

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
18. Oktober 2018 (18.10.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/189249 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B64C 11/16 (2006.01) **G01M 5/00** (2006.01)
B64C 27/46 (2006.01) **G01B 11/16** (2006.01)
B64D 45/00 (2006.01) **F03D 17/00** (2016.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/059305

(22) Internationales Anmeldedatum:

11. April 2018 (11.04.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2017 107 940.8 12. April 2017 (12.04.2017) DE
10 2018 101 689.1 25. Januar 2018 (25.01.2018) DE

(71) Anmelder: **DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT-
UND RAUMFAHRT E.V.** [DE/DE]; Linder Höhe, 51147
Köln (DE).

(72) Erfinder: **VOIGT, Andreas**; Helmstedter Straße 134,
38102 Braunschweig (DE). **KNAAK, Florian**; Henricistra-
ße 38, 52072 Aachen (DE).

(74) Anwalt: **GRAMM, LINS & PARTNER PATENT- UND
RECHTSANWÄLTE PARTGMBB**; Freundallee 13a,
30173 Hannover (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR MEASURING ROTOR BLADE MOVEMENTS OF AN AIRCRAFT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND EINE VORRICHTUNG ZUR MESSUNG VON ROTORBLATTBEWEGUNGEN EINES
FLUGGERÄTES

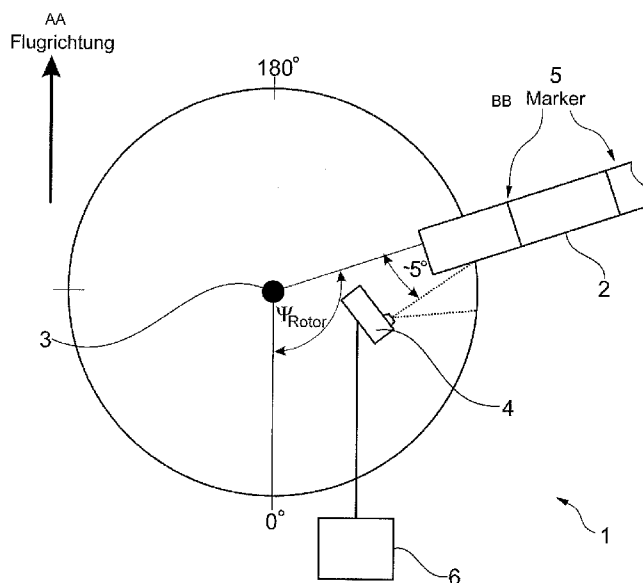


Fig. 1

AA Flight direction
BB Markers

(57) Abstract: The invention relates to a device (1) for measuring rotor blade movements of an aircraft over the entire rotor rotation in flight, having at least one rotatably arranged rotor blade (2) and an image recording unit (4) for recording images of the rotor blade (2) to be measured, characterized in that the image recording unit (4) is arranged such that it can be moved together with the rotor blade (2) to be measured. The invention also relates to a method for measuring a rotor blade movement, characterized by - recording images of the rotor blade (2), wherein an image recording unit (4) is moved together with the rotor blade (2) to be measured, and - evaluating a recorded sequence of images of the rotor blade (2) with regard to characteristic features, and - ascertaining the rotor blade movement as a function of the positional displacement of the characteristic features relative to the concomitantly moving image recording unit



WO 2018/189249 A1

ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(4) or a reference point of the rotor blade (2).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) zur Messung von Rotorblattbewegungen eines Fluggerätes über die gesamte Rotordrehung im Flug mit mindestens einem drehbar angeordneten Rotorblatt (2) und einer Bildaufnahmeeinheit (4) zur Aufnahme von Abbildungen des zu vermessenden Rotorblattes (2), dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufnahmeeinheit (4) mitbewegbar mit dem zu vermessenden Rotorblatt (2) angeordnet ist. Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren zur Messung von Rotorblattbewegungen, gekennzeichnet durch - Aufnehmen von Abbildungen des Rotorblatts (2), wobei sich eine Bildaufnahmeeinheit (4) zusammen mit dem zu vermessenden Rotorblatt (2) mitbewegt, und - Auswertung einer aufgenommenen Folge von Abbildungen des Rotorblatts (2) hinsichtlich charakteristischer Merkmale und - Ermitteln der Rotorblattbewegung in Abhängigkeit von der Ortsverlagerung der charakteristischen Merkmale relativ zu der sich mitbewegenden Bildaufnahmeeinheit (4) oder einem Referenzpunkt des Rotorblattes (2).

Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung von Rotorblattbewegungen eines Fluggerätes

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung von Rotorblatt- oder Propellerblattbewegungen von Fluggeräten, wie beispielsweise Hubschrauber mit verschiedenen Rotorkonfigurationen, Tragschraubern oder langsam drehende Propeller, über die gesamte Rotordrehung im Flug.

Als Rotor im Sinne der vorliegenden Erfindung wird jedes um eine Drehachse drehende, mit einem oder mehreren Blättern bestückte rotierende Element verstanden, wie z.B. ein Rotor eines Hubschraubers, Tragschraubers oder ähnlichen Fluggerätes, oder ein Propeller eines Fluggerätes. Insoweit erfasst daher der Begriff „Rotorblatt“ Rotorblätter jeder Art insbesondere auch Propellerblätter.

Es besteht ein Bedarf die Rotorblattbewegung im Flug zu messen, um detaillierte Modelle der Flugmechanik und Flugleistungen zu erstellen. Ferner wird bei der Entwicklung von neuartigen Rotor-/Propellerblättern diese Form der Analyse benötigt.

Es sind vielfältige Technologien zur Messung der Rotorblattbewegung bekannt. Diese lassen sich grob einteilen in:

Verfahren, bei denen die Rotorblätter stark mit Dehnungsmessstreifen und/oder Beschleunigungssensoren oder anderen Messeinrichtungen instrumentiert werden. Nachteilig ist, dass die originalen Rotorblätter nicht verwendet werden können und ressourcenaufwändig neue Rotorblätter hergestellt werden müssen.

Optische Verfahren, die auf Stereokameras basieren und photogrammetrisch die Oberfläche erfassen. Nachteilig ist die verhältnismäßig große Bauhöhe über der Rotordrehachse, so dass Anwendungen bei Koaxialen- oder Flettner-Rotoren nicht möglich sind.

Optische Verfahren, die mit Markern auf den Rotorblättern arbeiten und in einem steilen Winkel die Rotorblätter aufnehmen. Nachteilig ist die große Bau-

höhe über bzw. unter der Rotorebene. Daher sind Anwendungen bei Koaxialen- oder Flettner-Rotoren nicht möglich, sofern eine 360°-Rundum-Messung gefordert ist.

5 Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein verbessertes Verfahren und eine verbesserte Vorrichtung zur Messung von Rotorblattbewegungen zu schaffen. Ferner ein Verfahren speziell für mehrere Rotoren mit signifikanten Überlapp und geringem Bauraum am Rotor zu entwickeln.

10 Es wird vorgeschlagen, dass die Messeinrichtung eine sich mit dem Rotorblatt mitbewegend angeordnete Kamera hat. Dadurch ist es möglich, 360° des Rotorazimuts, d.h. eine dauerhafte Rundumbeobachtung in allen Umdrehungswinkellagen, bei geringer Bauhöhe zu erfassen.

15 Die Rotorblattbewegungen, die erfindungsgemäß gemessen werden können, beinhalten insbesondere Rotorblattverformungen im laufenden Betrieb des Rotorblattes durch auf das Rotorblatt einwirkende Luftkräfte.

20 Das Verfahren zur Messung von Rotorblattbewegungen sieht entsprechend vor, dass sich eine Bildaufnahmeeinheit (z.B. Kamera) zusammen mit dem zu vermessenden Rotorblatt mitbewegt und Abbildungen des Rotorblatts während der Rotorbewegung aufnimmt, und dass die Folge von Abbildungen hinsichtlich charakteristischer Merkmale ausgewertet wird und eine Ermittlung der Rotorblattbewegung in Abhängigkeit von der Ortsverlagerung der charakteristischen Markierungen relativ zu der sich mitbewegenden Bildaufnahmeeinheit oder einem Referenzpunkt des Rotorblattes erfolgt.

25 Als charakteristische Markierungen können vorhandene Merkmale des Rotorblattes verwendet oder zusätzliche Markierungen an dem Rotorblatt angebracht werden.

30 Solche zusätzliche Markierungen sollten bei dem geringen Winkel der Kamera zur Rotorblattfläche in einem möglichst hohen Farbkontrast und/oder Hell-Dunkel-

Kontrast ausgebildet sein. Sie sollten vorzugsweise an der Unterseite des Rotorblattes aufgebracht sein. Die Markierungen können beispielsweise senkrecht von der Ebene des Rotorblattes abragende Elemente sein.

5 Diese Markierungen können in Anzahl und Größe angepasst werden, um so höhere Messgenauigkeiten zu erzielen.

Es können die originalen Rotorblätter vermessen werden, ohne diese - bis auf das optionale Aufbringen von Markierungen - konstruktiv und strukturell zu verändern.

10 Die mechanischen und flugmechanischen Eigenschaften der Rotorblätter bzw. des Fluggerätes (z.B. Hubschrauber) ändert sich durch die zusätzlichen Anbauten nur gering und können im Regelfall vernachlässigt werden. Dabei sind jede Art von Rotoren oder Propellern vermessbar.

15 Die mit dem zu vermessenden Rotorblatt mitdrehend angeordnete Kamera hat vorzugsweise ein Blickwinkel von weniger als 10° zur Rotorblattebene. Die optionalen Marker sollten dann im Wesentlichen senkrecht auf dem Rotorblatt aufgebracht sein. Sie sind vorzugsweise an der Rotorblattkante (Vorderkante und/oder Rückseitenkante) angeordnet.

20 Die Kamera ist vorzugsweise am Rotorkopf befestigt, an dem auch die Rotorblätter ggf. über ein von der Taumelscheibe angesteuertes Gelenk angelenkt sind. Für jedes zu beobachtende Rotorblatt kann eine eigene, auf das zugeordnete Rotorblatt ausgerichtete Kamera vorhanden sein.

25 Mit der Vorrichtung und dem Verfahren bewegt sich die Kamera relativ wenig. Daher sind die Anforderungen an die Belichtungszeit oder den "Shutter" wesentlich geringer, als bei sich nicht mitdrehenden Kameras, die in einer relativ steilen Beobachtungswinkel das Rotorblatt abfilmen.

30 Die Vorrichtung und das Verfahren sind auch einsetzbar, wenn ein Überlappen der Rotoren existiert, wie bei einem Koaxial- oder Flettner-Rotor.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der beigelegten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

- 5 Figur 1 - Skizze eines umlaufend bewegbaren Rotorblattes mit sich mitbewegender Kamera;
- Figur 2 - perspektivische Ansicht eines Rotorblattes mit Markern und sich mitbewegender Kamera am Rotorkopf;
- Figur 3 - Skizze der Achsenzuordnung für ein Rotorblatt;
- Figur 4 - Skizze der Zusammenhänge der Koordinatentransformationen und Verschiebungen;
- 10 Figur 5 - Skizze der Synchronisation mit einem Azimutmarkierungspunkt;
- Figur 6 - Skizze eines Teils des Rotorkopfes mit zugehörigen Messgrößen;
- Figur 7 - Koordinatentransformationen von Bildkoordinaten zu Kamerakoordinaten und von Kamerakoordinaten zu Rotorblattkoordinaten;
- 15 Figur 8 - Skizze der Berechnungsgrößen der Rotorblattverformung.

20 Figur 1 zeigt eine Skizze einer Vorrichtung 1 zur Messung von Rotorblattbewegungen eines Rotorblattes 2, das rotierbar an einem Rotorkopf 3 angeordnet ist. Der Rotorkopf 3 ist durch das Drehzentrum der Rotationsachse symbolisiert. Eine Bildaufnahmeeinheit 4 in Form einer Kamera ist relativ zu dem zu vermessenden Rotorblatt 2 mitbewegbar angeordnet. Die Bildaufnahmeeinheit 4 kann beispielsweise an dem Rotorkopf 4 angebracht sein. Sie ist in einem Blickwinkel von weniger als 10° zur Längsachse des Rotorblattes 2, die das Drehzentrum des Rotorkopfes 4 schneidet, auf das zu vermessende Rotorblatt 2 ausgerichtet.

25 An dem Rotorblatt 2 sind Marker 5 angeordnet. Über die Länge des Rotorblattes 2 können mehrere Marker im Abstand zueinander angeordnet sein. Damit lassen sich Verdrehungen, Verwindungen und sonstige Vibrationsbewegungen bei der Rotation des Rotorblattes während der Winkelbewegung ψ_{Rotor} ermitteln, indem

30 die Bewegungen der Marker 5 in der Folge von mit der Bildaufnahmeeinheit 4 aufgenommenen Abbildungen des Rotorblattes 2 mitsamt seiner Marker 5 analysiert werden.

Zur Auswertung der Abbildungen ist eine Auswerteeinheit 6 mit der Bildaufnahmeeinheit 2 verbunden oder verbindbar. Die Abbildungen der Bildaufnahmeeinheit können auch in einem Speichermedium zwischengespeichert und später an eine separate Auswerteeinheit 6 übertragen werden. Die Auswerteeinheit 6 kann ein
5 geeignet programmierter Computer sein.

Figur 2 zeigt eine perspektivische Ansicht des Rotorblattes 2 mit der an dem Rotorkopf 3 mitdrehend angeordneten Bildaufnahmeeinheit 4. Deutlich wird, dass diese leicht ($0-10^\circ$ und bevorzugt ca. $5^\circ \pm 2^\circ$) auf die Unterseite des Rotorblattes 2
10 ausgerichtet ist.

In dem Ausführungsbeispiel ragen die Marker 5 von der Unterseite des zu vermessenden Rotorblattes 2 senkrecht nach unten. Alternativ können Marker 5 auch an der vorderseitigen und/oder rückseitigen Stirnkante des Rotorblattes angeordnet
15 sein. Denkbar ist aber auch eine flächige Markierung an der Oberfläche des Rotorblattes oder die Nutzung vorhandener sichtbarer Merkmale, wie bspw. Stege, Nuten o.ä..

Erkennbar ist, dass eine Hochgeschwindigkeitskamera als Bildaufnahmeeinheit 4
20 an dem Rotorkopf 3 bzw. dem Rotorblatthalter befestigt ist. Die Rotorblätter 2 sind mit optischen Markern 5 ausgestattet. Ein weiterer Marker kann im nicht drehenden System vorhanden sein, um eine azimutale Zuordnung durchzuführen. Dies kann mit einem Laser realisiert werden, der das Rotorblatt 2 beleuchtet.

Die Bestimmung der Rotorblattbewegung erfolgt mit einer Kamera (beispielsweise dem Modell GoPro Hero 4 Black Edition) über den gesamten Rotorazimut und den Großteil des Radius des untersuchten Rotorblattes (d.h. seine Erstreckungslänge).
25

Mit der Vorrichtung lassen sich Flettner-Doppelrotoren untersuchen. Aus den ermittelten Rotorblattbewegungsdaten kann eine Berechnung der aerodynamischen Kräfte durch Lösen von geeigneten Differentialgleichungen durchgeführt werden.
30

Für die Differentialgleichungen der Rotorblattbewegung eignen sich z.B. die von Hodges und Dowell angegebenen grundlegenden Gleichungen (Hodges, D. H.;

and Dowell, E. H.: "Nonlinear Equations of Motion for the Elastic Bending and Torsion of Twisted Nonuniform Rotor Blades," NASA TN D-7818, 1974).

Es sollten Differentialgleichungen genutzt werden, die bis zur 2. Ordnung gültig sind. Mit einem Differentialgleichungssystem ist eine Unterscheidung der Schwerpunkte möglich. Zudem kann die veränderliche Masse über den Radius der untersuchten Rotorblätter berücksichtigt werden. Die Kräfte werden in x-, y- und z-Richtung des dreidimensionalen Koordinatensystems betrachtet. Das Moment wird um die x-Achse, Verschiebungen in x-, y- & z-Richtung und eine Verdrehung um die x-Achse betrachtet.

Die Achsenzuordnung für ein Rotorblatt ist in Figur 3 skizziert.

Es können folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden:

Die Rotorblätter sind lang, gerade und schlank. Sie bestehen aus einem homogenen und isotropen Material und haben ein symmetrisches Blattprofil. Es treten nur moderate Verschiebungen auf. Die Verzerrungsfunktion kann vernachlässigt werden. Die Verschiebung in y-Richtung beträgt Null, d.h. es tritt keine Verschiebung auf. Es wird im Übrigen eine Näherungslösung für die Verschiebung in x-Richtung betrachtet. Die ermittelte Rotorblattbewegung ist nur im markierten Bereich des Rotorblattes gültig.

Für die Rotorblattdaten können folgende Annahmen getroffen werden:

Es besteht eine Torsions-, Zug- und Biegesteifigkeit;

Der Schubmittelpunkt, Flächenschwerpunkt, die Flächenträgheitsmomente, die Massenverteilung, der Massenschwerpunkt und der Nacheilwinkel sind bekannt.

Die Gültigkeit dieser Daten kann anhand einer Anzahl von z.B. mindestens drei weiten baugleichen Rotorblättern überprüft werden. Zudem sollte eine vergleichende Verdrehung und Verschiebung ermittelt werden.

Die Auswertung der Bilddaten kann z.B. mit Matlab erfolgen. Zur Punkterkennung eignet sich eine „Circle Hough Transformation“. Es kann dann eine Transformation

der Bildkoordinaten und der Rotorblattkoordinaten durchgeführt werden. Anschließend erfolgt eine Berechnung der Verschiebungen, eine Ermittlung der Verschiebungsfunktionen und das Lösen der Differentialgleichungen.

5 Die Zusammenhänge der Koordinatentransformationen und Verschiebungen sind in Figur 4 skizziert.

Es kann weiterhin eine Synchronisation durchgeführt werden. Dies ist in Figur 5 skizziert. Hierzu erfolgt eine Zuordnung der Bewegungen bzw. der Kräfte zu den
10 Flugdaten, eine Betrachtung der Rotordrehzahl und der mit der mindestens einen Kamera aufgenommenen Videos, eine Zuordnung der Bewegungen bzw. der Kräfte zu dem Rotorazimut und die Berücksichtigung eines Azimutmarkierungspunktes im nicht drehenden System zur Erfassung des Rotationswinkels bzw. der Rotorblattumdrehungen.

15 Die in Figur 4 in überlagerter Weise dargestellten Zusammenhänge werden nachfolgend anhand der Figuren 6 bis 8 im Einzelnen erläutert. Die Figuren 6 bis 8 zeigen die gleichen Zusammenhänge wie die Figur 4, jedoch aufgeteilt in drei Einzelabbildungen.

20 Die Figur 6 zeigt in Seitenansicht die für die Erläuterung der Erfindung wesentlichen Teile des Rotorkopfes 3. Dargestellt ist eine Getriebeeinheit 7 des Rotors, die über einen Rotor-Mast 8 mit einer Zentralbefestigung 10 des Rotorkopfes 3 gekoppelt ist. Die Rotorblätter 2 sind über Blatthalter 11 mit der Zentralbefestigung
25 10 gekoppelt. Am Rotor-Mast 8 ist ein Messelement 9 zur Erfassung der Biegung des Rotor-Masts 8 angeordnet, z.B. in Form eines Dehnungsmessstreifens. Am Rotorblatt 2 ist ein weiteres Messelement 13 zur Erfassung einer Biegung im Blattwurzel-Bereich des Rotorblattes 2 angeordnet. Das weitere Messelement 13 kann bspw. ebenfalls als Dehnungsmessstreifen ausgebildet sein. Mit dem Bezugszeichen 12 wird die Befestigungsposition der Bildaufnahmeeinheit 4 gekennzeichnet.
30 Ferner ist erkennbar, dass am Rotorblatt 2 mehrere Marker 5 angeordnet sind. Die Figur 6 lässt außerdem verschiedene geometrische Größen erkennen, die folgende Bedeutung haben:

β_M Biegewinkel des Rotor-Masts 8, erfasst durch das Messelement 9

- Δx In Folge der Biegung des Rotor-Masts 8 auftretender seitlicher Versatz des Rotorkopfes 3, gemessen an der Oberseite der Zentralbefestigung 10
- β_B Durch die Rotorblattbewegung auftretende Verbiegung des Rotorblattes 2, gemessen durch den Biegewinkel β_B
- 5 β_{BG} Am Blatthalter 11 auftretender Biegewinkel, gemessen durch das weitere Messelement 13

Der Biegewinkel β_B wird anhand des nachfolgend beschriebenen Verfahrens unter Auswertung der Bilder der Bildaufnahmeeinheit 4 ermittelt. Wie erläutert, soll die

10 Bildaufnahmeeinheit 4 an der Position 12 angeordnet werden, somit am Blatthalter 11. Hierbei wird ein Marker 5 als Referenzmarker zur Bestimmung einer Referenzazimut-Position genutzt. Die Rotorblätter 2 können bspw. jeweils mit fünf Paaren von Markern 5 bestückt sein.

15 Zur Absicherung der Messergebnisse werden die Messelemente 9, 13 genutzt, um die Biegung des Rotor-Masts 8 und des Blatthalters 11 zu bestimmen. Der Biegewinkel β_{BG} wird dabei indirekt anhand der Messergebnisse des Messelementes 13 bestimmt. Diese Messungen mit den Messelementen 9, 13 werden kalibriert, um

20 zusätzlich den seitlichen Versatz Δx am Rotorkopf 3, den elastischen Mast-Biegewinkel β_M sowie den elastischen Biegewinkel β_{BG} des Blatthalters 11 zu bestimmen.

Die Auflösung der Bildaufnahmeeinheit 4, z.B. einer Kamera, kann 1280 * 720 Pixel bei einer Aufnahmerate (frame rate) von 240 fps (frames per second) betragen. Bei einer solchen Aufnahmerate werden ungefähr 15 Bilder pro Umdrehung

25 des Rotors bei nominaler Rotorgeschwindigkeit erfasst. Der Verschlussmechanismus handelsüblicher Kameras ist ausreichend für eine solche Anwendung, da die Relativbewegung des Rotorblattes ausreichend langsam ist, sodass keine Bildstörungen erzeugt werden.

30 In der Bildnachbearbeitung können eines oder mehrere der zuvor erwähnten Auswerteverfahren genutzt werden, z.B. die „Circle Hough Transformation“. Für die Berechnung der Rotorblattbewegung werden die Positionen der Marker 5 be-

stimmt. Soll eine Absolutbestimmung der Rotorblattbewegung erfolgen, kann zunächst eine Bestimmung der Referenzpositionen der Marker 5 erfolgen, wenn das Rotorblatt keine Deformation hat, z.B. bei drehendem Rotor und neutraler Belastung der Rotorblätter 2. Für eine solche Bestimmung der Referenzpositionen sollten Verstellungen der Rotorblätter, z.B. zyklische und kollektive Verstellungen, vermieden werden.

Nachfolgend werden die benötigten Koordinatentransformationen näher erläutert. Die Figur 7 zeigt die hierfür verwendeten Größen in einem Rotorblatt-Koordinatensystem 14, einem Kamera-Koordinatensystem 15 sowie einem Bild-Koordinatensystem 16. Zunächst wird eine Transformation vom Bild-Koordinatensystem 16 mit den Koordinaten n, m in das Kamera-Koordinatensystem 15 mit den Koordinaten x_c, y_c, z_c durchgeführt. Hierbei wird eine intrinsische Parametermatrix M_{int} der Bildaufnahmeinheit 4 genutzt, die vorab durch Kalibrierungsmessungen mit der Bildaufnahmeinheit 4 bestimmt wird. Mit den bekannten Positionen m, n der Marker 5 im Bild-Koordinatensystem 16 kann die Lösung wie folgt bestimmt werden:

$$(M_{int})^{-1} \cdot Z_c \cdot \begin{pmatrix} m \\ n \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Sodann erfolgt eine Koordinatentransformation vom Kamera-Koordinatensystem 15 in das Rotorblatt-Koordinatensystem 14 mit den Koordinaten x, y, z . Dieses Rotorblatt-Koordinatensystem ist ein Rotorblatt-festes oder genauer gesagt ein Blatthalter-festes Koordinatensystem, wobei der Ursprung des Koordinatensystems zur Rotationsachse des Rotors verschoben ist, wenn kein Biegewinkel β_{BG} vorhanden ist ($\beta_{BG} = 0$). Für diese Koordinatentransformation wird eine Rotation der Koordinaten zusammen mit einer Verschiebung durchgeführt:

$$\vec{X} = M_{rot} \cdot \vec{X}_c + \vec{t}. \quad (2)$$

Sowohl die zuvor genannte Rotationsmatrix M_{rot} als auch der Verschiebevektor $\vec{t}$ kann mittels eines CAD-Modells des Rotors unter Berücksichtigung der Parameter

der Befestigung der Bildaufnahmeeinheit 4 bestimmt werden. Eine andere Möglichkeit ist die Berechnung des Verschiebevektors aufgrund einer Kalibrierung, wie zuvor beschrieben.

Der Prozess der Koordinatentransformation ist zusätzlich in Figur 8 dargestellt. Dabei ist in durchgezogener Linie das Rotorblatt-Profil im neutralen Biegezustand dargestellt, und mit gepunkteter Linie das Rotorblatt-Profil unter Last, wenn eine Rotorblattbewegung bzw. –verbiegung auftritt. Mit dem Bezugszeichen 17 ist dabei jeweils der Neutralpunkt des Profils (shear center) gekennzeichnet. Die Größe d_{LE} bezeichnet die Mittenposition des am Rotorblatt 2 vorne angeordneten Markers 5 relativ zum Neutralpunkt 17. Die Größe d_{TE} bezeichnet die Mittenposition des am Rotorblatt hinten angebrachten Markers 5 relativ zum Neutralpunkt 17.

Um die Rotorblattbewegung zu bestimmen, wird der Torsionswinkel an jeder radialen Position $i = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ für jedes der Paare von Markern 5 des Rotorblattes wie folgt bestimmt:

$$\Phi_i = \arctan\left(\frac{z_{LE_i} - z_{TE_i}}{y_{LE_i} - y_{TE_i}}\right) \quad (3)$$

Ein Referenztorsionswinkel wird in entsprechender Weise aus den Referenzpositionen der Marker 5 bestimmt.

Der letztendlich zu bestimmende Torsionswinkel wird korrigiert mit dem Torsionswinkel eines Paares von Markern 5 in deren Referenzposition, wie folgt:

$$\Phi_{meas_i} = \Phi_i - \Phi_{ref_i}. \quad (4)$$

Die vorderen und hinteren Marker 5 werden benutzt, um eine horizontale Neutralpunktverschiebung v_{SCmeas} sowie eine Vertikalverschiebung x_{SCmeas} zu bestimmen. Dementsprechend wird der Versatz des Neutralpunktes unter Verwendung der Positionen der vorderen und hinteren Marker 5 wie folgt bestimmt:

$$w_{SCLE_i} = z_{LE_i} - z_{LE_{ref_i}} - d_{LE_i} \cdot (\sin(\Phi_{meas_i} + \Phi_{ref_i}) - \sin \Phi_{ref_i}) \quad (5)$$

$$w_{SCTE_i} = z_{TE_i} - z_{TE_{ref_i}} + d_{TE_i} \cdot (\sin(\Phi_{meas_i} + \Phi_{ref_i}) - \sin \Phi_{ref_i}) \quad (6)$$

$$v_{SCLE_i} = y_{LE_i} - y_{LE_{ref_i}} + d_{LE_i} (\cos(\Phi_{meas_i} + \Phi_{ref_i}) - \cos \Phi_{ref_i}) \quad (7)$$

$$v_{SCTE_i} = y_{TE_i} - y_{TE_{ref_i}} - d_{TE_i} (\cos(\Phi_{meas_i} + \Phi_{ref_i}) - \cos \Phi_{ref_i}) \quad (8)$$

Die auf diese Weise bestimmten „gemessenen“ Werte der Verschiebungen des Neutralpunktes in horizontaler und vertikaler Richtung werden wie folgt bestimmt:

5

$$w_{SCmeas_i} = \frac{w_{SCLE_i} + w_{SCTE_i}}{2} \quad (9)$$

$$v_{SCmeas_i} = \frac{v_{SCLE_i} + v_{SCTE_i}}{2} \quad (10)$$

Für die Bestimmung der Rotorblattbewegung kann außerdem aufgrund jedes Bildes eine Azimutposition bestimmt werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um die Azimutposition zu bestimmen:

10

- Triggerung der Kamerabilder bei bestimmten Winkeln
- optische Marker, die am Fluggerät befestigt sind
- Aufzeichnen zusätzlicher Daten, außer den Kameradaten (elektrische, akustische, sonstige Daten).

15

Das Verfahren hat im experimentellen Versuch bei Validierung zu folgenden Ergebnissen:

Zur Bestimmung des Messfehlers kann eine Messung der Verschiebung & Verdrehung im Stand erfolgen.

20

Der Vergleich erfolgte mit anderen Systemen. Der absolute Fehler wird auf den Rotorradius bezogen.

System	Messfehler der Verschiebung [mm] /Rotorradius [m]	Messfehler der Verdrehung [mm] /Rotorradius [m]
Feste Messverfahren: Stereo Pattern Recognition; Fringe Correlation Method; Projection Moiré Interferometry	0,2 bis 1,36	0,143 bis 0,26
Mitbewegt Messverfahren: Blade Deformation Measuring System; Strain Pattern Analysis	0,11 bis 1,2	0,03 bis 1,3
IBDM	0,11 bis 1,2	0,045 bis 0,26

5

Die Bewegung der Kamera ist als Ursache für Messabweichungen vernachlässigbar sofern dies geprüft wurde.

Bezugszeichenliste

	1	Vorrichtung
	2	Rotorblatt
5	3	Rotorkopf
	4	Bildaufnahmeeinheit
	5	Markierungen/Marker
	6	Auswerteeinheit
	7	Getriebeeinheit des Rotors
10	8	Rotor-Mast
	9	Messelement zur Erfassung der Mast-Biegung
	10	Zentralbefestigung des Rotorkopfes
	11	Blatthalter
	12	Befestigungsposition der Bildaufnahmeeinheit
15	13	Messelement zur Erfassung der Blattwurzel-Biegung
	14	Rotorblatt-Koordinatensystem
	15	Kamera-Koordinatensystem
	16	Bild-Koordinatensystem
	17	Neutralpunkt des Rotorblatt-Profiles
20		

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zur Messung von Rotorblattbewegungen eines Fluggerätes über die gesamte Rotordrehung im Flug mit mindestens einem drehbar angeordneten Rotorblatt (2) und einer Bildaufnahmeeinheit (4) zur Aufnahme von Abbildungen des zu vermessenden Rotorblattes (2), dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufnahmeeinheit (4) mitbewegbar mit dem zu vermessenden Rotorblatt (2) angeordnet ist.
2. Vorrichtung (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Bildaufnahmeeinheit (4) mit einem Blickwinkel von weniger als 10° zu dem zu vermessenden Rotorblatt (2) ausgerichtet ist.
3. Vorrichtung (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Rotorblatt (2) optisch sichtbare Markierungen (5) hat.
4. Vorrichtung (1) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Markierungen (5) auf das Rotorblatt (2) aufgeklebt sind.
5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Markierungen (5) senkrecht von der Rotorblattfläche abragende Elemente sind.
6. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Markierungen (5) an der Stirnkante und/oder an der Profilendkante des Rotorblattes (2) angeordnet sind.

7. Verfahren zur Messung von Rotorblattbewegungen, gekennzeichnet durch

- Aufnehmen von Abbildungen des Rotorblatts (2), wobei sich eine Bildaufnahmeeinheit (4) zusammen mit dem zu vermessenden Rotorblatt (2) mitbewegt, und
- Auswertung einer aufgenommenen Folge von Abbildungen des Rotorblatts (2) hinsichtlich charakteristischer Merkmale und
- Ermitteln der Rotorblattbewegung in Abhängigkeit von der Ortsverlagerung der charakteristischen Merkmale relativ zu der sich mitbewegenden Bildaufnahmeeinheit (4) oder einem Referenzpunkt des Rotorblattes (2).

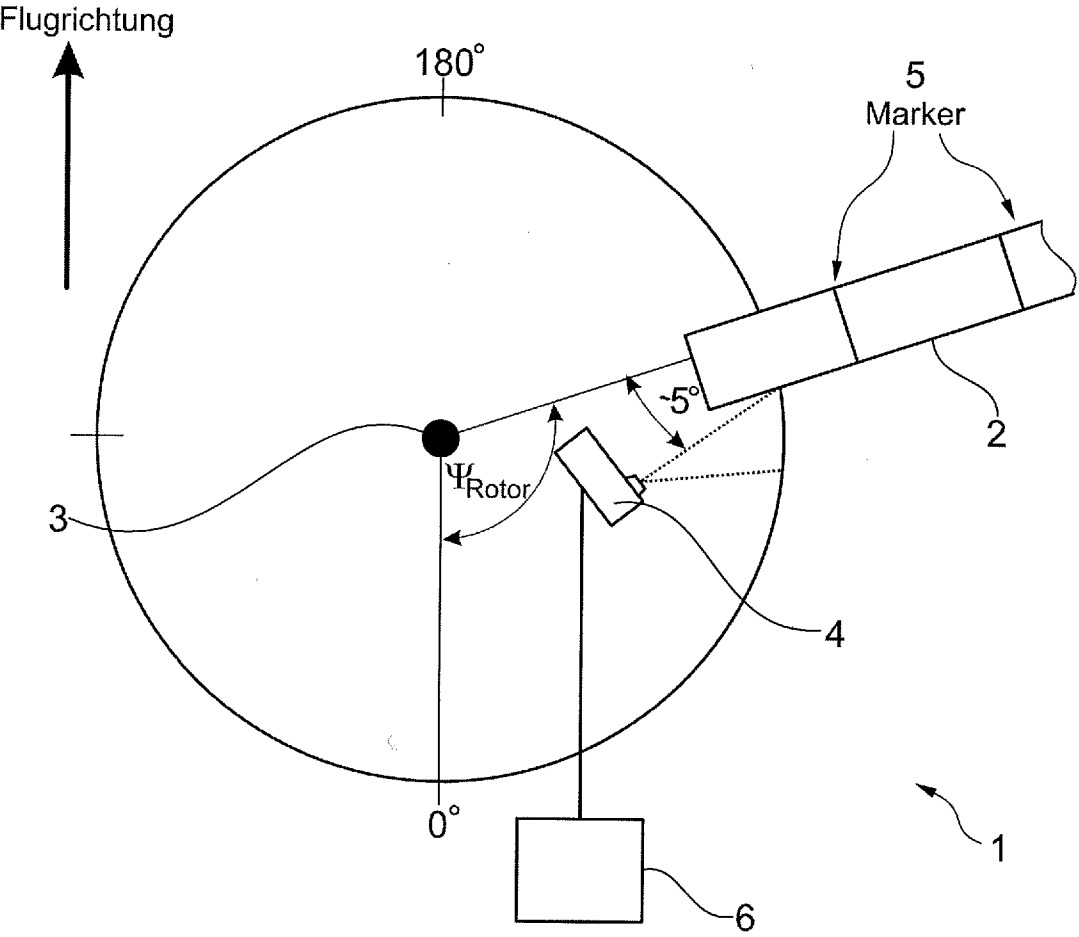


Fig. 1

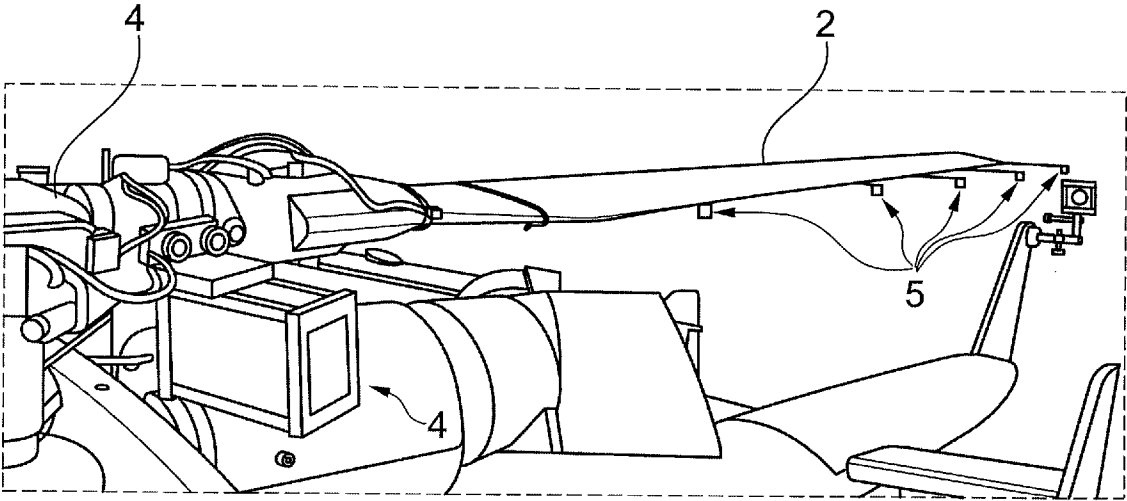


Fig. 2

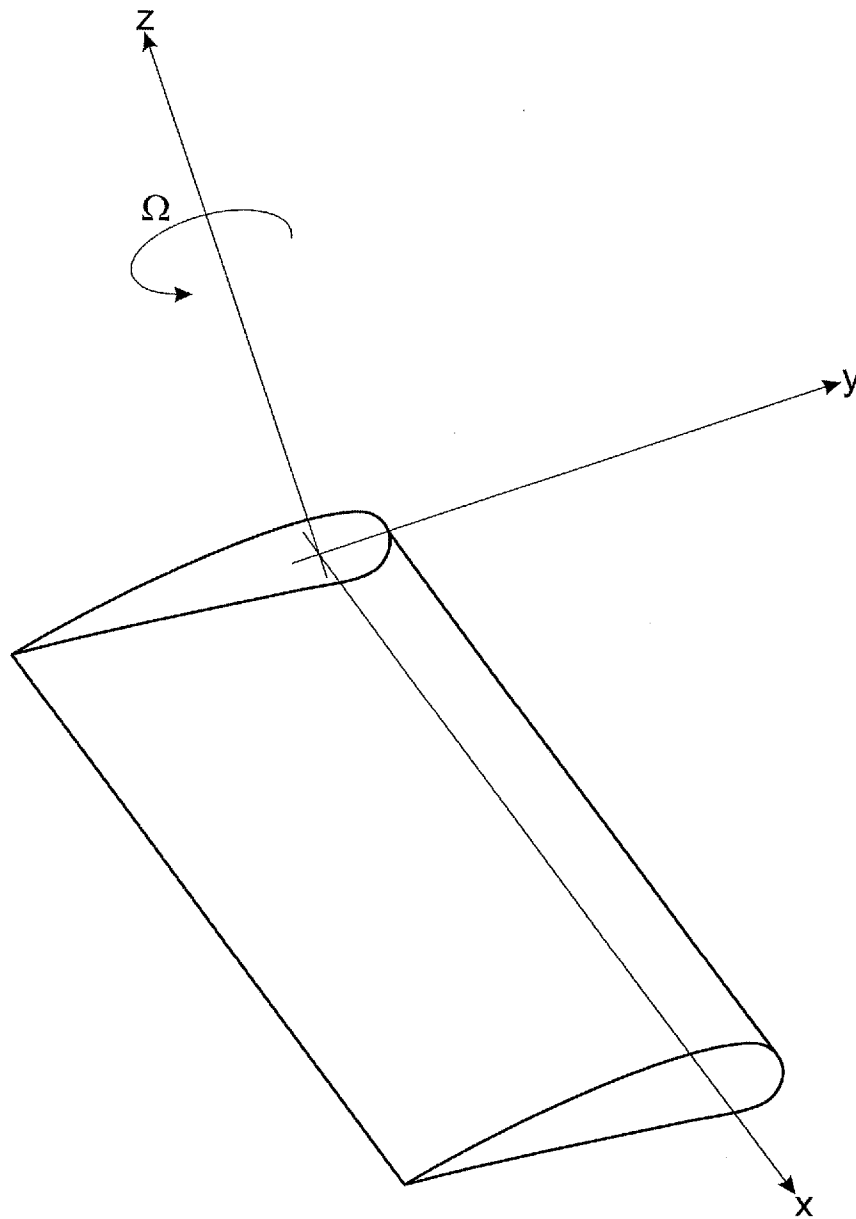


Fig. 3

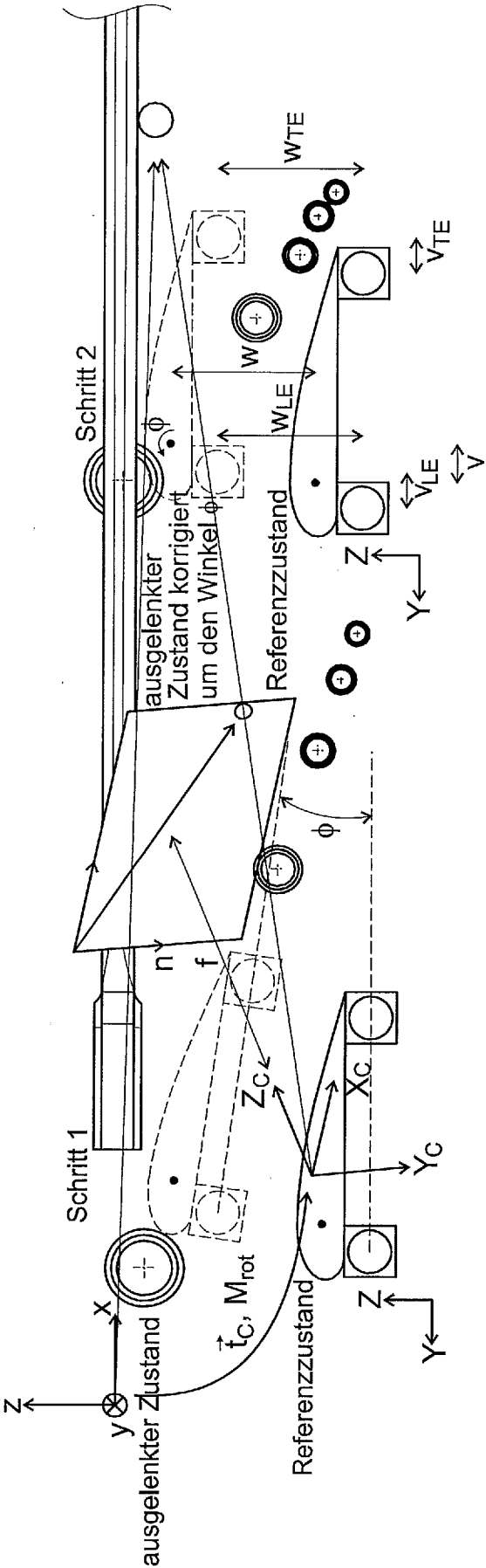


Fig. 4

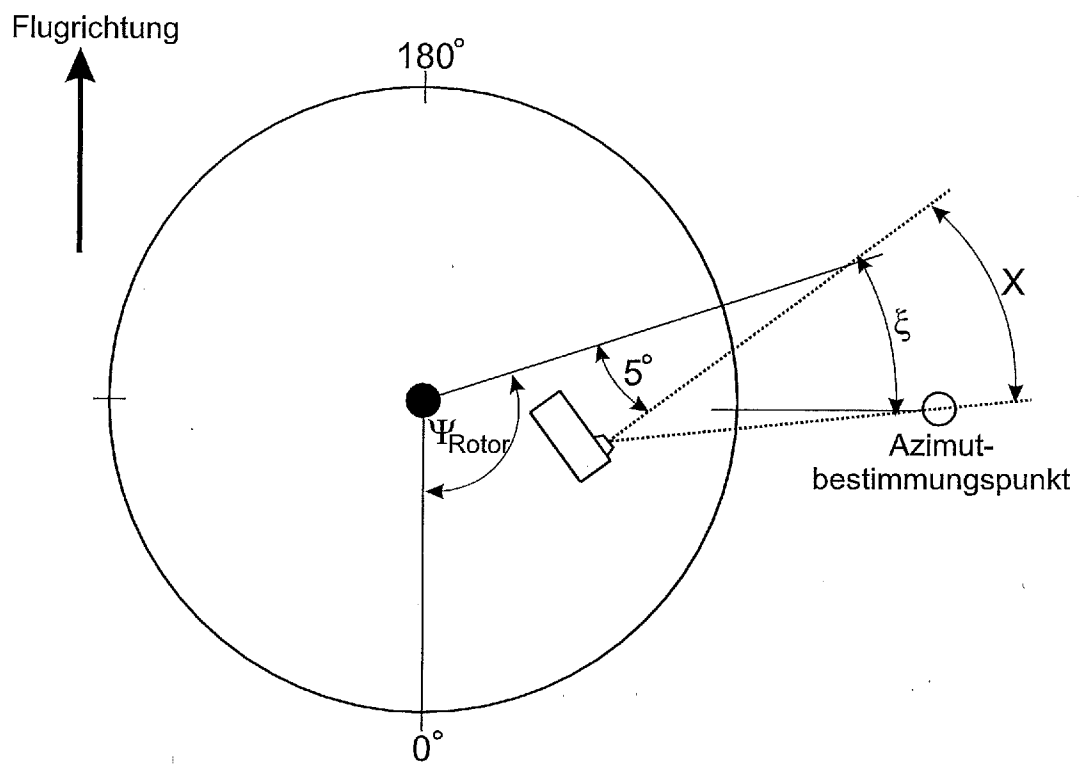


Fig. 5

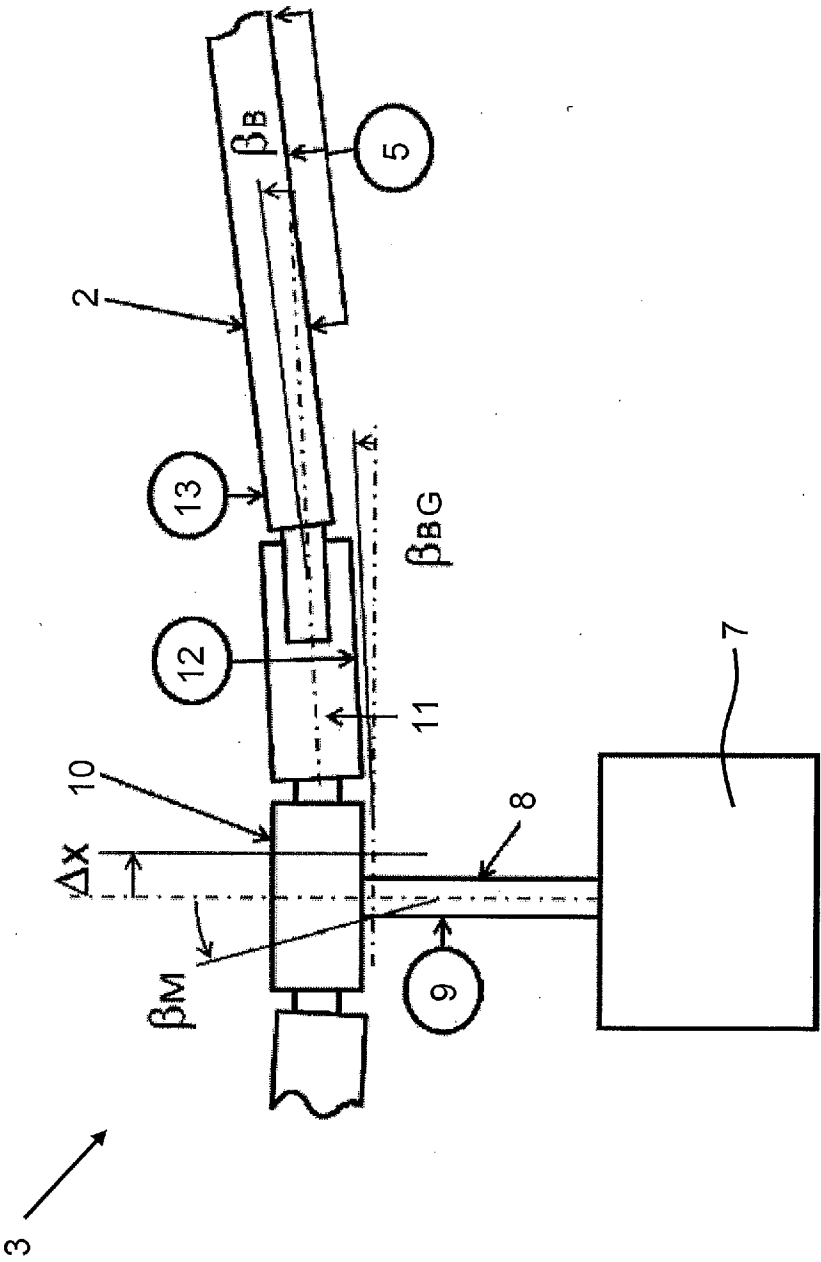
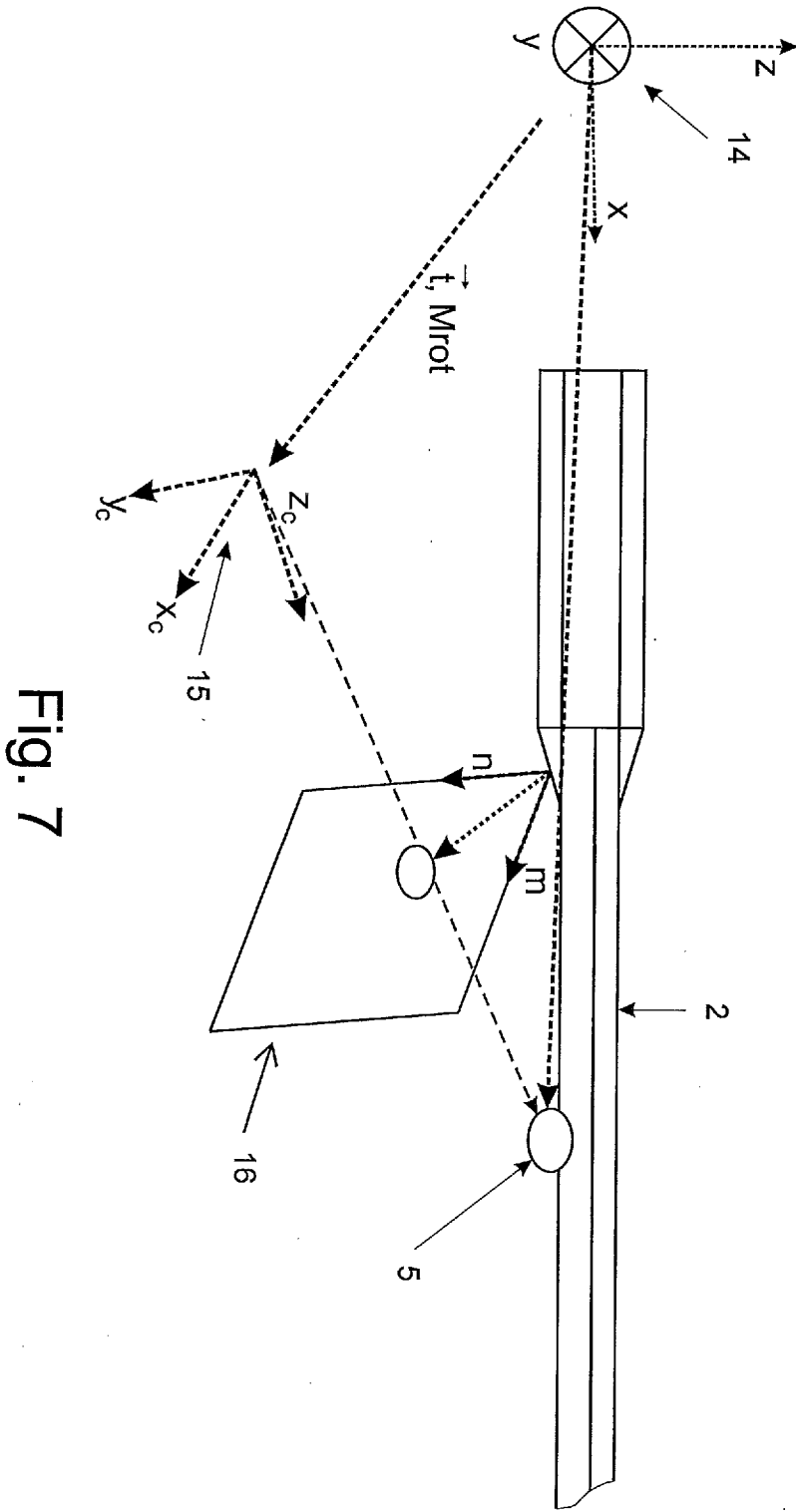


Fig. 6



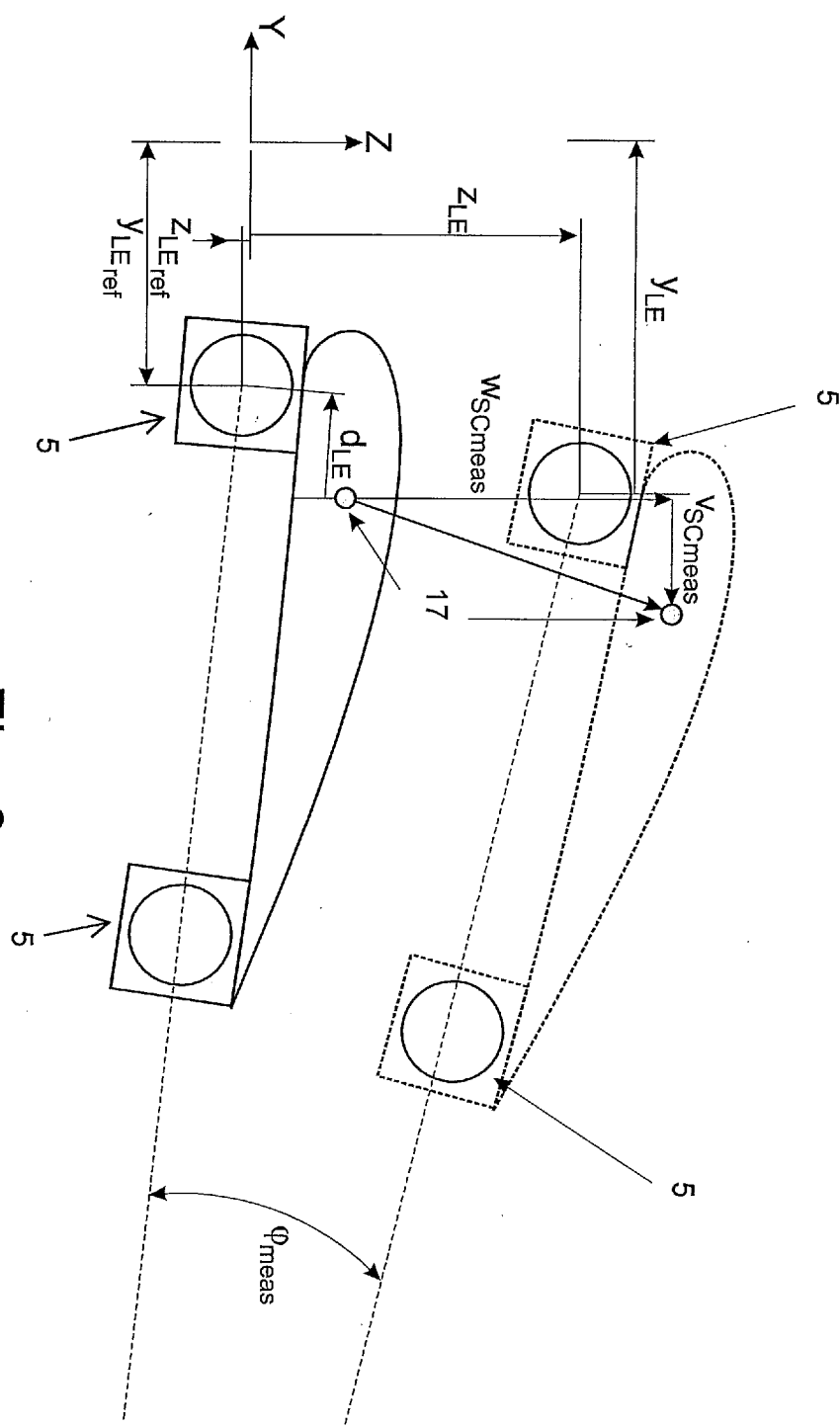


Fig. 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/059305**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER****B64C 11/16**(2006.01)i; **B64C 27/46**(2006.01)i; **B64D 45/00**(2006.01)i; **G01M 5/00**(2006.01)i; **G01B 11/16**(2006.01)i; **F03D 17/00**(2016.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B64C; B64D; G01M; G01B; F03D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 102010017749 A1 (SSB WIND SYSTEMS GMBH & CO KG [DE]) 05 January 2012 (2012-01-05) abstract; claim 1; figures 2-4,6 paragraphs [0053] - [0057], [0062]	1-6
A	DE 102011054535 B3 (DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT [DE]) 28 March 2013 (2013-03-28) abstract; claim 1; figures paragraphs [0006], [0029] - [0030]	1-5
A	DE 102009059823 A1 (DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT [DE]) 14 April 2011 (2011-04-14) abstract; figures paragraph [0029]	1,3
A	US 2016305769 A1 (BURNSIDE JASON LEE [US] ET AL) 20 October 2016 (2016-10-20) abstract; claims 1,5,8; figures paragraph [0002]	1
A	US 2010178167 A1 (JAENKER PETER [DE] ET AL) 15 July 2010 (2010-07-15) abstract; figures	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 June 2018

Date of mailing of the international search report

04 July 2018

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Nicol, Yann

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2018/059305

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
DE	102010017749	A1	05 January 2012	CN	102313634	A	11 January 2012
				CN	202274979	U	13 June 2012
				DE	102010017749	A1	05 January 2012
				EP	2591232	A1	15 May 2013
				JP	5513683	B2	04 June 2014
				JP	2013533939	A	29 August 2013
				KR	20130052604	A	22 May 2013
				US	2013093879	A1	18 April 2013
				WO	2012004020	A1	12 January 2012
DE	102011054535	B3	28 March 2013	NONE			
DE	102009059823	A1	14 April 2011	NONE			
US	2016305769	A1	20 October 2016	NONE			
US	2010178167	A1	15 July 2010	DE	102009004814	A1	22 July 2010
				US	2010178167	A1	15 July 2010

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV.	B64C11/16 F03D17/00	B64C27/46 B64D45/00 G01M5/00 G01B11/16
ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)		
B64C B64D G01M G01B F03D		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)		
EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 10 2010 017749 A1 (SSB WIND SYSTEMS GMBH & CO KG [DE]) 5. Januar 2012 (2012-01-05) Zusammenfassung; Anspruch 1; Abbildungen 2-4,6 Absätze [0053] - [0057], [0062] -----	1-6
A	DE 10 2011 054535 B3 (DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT [DE]) 28. März 2013 (2013-03-28) Zusammenfassung; Anspruch 1; Abbildungen Absätze [0006], [0029] - [0030] -----	1-5
A	DE 10 2009 059823 A1 (DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT [DE]) 14. April 2011 (2011-04-14) Zusammenfassung; Abbildungen Absatz [0029] ----- -/-	1,3
☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
26. Juni 2018		04/07/2018
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Nicol, Yann

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2016/305769 A1 (BURNSIDE JASON LEE [US] ET AL) 20. Oktober 2016 (2016-10-20) Zusammenfassung; Ansprüche 1,5,8; Abbildungen Absatz [0002] -----	1
A	US 2010/178167 A1 (JAENKER PETER [DE] ET AL) 15. Juli 2010 (2010-07-15) Zusammenfassung; Abbildungen -----	1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/059305

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102010017749 A1	05-01-2012	CN 102313634 A	11-01-2012
		CN 202274979 U	13-06-2012
		DE 102010017749 A1	05-01-2012
		EP 2591232 A1	15-05-2013
		JP 5513683 B2	04-06-2014
		JP 2013533939 A	29-08-2013
		KR 20130052604 A	22-05-2013
		US 2013093879 A1	18-04-2013
		WO 2012004020 A1	12-01-2012

DE 102011054535 B3	28-03-2013	KEINE	

DE 102009059823 A1	14-04-2011	KEINE	

US 2016305769 A1	20-10-2016	KEINE	

US 2010178167 A1	15-07-2010	DE 102009004814 A1	22-07-2010
		US 2010178167 A1	15-07-2010
