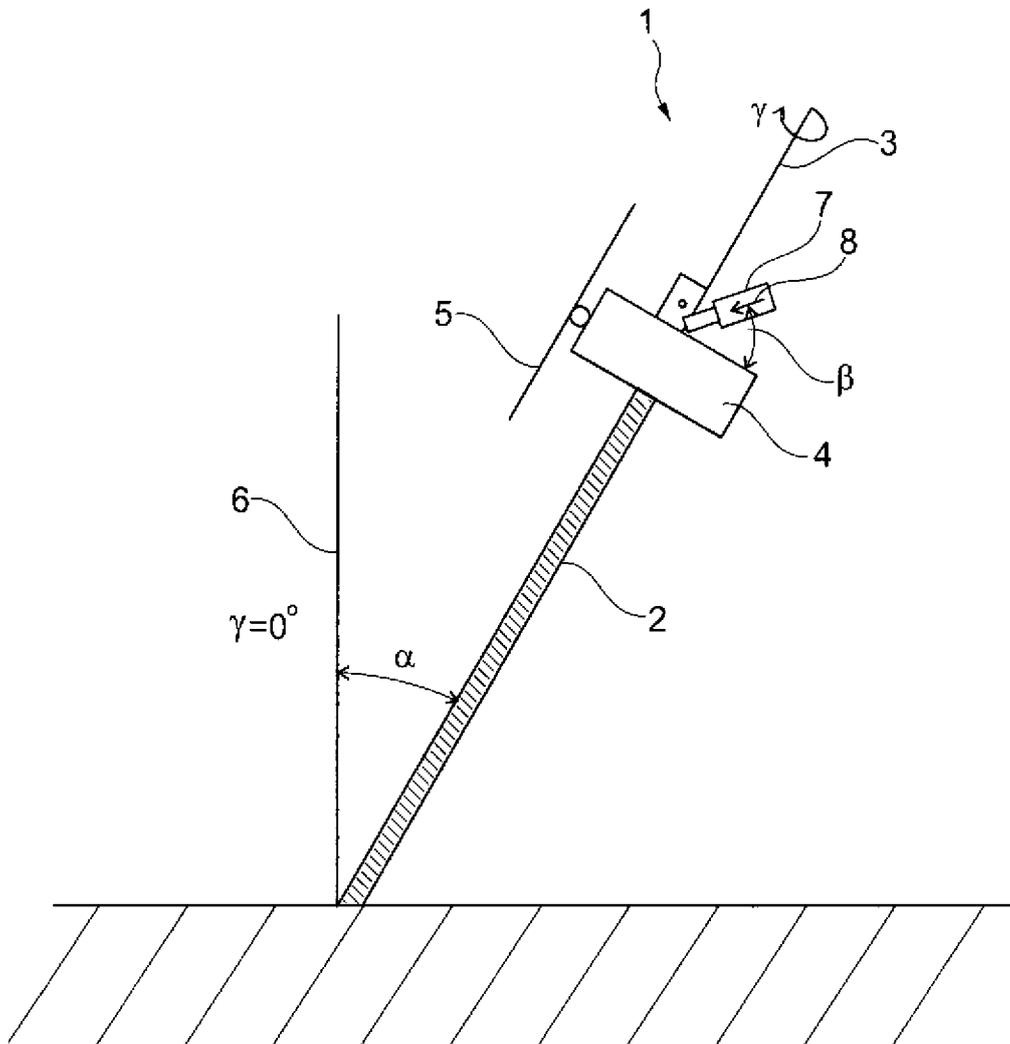


Fig. 1

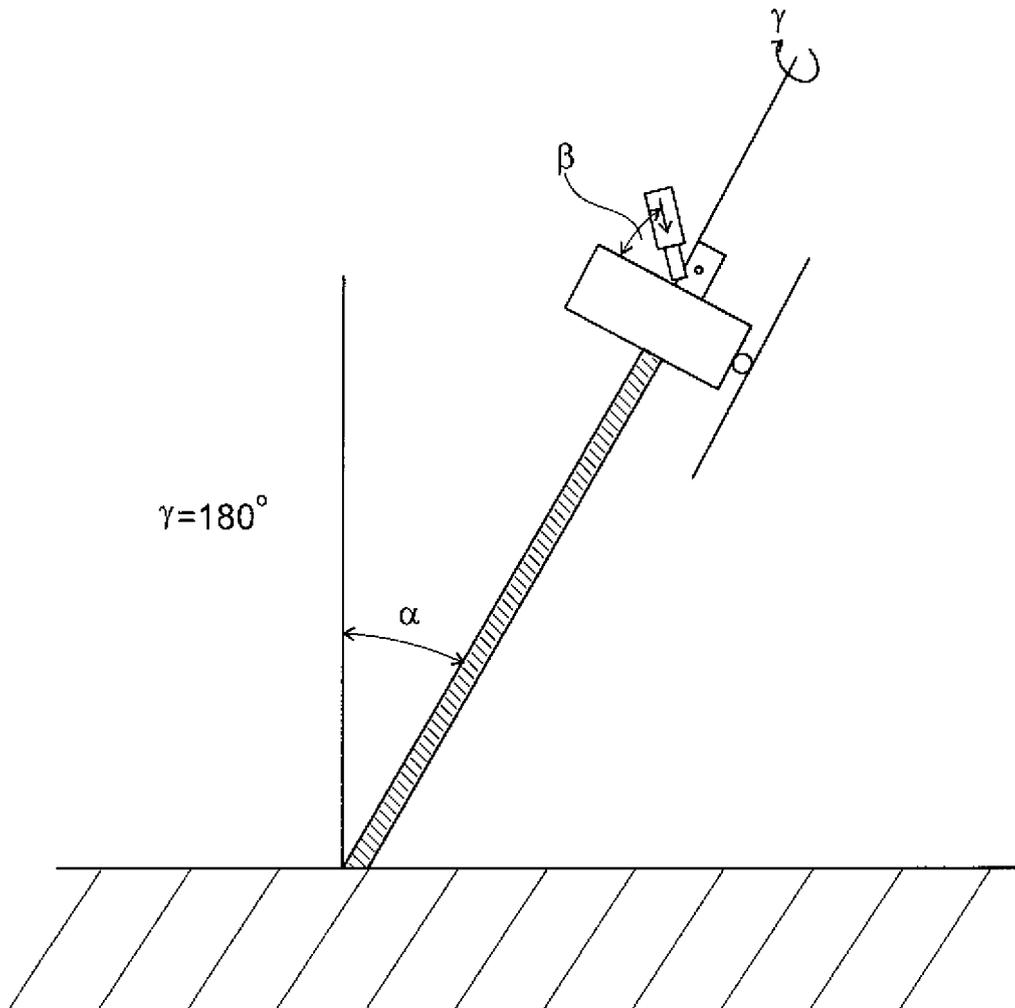


Fig. 2

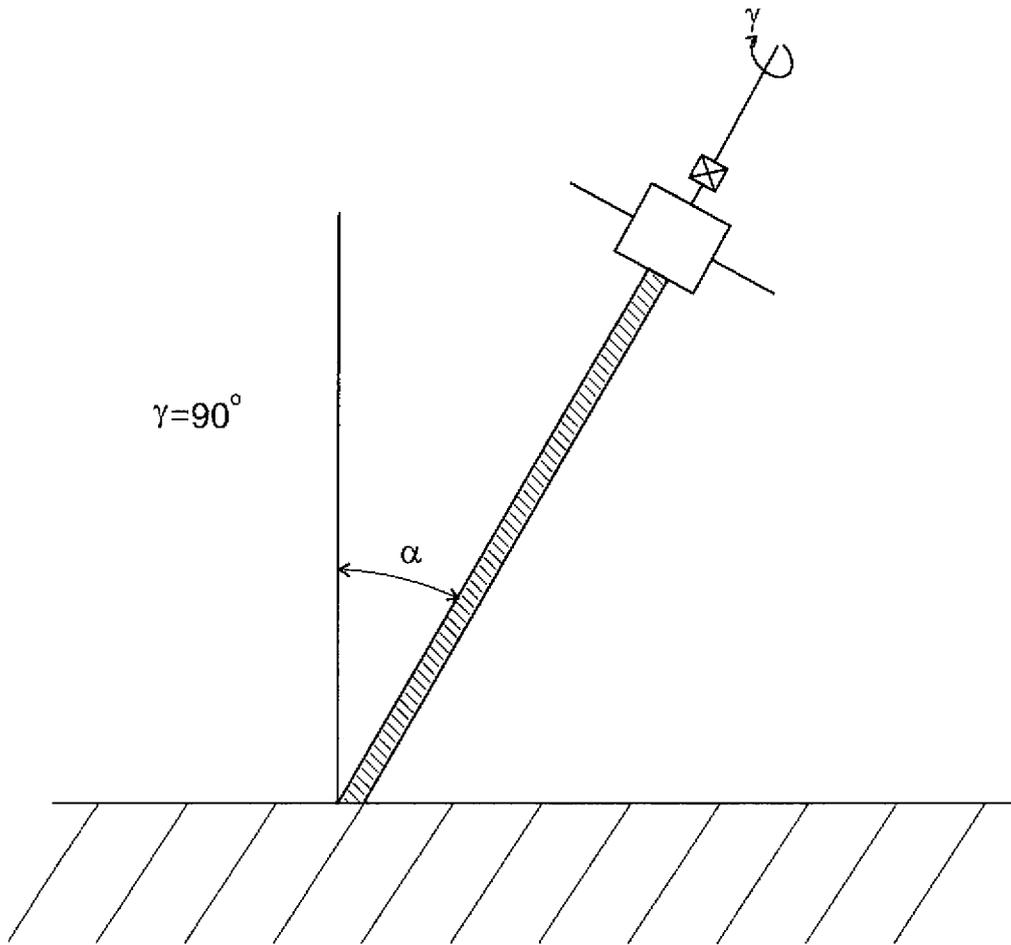


Fig. 3

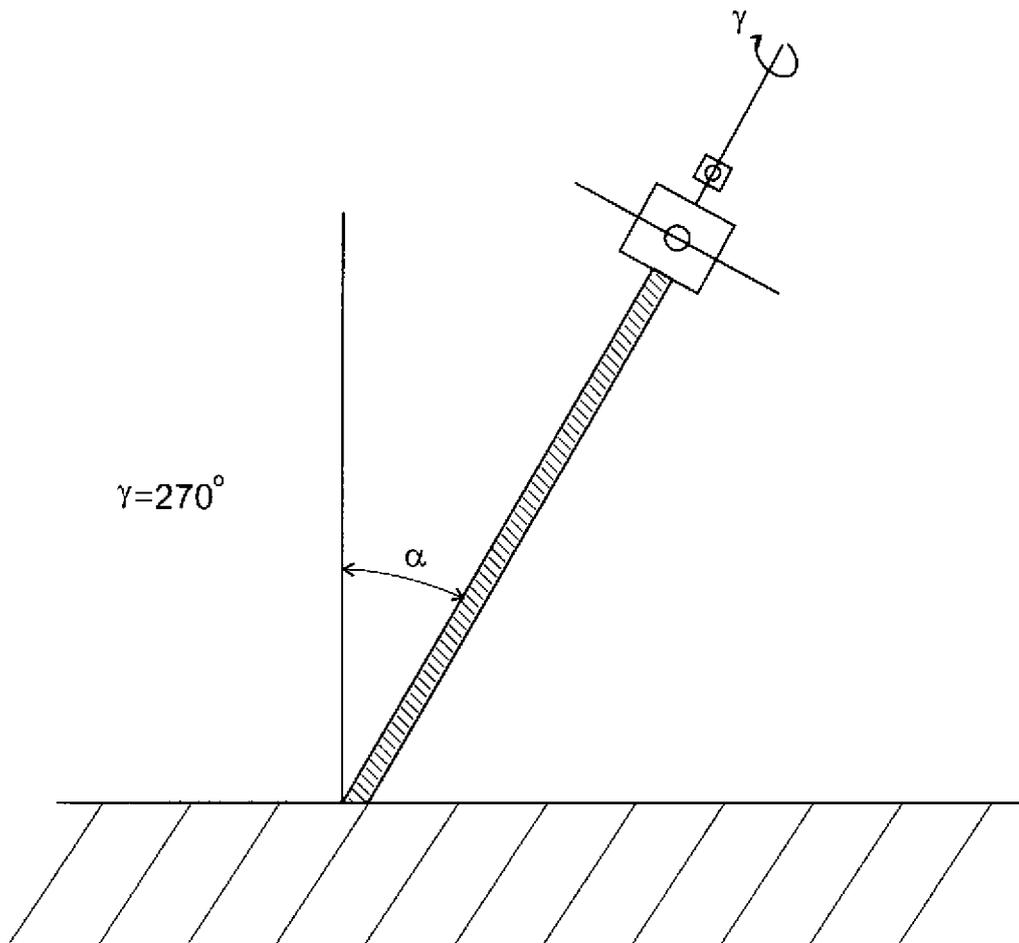


Fig. 4

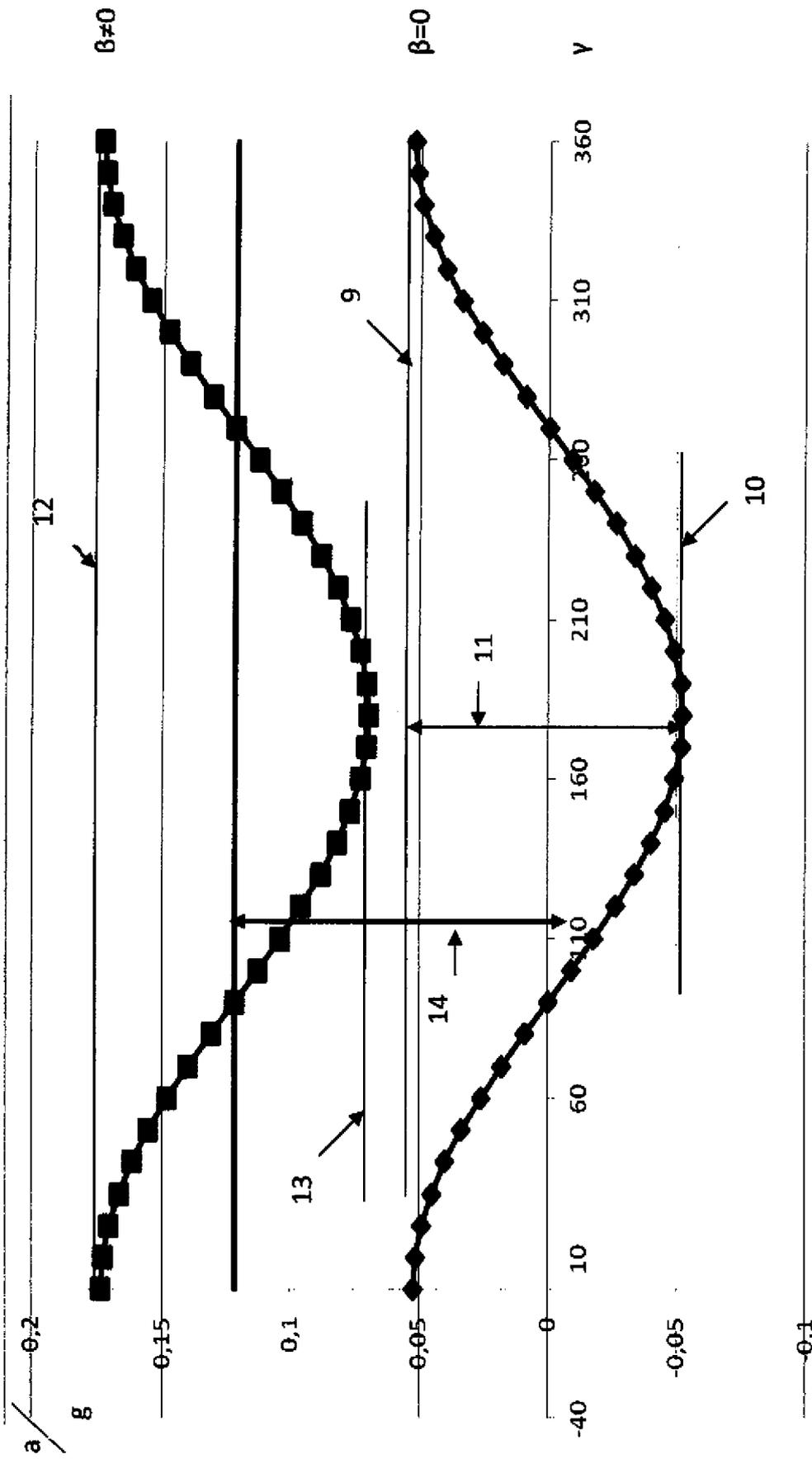


Fig. 5