

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/028987 A1

(71) Anmelder: SSB WIND SYSTEMS GMBH & CO. KG
[DE/DE]; Neuenkirchener Straße 13, 48499 Salzbergen
(DE).

Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method for pitch angle measurement and/or for constructing a pitch angle measurement system on a rotor blade (100) of a wind turbine, the rotor blade comprising a blade root (114) and extending along a longitudinal blade axis (180). The rotor blade is rotatably mounted, by its blade root (114), to rotate about the longitudinal blade axis (180), on a rotor hub (20) of the wind turbine, the rotor hub rotating or being rotatable about a rotor axis (36). At least one chord line direction indicator (430) is firmly connected to the rotor blade (100) at a distance from the blade root (114), and defines a chord line direction indicator direction (160) indicative of a direction of a chord line (140) of the rotor blade (100) at the location of the chord line direction indicator (430). The rotor blade (100), or at least one rotor blade portion (101) of the rotor blade firmly connected to the chord line direction indicator



WO 2018/028987 A1



(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 Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(430), is produced in a mould (200) before being connected to the chord line direction indicator (430). While the rotor blade (100) or rotor blade portion (101) is in the mould (200), the chord line direction indicator (430) is firmly connected to the rotor blade (100) or rotor blade portion (101) in a position which is defined relative to the mould (200).

(57) **Zusammenfassung:** Verfahren zur Pitch-Winkelmessung und/oder zum Aufbau eines Messsystems zur Pitch-Winkelmessung an einem eine Blattwurzel (114) aufweisenden und sich in Richtung einer Blattlängsachse (180) erstreckenden Rotorblatt (100) einer Windkraftanlage, welches mit seiner Blattwurzel (114) an einer um eine Rotorachse (36) drehenden oder drehbaren Rotornabe (20) der Windkraftanlage um die Blattlängsachse (180) drehbar gelagert ist oder wird, wobei im Abstand zur Blattwurzel (114) wenigstens ein Profilschwenkungsindikator (430) fest mit dem Rotorblatt (100) verbunden wird, der eine Profilschwenkungsindikator-Richtung (160) definiert, die indikativ für eine Richtung einer Profilschne (140) des Rotorblatts (100) am Ort des Profilschwenkungsindikators (430) ist, wobei das Rotorblatt (100) oder wenigstens ein mit dem Profilschwenkungsindikator (430) fest verbundenes Rotorblattteil (101) des Rotorblatts vor seinem Verbinden mit dem Profilschwenkungsindikator (430) in einer Herstellform (200) hergestellt wird, wobei während das Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) in der Herstellform (200) einliegt, der Profilschwenkungsindikator (430) in einer Lage fest mit dem Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) verbunden wird, die relativ zu der Herstellform (200) definiert wird.

Beschreibung

Verfahren zur Pitch-Winkelmessung und/oder zum Aufbau eines Messsystems zur Pitch-Winkelmessung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Pitch-Winkelmessung und/oder zum Aufbau eines Messsystems zur Pitch-Winkelmessung an einem eine Blattwurzel aufweisenden und sich in Richtung einer Blattlängsachse erstreckenden Rotorblatt einer Windkraftanlage, welches mit seiner Blattwurzel an einer um eine Rotorachse drehenden oder drehbaren Rotornabe der Windkraftanlage um die Blattlängsachse drehbar gelagert ist oder wird, wobei im Abstand zur Blattwurzel wenigstens ein Profilsehnenrichtungsindikator fest mit dem Rotorblatt verbunden wird, der eine Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung definiert, die indikativ für eine Richtung einer Profilsehne des Rotorblatts am Ort des Profilsehnenrichtungsindikators ist, mittels wenigstens einer Torsionswinkelerfassungseinheit ein Torsionswinkel des Rotorblatts erfasst wird, um welchen die Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung relativ zu einer Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung verdreht ist, mittels einer Blattwurzelwinkelerfassungseinheit ein Blattwurzelwinkel erfasst wird, um welchen die Blattwurzel relativ zu einer Blattwurzelreferenzlage um die Blattlängsachse verdreht ist, und mittels einer Auswerteeinheit auf Basis des Torsionswinkels und des Blattwurzelwinkels ein Pitch-Winkel des Rotorblatts am Ort des Profilsehnenrichtungsindikators ermittelt

wird, wobei das Rotorblatt oder wenigstens ein mit dem Profilsehnenrichtungsindikator fest verbundenes Rotorblattteil des Rotorblatts vor seinem Verbinden mit dem Profilsehnenrichtungsindikator in einer Herstellform hergestellt wird.

Ein Rotorblatt einer Windkraftanlage bildet eine schlanke Struktur mit einer Blattwurzel und Blattquerschnitten entlang einer Blattlängsachse. Der Abstand entlang der Blattlängsachse, von der Blattwurzel aus gemessen, wird dabei als Abstandslage bezeichnet. Jedem Blattquerschnitt ist eine Profilsehnenrichtung zugeordnet, die durch eine Linie repräsentiert wird, welche die Vorderkante des Blattprofils mit der Hinterkante des Blattprofils verbindet. Eine repräsentative Profilsehnenrichtung für das Rotorblatt ist als Profilsehnenrichtung in einer vorbestimmten Abstandslage definiert.

Eine Rotornabe ist drehstarr an einer Rotorwelle der Windkraftanlage befestigt, wobei die Rotorwelle relativ zu einem Maschinenträger dreht und einen an dem Maschinenträger befestigten elektrischen Generator antreibt. Die Drehbewegung der Rotorwelle und somit der Rotornabe definiert einen Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor der Windkraftanlage. In großen Windkraftanlagen, die beispielsweise auch als Multi-Megawatt-Anlagen bezeichnet werden, ist jedes Rotorblatt an seiner Blattwurzel mittels eines Blattlagers drehbar an der Rotornabe montiert, um eine Drehbewegung des Rotorblatts relativ zu der Rotornabe um die Blattlängsachse an der Blattwurzel zu ermöglichen. Diese Drehbewegung ermöglicht es, den Anstellwinkel des Rotorblatts zu ändern. Das Ändern des

Anstellwinkels ändert die am Rotorblatt angreifenden und/oder wirkenden Auftriebskräfte und Strömungswiderstände und somit auch die vom Rotorblatt auf die Rotornabe übertragenen Belastungen.

Die repräsentative Profilsehnenrichtung ist in der Praxis schwierig zu erkennen oder zu ermitteln, da die Sicht innerhalb des Rotorblatts durch Blattholme versperrt ist, sodass ein ungehinderter Sichtkontakt zwischen der Vorderkante und der Hinterkante des Blattquerschnitts verhindert ist. Zusätzlich ist die repräsentative Profilsehnenrichtung von der Rotornabe aus nicht sichtbar, wenn vom Inneren der Rotornabe in das Rotorblatt hineingeschaut wird oder wenn das Rotorblatt von außen betrachtet wird. Dementsprechend wird an dem Rotorblatt in der Nähe der Blattwurzel eine Blattmarkierung befestigt, die es ermöglicht, das Rotorblatt mit der korrekten Drehorientierung relativ zu der Rotornabe zu montieren, indem die Blattmarkierung in eine vorbestimmte Position relativ zu einer Nabenmarkierung gebracht wird, die an der Rotornabe vorgesehen ist (siehe z.B. WO 2010/017820 A2). Ein Pitch-Winkeldrehgeber wird dann dazu verwendet, nachfolgende Drehbewegungen des Rotorblatts bezüglich der Rotornabe zu messen.

Im Betrieb der Windkraftanlage treten mehrere Arten von Pitch-Winkeln auf. In jeder ausgewählten Abstandslage ist der wahre Pitch-Winkel der Winkel zwischen der lokalen Profilsehnenrichtung und dem Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor. Da das Rotorblatt typischerweise mit einer vorbestimmten Verdrehung entlang der

Blattlängsachse hergestellt wird, ist der wahre Pitch-Winkel nicht ein einzelner Wert, sondern vielmehr eine Funktion (Pitch-Winkelfunktion) der Abstandslage. Aktuelle Windkraftanlagen verwenden jedoch je Rotorblatt nur einen einzigen Wert für den Pitch-Winkel in ihren Steuerungsalgorithmen. Um die Pitch-Winkelfunktion auf einen einzigen Wert zu reduzieren, wird ein repräsentativer wahrer Pitch-Winkel für das Rotorblatt definiert, indem der wahre Pitch-Winkel in der vorbestimmten Abstandslage gemessen wird. Insbesondere ist der repräsentative wahre Pitch-Winkel als Winkel zwischen der repräsentativen Profilsehnenrichtung und dem Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor definiert. Der repräsentative wahre Pitch-Winkel ist im Stand der Technik allerdings nicht verfügbar, sodass Windkraftanlagen in ihren Steuerungsalgorithmen derzeit nur den von dem Pitch-Winkeldrehgeber gelieferte Pitch-Winkel an der Blattwurzel (Blattwurzel-Pitch-Winkel) als repräsentativen Pitch-Winkel verwenden. Die Differenz zwischen dem Blattwurzel-Pitch-Winkel und dem repräsentativen wahren Pitch-Winkel definiert dabei einen Pitch-Winkel-Fehler.

Ein Pitch-Winkel-Fehler ist sowohl unerwünscht als auch potenziell schädlich für die Windkraftanlage. Ein gemeinsamer Pitch-Winkel-Fehler tritt auf, wenn alle Rotorblätter den gleichen Pitch-Winkel-Fehler aufweisen, was zu einer Verringerung der Windkraftanlageneffizienz führt. Nachteiliger ist jedoch der Fall, wenn die Rotorblätter einen unterschiedlichen Pitch-Winkel-Fehler aufweisen, was unsymmetrische Blattbelastungen und folglich zyklische Belastungen der

Rotorwelle der Windkraftanlage verursacht, was zu einem Ermüdungsversagen führen kann.

Ein Pitch-Winkel-Fehler tritt in der Praxis entweder aufgrund inkorrektur Einstellungen des Pitch-Winkel-Drehgebers beim Hersteller oder aufgrund von Signal-Drift, Beschädigungen oder anderen Störungen des korrekten Betriebs des Pitch-Winkel-Drehgebers im praktischen Einsatz auf und schließt Fehler mit ein, die während der Wartung der Windkraftanlage verursacht werden. Zusätzliche Pitch-Winkel-Fehler, die allerdings nicht an der Blattwurzel auftreten, treten aufgrund von Torsion des Rotorblatts über seine Längserstreckung auf, wobei die Torsion des Rotorblatts sowohl die Folge von durch Windkräfte hervorgerufenen Torsionsmomenten als auch die Folge einer strukturellen Kopplung zwischen einer Deformation des Rotorblatts in Blattlängsrichtung (z.B. Deformation der Blattflächen und/oder der Blattkanten) und Torsionsdeformation sein kann.

Es besteht somit der Wunsch, eine Möglichkeit zu schaffen, den Pitch-Winkel-Fehler im praktischen Einsatz einer Windkraftanlage, insbesondere kontinuierlich, unterbrechungsfrei und automatisch, messen zu können. Nach dem aktuellen Stand der Technik wird jedoch eine teure und langsame Methode zum Abschätzen des Pitch-Winkel-Fehlers im praktischen Einsatz eingesetzt. Diese Methode ist mit dem Einsatz von Menschen am Ort der Windkraftanlage und zusätzlich mit dem Abschalten der Windkraftanlage für eine längere Zeitdauer verbunden.

Ferner besteht der Wunsch, eine Möglichkeit zur, insbesondere zeitlich kontinuierlichen, Messung des wahren Pitch-Winkels eines Rotorblatts während des Windkraftanlagenbetriebs zu schaffen, ohne dass ein Anhalten der Windkraftanlage oder ein manueller Eingriff erforderlich ist. Ferner sollen Asymmetrien im Pitch-Winkel in einem frühen Entstehungsstadium erfasst werden können, bevor signifikante, schädliche, zyklische Belastungen auftreten.

Zusätzlich besteht der Wunsch, mehrere Messungen des wahren Pitch-Winkels entlang der Längserstreckung des Rotorblatts durchführen zu können, um die Torsionsdeformation nachvollziehen und einen genaueren Pitch-Winkel bestimmen zu können, der repräsentativ für den aerodynamischen Zustand entlang des gesamten Rotorblattes ist.

Ein erstes Ziel liegt somit insbesondere darin, eine Möglichkeit zu schaffen, die Profilsehnen-Linie eines Blattquerschnitts in einer vorbestimmten Abstandslage akkurat beschreiben zu können, und zwar konsistent über alle Rotorblätter desselben Typs.

Ein zweites Ziel liegt insbesondere darin, den wahren Pitch-Winkel zwischen der Profilsehnen-Linie an einer vorgewählten Abstandslage und dem Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor messen zu können, ohne einen Pitch-Winkeldrehgeber an der Rotornabe verwenden zu müssen, sodass die Messung

des wahren Pitch-Winkels frei von Fehlern ist, die von dem Pitch-Winkeldrehgeber hervorgerufen werden.

Ein drittes Ziel liegt insbesondere darin, den wahren Pitch-Winkel im Wesentlichen gleichzeitig in unterschiedlichen Abstandslagen messen zu können.

Ein viertes Ziel liegt insbesondere darin, den wahren Pitch-Winkel in einer vorbestimmten Abstandslage an ein Steuerungssystem der Windkraftanlage melden zu können, sodass präzisere Windkraftanlage-Steuerungsalgorithmen ermöglicht werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Pitch-Winkel des Rotorblatts genauer bestimmen zu können.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Bevorzugte Weiterbildungen des Verfahrens sind in den Unteransprüchen und in der nachfolgenden Beschreibung gegeben.

Das eingangs genannte Verfahren zur Pitch-Winkelmessung und/oder zum Aufbau eines Messsystems zur Pitch-Winkelmessung an einem eine Blattwurzel aufweisenden und sich in Richtung einer Blattlängsachse erstreckenden Rotorblatt einer Windkraftanlage, welches mit seiner Blattwurzel an einer um eine Rotor-

achse drehenden oder drehbaren Rotornabe der Windkraftanlage um die Blattlängsachse drehbar gelagert ist oder wird, wobei

- im Abstand zur Blattwurzel ein oder wenigstens ein Profilsehnenrichtungsindikator fest mit dem Rotorblatt verbunden wird, der eine Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung definiert, die indikativ für eine Richtung einer Profilsehne des Rotorblatts am Ort des Profilsehnenrichtungsindikators ist,
 - mittels einer oder wenigstens einer Torsionswinkelerfassungseinheit ein Torsionswinkel des Rotorblatts erfasst wird, um welchen die Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung relativ zu einer Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung verdreht ist,
 - mittels einer oder wenigstens einer Blattwurzelwinkelerfassungseinheit ein Blattwurzelwinkel erfasst wird, um welchen die Blattwurzel relativ zu einer Blattwurzelreferenzlage um die Blattlängsachse verdreht ist, und
 - mittels einer oder wenigstens einer Auswerteeinheit auf Basis des Torsionswinkels und des Blattwurzelwinkels ein Pitch-Winkel des Rotorblatts am Ort des Profilsehnenrichtungsindikators ermittelt wird, wobei
 - das Rotorblatt oder wenigstens ein mit dem Profilsehnenrichtungsindikator fest verbundenes Rotorblattteil des Rotorblatts, insbesondere vor seinem Verbinden mit dem Profilsehnenrichtungsindikator, in einer oder wenigstens einer Herstellform hergestellt wird,
- wird erfindungsgemäß derart weitergebildet, dass
- während das, insbesondere hergestellte, Rotorblatt oder Rotorblattteil,

vorzugsweise noch, in der Herstellform einliegt, der Profilversehnungsrichtungsindikator in einer, vorzugsweise relativ zu der Herstellform definierten, Lage fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden wird, die insbesondere relativ zu der Herstellform definiert wird.

In der Herstellform befindet sich das Rotorblatt oder Rotorblattteil in einem definierten Zustand, der auch für jedes andere in der Form hergestellte Rotorblatt oder Rotorblattteil reproduzierbar ist. Ferner bildet dieser Zustand einen lastfreien Zustand des Rotorblatts oder Rotorblattteils, der in praktischer Hinsicht nicht mehr zu erreichen ist, wenn das Rotorblatt oder Rotorblattteil einmal der Herstellform entnommen worden ist, da das Rotorblatt oder Rotorblattteil in der Regel bereits aufgrund seines Eigengewichts außerhalb der Herstellform eine Verformung erfährt. Die Herstellform bildet somit ein Bezugssystem, in welchem das bereits hergestellte aber noch in der Herstellform einliegende Rotorblatt oder Rotorblattteil in Konstruktionslage vorliegt. Da ferner das Rotorblatt oder Rotorblattteil, nachdem es der Herstellform entnommen worden ist, im Bereich der Blattwurzel praktisch keine oder eine lediglich geringe oder vernachlässigbare Verformung erfährt, auch im praktischen Einsatz, kann über die Blattwurzel des Rotorblatts ein eindeutiger Bezug zwischen dem Rotorblatt und der Herstellform geschaffen werden.

Dadurch, dass die Lage, in welcher der Profilversehnungsrichtungsindikator fest mit dem in der Herstellform einliegenden Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden wird,

relativ zu der Herstellform definiert wird, wird insbesondere auch die Profilschwenkungsrichtungsindektor-Referenzrichtung definiert und/oder bestimmt. Diese Definition und/oder Bestimmung der Profilschwenkungsrichtungsindektor-Referenzrichtung erfolgt somit insbesondere im lastfreien Zustand des Rotorblatts, sodass der Torsionswinkel mit einer größeren Genauigkeit als bei herkömmlichen Lösungen erfassbar ist. Somit ist aber auch der Pitch-Winkel mit einer größeren Genauigkeit ermittelbar. Ein Pitch-Winkel-Fehler ist daher vermeidbar oder zumindest deutlich reduzierbar.

Die Drehbewegung der Rotornabe um die Rotorachse definiert insbesondere einen Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor und/oder die Drehbewegung der Rotornabe um die Rotorachse ist insbesondere durch den oder einen Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor definiert und/oder charakterisiert.

Bevorzugt wird das Rotorblatt oder Rotorblattteil nach seiner Herstellung der Herstellform entnommen und/oder von dieser separiert. Vorteilhaft wird der Profilschwenkungsrichtungsindektor fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden, bevor das, insbesondere hergestellte, Rotorblatt oder Rotorblattteil der Herstellform entnommen und/oder von dieser separiert wird.

Gemäß einer Weiterbildung wird das Rotorblatt oder Rotorblattteil aus einem Rotorblattwerkstoff hergestellt, der ein aushärtbares Material umfasst. Bevorzugt wird der Profilschwenkungsrichtungsindektor nach dem Aushärten des aushärtbaren

Materials fest mit dem Rotorblatt oder dem Rotorblattteil verbunden. Das aushärtbare Material ist insbesondere ein Kunststoff und/oder Kunstharz, wie z.B. Epoxid. Bevorzugt wird die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung nach dem Aushärten des aushärtbaren Materials definiert und/oder bestimmt und/oder ermittelt.

Bevorzugt ist oder wird ein oder wenigstens ein Profilsehnenrichtungsindikatorhalter vorgesehen, mittels welchem der Profilsehnenrichtungsindikator gehalten wird. Beispielsweise umfasst der Profilsehnenrichtungsindikator den oder den wenigstens einen Profilsehnenrichtungsindikatorhalter. Vorteilhaft wird der Profilsehnenrichtungsindikatorhalter, bevorzugt in der oder einer, vorzugsweise relativ zu der Herstellform definierten, Lage, die insbesondere relativ zu der Herstellform definiert wird, fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden, während das, insbesondere hergestellte, Rotorblatt oder Rotorblattteil, vorzugsweise noch, in der Herstellform einliegt. Vorteilhaft wird nach dem Verbinden des Profilsehnenrichtungsindikatorhalters mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil der Profilsehnenrichtungsindikator an dem Profilsehnenrichtungsindikatorhalter befestigt, bevorzugt während das, insbesondere hergestellte, Rotorblatt oder Rotorblattteil, vorzugsweise noch, in der Herstellform einliegt.

Gemäß einer Ausgestaltung wird die Lage des Profilsehenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform mittels eines oder wenigstens eines Werkzeugs definiert, welches relativ zu der Herstellform ausgerichtet wird. Somit kann die Lage, in welcher der Profilsehenrichtungsindikator relativ zu der Herstellform fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden wird, mit größerer Genauigkeit bestimmt werden, was auch zu einer größeren Genauigkeit des Pitch-Winkels führt. Insbesondere ist somit der Pitch-Winkel mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ$ oder $0,2^\circ$ erzielbar und/oder ermittelbar.

Bevorzugt wird die Herstellform mit mehreren Herstellform-Markierungen versehen, an welchen das Werkzeug angesetzt wird und/oder mittels welchen das Werkzeug relativ zu der Herstellform ausgerichtet wird. Hierdurch wird das Ausrichten des Werkzeugs relativ zu der Herstellform erleichtert und eine einfache Möglichkeit zur Reproduzierbarkeit der Ausrichtung geschaffen.

Gemäß einer ersten Variante ist das Werkzeug ein Montagewerkzeug, wobei die Herstellform-Markierungen Montagemarkierungen umfassen, an welchen das Montagewerkzeug angesetzt wird und/oder mittels welchen das Montagewerkzeug relativ zu der Herstellform ausgerichtet wird. Bevorzugt wird mittels des Montagewerkzeugs der Profilsehenrichtungsindikator oder der oder wenigstens ein Profilsehenrichtungsindikatorhalter zum Halten des Profilsehenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform positioniert, wonach

insbesondere der Profilsehnenrichtungsindikator oder Profilsehnenrichtungsindikatorhalter fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden wird.

Gemäß einer zweiten Variante ist das Werkzeug ein Messwerkzeug, wobei die Herstellform-Markierungen Messmarkierungen umfassen, an welchen das Messwerkzeug angesetzt wird und/oder mittels welchen das Messwerkzeug relativ zu der Herstellform ausgerichtet wird. Bevorzugt wird mittels des Messwerkzeugs die Lage des, insbesondere bereits mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil fest verbundenen, Profilsehnenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform, vorzugsweise optisch, erfasst und/oder bestimmt und somit insbesondere definiert.

Bevorzugt wird die Herstellform mit den oder mehreren Montagemarkierungen versehen, an welchen das oder ein oder wenigstens ein Montagewerkzeug angesetzt wird und/oder mittels welchen das oder ein oder wenigstens ein Montagewerkzeug relativ zu der Herstellform ausgerichtet wird. Insbesondere wird mittels des Montagewerkzeugs der Profilsehnenrichtungsindikator oder der oder wenigstens ein Profilsehnenrichtungsindikatorhalter zum Halten des Profilsehnenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform positioniert, wonach insbesondere der Profilsehnenrichtungsindikator oder Profilsehnenrichtungsindikatorhalter fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden wird.

Vorteilhaft wird die Herstellform mit den oder mehreren Messmarkierungen versehen, an welchen das oder ein oder wenigstens ein Messwerkzeug angesetzt wird und/oder mittels welchen das oder ein oder wenigstens ein Messwerkzeug relativ zu der Herstellform ausgerichtet wird. Bevorzugt wird mittels des Messwerkzeugs die Lage des, insbesondere bereits mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil fest verbundenen, Profilsehnenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform, vorzugsweise optisch, erfasst und/oder bestimmt und somit insbesondere definiert.

Das Messwerkzeug weist bevorzugt einen oder wenigstens einen optischen Referenzsensor auf, mittels welchem die Lage des, insbesondere bereits mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil fest verbundenen, Profilsehnenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform optisch erfasst und/oder bestimmt wird. Der Referenzsensor ist oder umfasst z.B. eine Kamera, insbesondere eine Digitalkamera.

Das Messwerkzeug kann auch zum Kalibrieren eines Profilsehnenrichtungsindikators eingesetzt werden, der z.B. mit Hilfe des Montagewerkzeugs positioniert und/oder montiert worden ist. Gemäß einer Weiterbildung wird mittels des Messwerkzeugs die Lage des, insbesondere bereits mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil fest verbundenen, Profilsehnenrichtungsindikators relativ zu der Herstellform erfasst und/oder bestimmt und vorzugsweise somit der Profilsehnenrichtungsindikator kalibriert. Bevorzugt wird durch die

Kalibrierung ein Profilsehnenrichtungslageindikator gebildet, der die Lage des Profilsehnenrichtungsindikators, insbesondere bezüglich der Herstellform und/oder der Blattwurzel, definiert.

Vorzugsweise umfassen die Herstellform-Markierungen und/oder die Montagemarkierungen und/oder die Messmarkierung Eingriffselemente, die, vorzugsweise zum Ausrichten des Werkzeugs und/oder des Montagewerkzeugs und/oder des Messwerkzeugs, mit an dem Werkzeug und/oder dem Montagewerkzeug und/oder dem Messwerkzeug vorgesehenen Gegen-Eingriffselementen, insbesondere formschlüssig, in Eingriff gebracht werden oder werden können. Bei den Eingriffselementen handelt es sich z.B. um Stifte oder Löcher. Ferner handelt es sich bei den Gegen-Eingriffselementen z.B. um Löcher oder Stifte. Dabei kann vorteilhaft jeweils ein Stift des Eingriffselements oder Gegen-Eingriffselements mit einem Loch des Gegen-Eingriffselements oder Eingriffselements in Eingriff gebracht werden.

Gemäß einer Ausgestaltung wird die Profilsehnenrichtungslageindikator-Referenzrichtung definiert und/oder bestimmt und/oder ermittelt, während das Rotorblatt oder Rotorblattteil in der Herstellform einliegt. Bevorzugt wird die Profilsehnenrichtungslageindikator-Referenzrichtung relativ zu der Herstellform definiert und/oder bestimmt und/oder ermittelt. Somit wird insbesondere eine eindeutige Lagebeziehung zwischen der Profilsehnenrichtungslageindikator-Referenzrichtung und der Blattwurzel geschaffen. Insbesondere ist die Profilsehnenrichtungslageindikator-

Referenzrichtung indikativ für die Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung in einem nicht tordierten Zustand des Rotorblatts. Bevorzugt entspricht die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung der Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung im unbelasteten Zustand des Rotorblatts oder Rotorblattteils. Vorteilhaft entspricht die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung der Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung, wenn der Profilsehnenrichtungsindikator fest mit dem in der Herstellform einliegenden Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden ist.

Das Rotorblatt wird z.B. als einteiliges Rotorblatt und/oder in Form einer monolithischen Einheit hergestellt. Gemäß einer Alternative wird das Rotorblatt aus zwei Rotorblatt halveschalen zusammengesetzt, von denen eine oder wenigstens eine insbesondere das Rotorblattteil bildet.

Gemäß einer Weiterbildung wird der Profilsehnenrichtungsindikator mit wenigstens zwei entlang der Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung nebeneinander angeordneten Profilsehnenrichtungsindikator-Markierungen versehen. Bevorzugt weist die Torsionswinkelerfassungseinheit einen oder wenigstens einen, insbesondere optischen, Sensor auf, mittels welchem die Profilsehnenrichtungsindikator-Markierungen, insbesondere optisch, erfasst werden. Der optische Sensor ist oder umfasst z.B. eine Kamera, insbesondere eine Digitalkamera. Bevorzugt sind die Profilsehnenrichtungsindikator-Markierungen als Reflektoren oder jeweils als Reflektor ausgebildet. Vorzugweise

umfasst die Torsionswinkelerfassungseinheit eine Beleuchtungseinheit, mittels welcher die Profilsehnenrichtungsindikator-Markierungen beleuchtet werden oder werden können.

Bevorzugt wird der oder der wenigstens eine Profilsehnenrichtungsindikator der Torsionswinkelerfassungseinheit zugerechnet. Insbesondere umfasst die Torsionswinkelerfassungseinheit den oder den wenigstens einen Profilsehnenrichtungsindikator.

Gemäß einer Ausgestaltung bildet oder umfasst der Profilsehnenrichtungsindikator und/oder die Torsionswinkelerfassungseinheit eine oder wenigstens eine Messeinheit, die insbesondere fest mit dem Profilsehnenrichtungsindikator verbunden ist oder diesen bildet. Die Messeinheit ist oder umfasst insbesondere eine inertielle Messeinheit. Bevorzugt ist oder umfasst die Messeinheit einen oder wenigstens einen, insbesondere mehrachsigen, vorzugsweise dreiachsigen, Beschleunigungssensor und/oder gyroskopischen Sensor. Insbesondere sind diese Achsen linear unabhängig voneinander und/oder nicht komplanar. Vorzugsweise verlaufen diese Achsen senkrecht zueinander. Beispielsweise umfasst die Messeinheit ein oder wenigstens ein Gyroskop. Insbesondere ist mittels der Messeinheit der Torsionswinkel oder ein repräsentativer Torsionswinkel erfassbar, der indikativ für den Torsionswinkel ist.

Beispielsweise ist oder wird die Torsionswinkelerfassungseinheit am Ort des Profilverbiegungsrichtungsindektors angeordnet und/oder am Ort des Profilverbiegungsrichtungsindektors fest mit dem Rotorblatt verbunden. Bevorzugt ist oder wird die Torsionswinkelerfassungseinheit aber an oder im Bereich der Blattwurzel fest mit dem Rotorblatt verbunden. In diesem Fall vereinfacht sich insbesondere die mechanische und/oder elektrische Installation der Torsionswinkelerfassungseinheit.

Gemäß einer Weiterbildung wird ein blattwurzelfestes Bezugssystem definiert und vorzugsweise der Blattwurzel, insbesondere fest, zugeordnet. Bei dem blattwurzelfesten Bezugssystem handelt es sich insbesondere um ein blattwurzelfestes Koordinatensystem. Bevorzugt umfasst das blattwurzelfeste Bezugssystem zwei oder drei Achsen, die insbesondere linear unabhängig voneinander und/oder nicht komplanar sind. Vorzugsweise verlaufen die Achsen des blattwurzelfesten Bezugssystems senkrecht zueinander. Das blattwurzelfeste Bezugssystem wird insbesondere im unbelasteten Zustand des Rotorblatts definiert. Beispielsweise wird das blattwurzelfeste Bezugssystem definiert, wenn das Rotorblatt oder Rotorblattteil in der oder der wenigstens einen Herstellform einliegt. Bevorzugt wird das blattwurzelfeste Bezugssystem relativ zu der oder der wenigstens einen Herstellform definiert.

Insbesondere ist oder wird die Blattwurzelreferenzlage in dem oder einem blattwurzelfesten Bezugssystem definiert. Ferner ist oder wird die Profil-sehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung bevorzugt in dem oder einem blattwurzelfesten Bezugssystem definiert. Vorzugsweise wird der Torsionswinkel in dem oder einem blattwurzelfesten Bezugssystem erfasst. Vorteilhaft wird der Blattwurzelwinkel in dem oder einem blattwurzelfesten Bezugssystem erfasst.

Gemäß einer Ausgestaltung sind oder werden die Blattwurzelreferenzlage und die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung relativ zueinander festgelegt, vorzugsweise in oder bezüglich des oder eines blattwurzelfesten Bezugssystem. Somit ist es insbesondere möglich, den Torsionswinkel und den Blattwurzelwinkel in eine Beziehung zueinander zu setzen, die das Ermitteln und/oder Bestimmen des Pitch-Winkels erlaubt.

Gemäß einer Weiterbildung ist oder wird die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit an oder im Bereich der Blattwurzel fest mit dem Rotorblatt verbunden. Vorzugsweise ist die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit relativ zu der Torsionswinkelerfassungseinheit ortsfest.

Die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit ist oder umfasst bevorzugt eine inertielle Messeinheit. Insbesondere ist oder umfasst die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit einen oder wenigstens einen, insbesondere mehrachsigen, vorzugsweise dreiachsigen, Beschleunigungssensor und/oder gyroskopischen Sensor.

Beispielsweise umfasst die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit ein oder wenigstens ein Gyroskop. Insbesondere ist die Blattwurzelreferenzlage indikativ für einen nicht verdrehten Zustand der Blattwurzel.

Das Messsystem zur Pitch-Winkelmessung umfasst bevorzugt den Profilsennenrichtungsindikator, die Torsionswinkelerfassungseinheit, die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit und die Auswerteeinheit. Bevorzugt sind die Torsionswinkelerfassungseinheit und die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit, insbesondere elektrisch und/oder optisch und/oder per Funk, mit der Auswerteeinheit verbunden. Bevorzugt wirkt die Torsionswinkelerfassungseinheit mit dem Profilsennenrichtungsindikator zusammen.

Die Auswerteeinheit ist oder umfasst bevorzugt eine Recheneinheit. Bei der Recheneinheit handelt es sich insbesondere um eine elektronische Recheneinheit. Vorteilhaft umfasst die Auswerteeinheit und/oder die Recheneinheit einen oder wenigstens einen Digitalrechner, beispielsweise einen oder wenigstens einen Mikroprozessor und/oder digitalen Signalprozessor und/oder Mikrocontroller. Vorzugsweise umfasst die Auswerteeinheit eine Speichereinheit. Bei der Speichereinheit handelt es sich insbesondere um eine elektronische Speichereinheit. Vorteilhaft umfasst die Auswerteeinheit und/oder die Speichereinheit einen Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM) und/oder einen Festwertspeicher (ROM) und/oder einen anderen elektronischen Speicher.

Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Pitch-Winkelmessung an einem eine Blattwurzel aufweisenden und sich in Richtung einer Blattlängsachse erstreckenden Rotorblatt einer Windkraftanlage, welches mit seiner Blattwurzel an einer um eine Rotorachse drehenden oder drehbaren Rotornabe der Windkraftanlage um die Blattlängsachse drehbar gelagert ist oder wird, wobei

- im Abstand zur Blattwurzel ein oder wenigstens ein Profilsehenrichtungsindikator fest mit dem Rotorblatt verbunden wird, der eine Profilsehenrichtungsindikator-Richtung definiert, die indikativ für eine Richtung einer Profilsehne des Rotorblatts am Ort des Profilsehenrichtungsindikators ist,
- ein Torsionswinkel des Rotorblatts erfasst wird, um welchen die Profilsehenrichtungsindikator-Richtung relativ zu einer Profilsehenrichtungsindikator-Referenzrichtung verdreht ist,
- ein Blattwurzelwinkel erfasst wird, um welchen die Blattwurzel relativ zu einer Blattwurzelreferenzlage um die Blattlängsachse verdreht ist, und
- auf Basis des Torsionswinkels und des Blattwurzelwinkels ein Pitch-Winkel des Rotorblatts am Ort des Profilsehenrichtungsindikators ermittelt wird, wobei
- das Rotorblatt oder wenigstens ein mit dem Profilsehenrichtungsindikator fest verbundenes Rotorblattteil des Rotorblatts, insbesondere vor seinem Verbinden mit dem Profilsehenrichtungsindikator, in einer oder wenigstens einer Herstellform hergestellt wird, und wobei
- während das, insbesondere hergestellte, Rotorblatt oder Rotorblattteil, vorzugsweise noch, in der Herstellform einliegt, der Profilsehenrichtungsindikator

in einer, vorzugsweise relativ zu der Herstellform definierten, Lage fest mit dem Rotorblatt oder Rotorblattteil verbunden wird, die insbesondere relativ zu der Herstellform definiert wird.

Dieses Verfahren kann gemäß allen im Zusammenhang mit dem vorherigen Verfahren erläuterten Ausgestaltungen weitergebildet sein.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 eine perspektivische Teildarstellung einer Windkraftanlage,

Fig. 2 in schematischer Darstellung einen Querschnitt eines Rotorblatts der Windkraftanlage,

Fig. 3 in schematischer Darstellung eine Innenansicht des Rotorblatts von dessen Blattwurzel aus gesehen,

Fig. 4 eine schematische Seitenansicht eines Rotorblatts gemäß einer Variante mit einem Beschleunigungssensor,

Fig. 5 eine schematische, perspektivische Ansicht einer Rotorblatthalbschale des Rotorblatts und einer Herstellform zur Herstellung der Rotorblatthalbschale,

Fig. 6 eine schematische, perspektivische Ansicht der in der Herstellform einliegenden Rotorblatthalbschale und eines mechanischen Referenzsystems gemäß einer ersten Ausführungsform,

Fig. 7 eine schematische Schnittansicht der Herstellform und der Rotorblatthalbschale, wobei ein erster Montageschritt zur Montage von Reflektoren dargestellt ist,

Fig. 8 eine schematische Schnittansicht der Herstellform und der Rotorblatthalbschale, wobei ein zweiter Montageschritt zur Montage der Reflektoren dargestellt ist,

Fig. 9 eine schematische Schnittansicht der Herstellform und der Rotorblatthalbschale, wobei ein dritter Montageschritt zur Montage der Reflektoren dargestellt ist,

Fig. 10 eine schematische Schnittansicht der Herstellform und der Rotorblatthalbschale, wobei ein vierter Montageschritt zur Montage der Reflektoren dargestellt ist,

Fig. 11 eine schematische Schnittansicht der Herstellform und der Rotorblatthalbschale, auf die eine andere Rotorblatthalbschale aufgesetzt wird,

Fig. 12 eine schematische Stirnansicht eines Rotorblatts und einer Herstellform zur Herstellung des oder eines Rotorblatts nach einem alternativen Herstellungsverfahren und

Fig. 13 eine schematische Stirnansicht des Rotorblatts und der Herstellform nach Fig. 12, wobei ein Hilfsrahmen gemäß einer zweiten Ausführungsform auf die blattwurzelseitige Stirnseite der Herstellform montiert ist.

Aus Fig. 1 ist eine perspektivische Teildarstellung einer Windkraftanlage ersichtlich, die eine an einem Maschinenträger 10 um eine Rotorachse 35 drehbar gelagerte Rotorwelle 30 aufweist. Eine Rotornabe 20 ist drehstarr mit der Rotorwelle 30 verbunden, die um die Rotorachse 35 relativ zu dem Maschinenträger 10 dreht und einen an diesem befestigten elektrischen Generator 50 antreibt. Die Drehbewegung der Rotorwelle 30 und/oder der Rotornabe 20 definiert einen Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor 36 (siehe Fig. 3) der Windkraftanlage und/oder die Drehbewegung der Rotorwelle 30 und/oder der Rotornabe 20 ist durch den oder einen Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor 36 definiert. Der Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor 36 charakterisiert somit insbesondere die Drehbewegung der Rotorwelle 30 und/oder der Rotornabe 20 um die Rotorachse 35. Einem Rotorblatt 100 ist eine Blattlängsachse 180 zugeordnet, entlang welcher sich das Rotorblatt 100 erstreckt. Das Rotorblatt 100 weist eine Blattwurzel 114 auf und ist mit dieser mittels eines Blattlagers 40 drehbar an der Rotornabe 20 gelagert, um eine Drehbewegung des Rotorblatts

100 relativ zu der Rotornabe 20 um die Längsachse 180 an der Blattwurzel 114 zu ermöglichen. Diese Drehbewegung ermöglicht es, den Anstellwinkel des Rotorblatts 100 zu ändern. Das Ändern des Anstellwinkels ändert die am Rotorblatt 100 angreifenden und/oder wirkenden Auftriebskräfte und Strömungswiderstände und somit die von dem Rotorblatt 100 auf die Rotornabe 20 übertragenen Belastungen. Das Rotorblatt 100 weist eine Vorderkante 106 und eine Hinterkante 107 auf und ist aus einer oberen Rotorblattblatthalbschale 102 und einer unteren Rotorblattblatthalbschale 101 zusammengesetzt, wobei die Rotorblattblatthalbschalen 101 und 102 an den Kanten 106 und 107 fest miteinander verbunden sind. Ein von der Blattwurzel 114 aus gemessener Abstand entlang der Blattlängsachse 180 wird insbesondere als Abstandslage bezeichnet. Bevorzugt wird ein Ort oder eine Lage, der oder die entlang der Blattlängsachse 180 einen, insbesondere vorbestimmten, Abstand zur Blattwurzel 114 aufweist, als Abstandslage bezeichnet.

Aus Fig. 2 ist ein Blattquerschnitt (Blattprofil) 105 des Rotorblatts 100 ersichtlich, wobei dem Blattquerschnitt 105 eine Profilsehne zugeordnet ist, die durch eine, insbesondere gerade, Linie (Profilsehnen-Linie) definiert ist, welche sich von der Vorderkante 106 des Blattprofils bis zur Hinterkante 107 des Blattprofils erstreckt. Die Profilsehne weist eine Profilsehnenrichtung auf, die durch eine, insbesondere gerade, Linie oder Gerade definiert ist, welche die Vorderkante 106 des Blattprofils mit der Hinterkante 107 des Blattprofils verbindet und/oder durch die Vorderkante

106 des Blattprofils und die Hinterkante 107 des Blattprofils verläuft. Die Profilschneckenrichtung charakterisiert insbesondere die Richtung der Profilschneckenlinie. Da sich das Blattprofil 105 des Rotorblatts 100 entlang der Längsachse 180 ändert, ändert sich auch die Profilschneckenrichtung entlang der Blattlängsachse 180. Jeder Blattquerschnitt definiert eine somit seine eigene Profilschneckenrichtung. Eine erste Profilschneckenrichtung 140 für das Rotorblatt 100 ist als Profilschneckenrichtung an einer ersten vorbestimmten Abstandslage definiert.

Teil 1: Physikalische Messung des Pitch-Winkels

Fig. 3 zeigt in schematischer Darstellung eine Innenansicht des Rotorblatts 100 von dessen Blattwurzel 114 aus gesehen. Es wird ein vorgewähltes Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$ definiert und der Blattwurzel 114 fest zugeordnet, sodass das Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$ ein blattwurzelfestes Bezugssystem bildet. Ferner ist oder wird das Blattkoordinatensystem in Bezug auf die geometrische Konfiguration des Rotorblatts 100 eindeutig definiert, wenn das Rotorblatt 100 keiner Belastung ausgesetzt ist. Bevorzugt wird, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, die b_3 -Achse, ausgehend von der Blattwurzel 114, entlang und/oder in Richtung der Blattlängsachse 180 orientiert. Die Achsen b_1 und b_2 spannen somit insbesondere eine Ebene auf, in welcher entweder die Blattwurzel 114 liegt oder näherungsweise liegt oder die indikativ für eine Ebene ist, in welcher die Blattwurzel 114 liegt oder näherungsweise liegt. Bevorzugt liegt

der Ursprung des Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$ auf der Blattlängsachse 180.

Ein Messsystem zur Ermittlung des oder eines Pitch-Winkels θ , der hier insbesondere ein wahrer Pitch-Winkel ist, umfasst eine Hauptmesseinheit 460, die eine Torsionswinkelerfassungseinheit 450 und eine Blattwurzelwinkelerfassungseinheit 490 in Form eines Gyroskops aufweist (siehe Fig. 1). Die Torsionswinkelerfassungseinheit 450 ist ein Mittel zum Messen des oder eines Winkelversatzes von wenigstens der ersten Profilsehnenrichtung 140 relativ zu dem vorgewählten Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$, welches relativ zur Blattwurzel 114 fest ist.

Das Gyroskop 490 ist in der Nähe des Blattlagers 40 im Bereich der Blattwurzel 114 des Rotorblatts 100 angeordnet, sodass das Gyroskop 490 im Wesentlichen keine Verschiebung oder Verdrehung relativ zu dem Blattlager 40 und folglich zu dem vorgewählten Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$ erfährt, wenn das Rotorblatt 100 unter Belastung steht.

Das Gyroskop 490 definiert drei senkrechte Achsen $\{a_1, a_2, a_3\}$ (siehe Fig. 3) und misst die Projektionen des Hauptdrehgeschwindigkeitsvektors 36 auf diese Achsen $\{a_1, a_2, a_3\}$. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird die a_3 -Achse ausgehend von der Blattwurzel 114 entlang und/oder in Richtung der Blattlängsachse 180 orientiert. Ferner werden die a_1 -Achse und die a_2 -Achse in

einer beliebigen aber vorbestimmten und bekannten Richtung orientiert. Da die Achsen $\{a_1, a_2, a_3\}$ zusammen mit dem Rotorblatt 100 drehen, wenn das Rotorblatt 100 eine Drehung um die Blattlängsachse 180 erfährt, der Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor 36 sich aber bei dieser Drehung nicht mit dreht, erlauben die vorgenannten Projektionen dem Gyroskop 490 einen Gyro-Pitch-Winkel zu bestimmen, der indikativ für den Drehwinkel des Rotorblatts 100 um die Blattlängsachse 180 ist. Ein Verfahren zur Berechnung des Gyro-Pitch-Winkels eines Rotorblatts ist z.B. in der EP 2 896 827 A1 offenbart, die hiermit per Referenz eingebunden wird.

In einer bevorzugten Ausgestaltung umfasst die Torsionswinkelerfassungseinheit 450 eine insbesondere als Digitalkamera ausgebildete Kamera 455, die an der Rotorblattstruktur und/oder an dem Rotorblatt 100 an oder in der Nähe der Blattwurzel 114 befestigt ist. Vorzugsweise ist oder wird die Kamera 455 an einer Abschlussplatte 104 des Rotorblatts 100 angebracht. Weiterhin sind die Torsionswinkelerfassungseinheit 450 und das Gyroskop 490 starr miteinander verbunden, sodass die relative Ausrichtung der Torsionswinkelerfassungseinheit 450 in Bezug auf das Gyroskop 490 festgelegt und/oder konstant und/oder bekannt ist. Besonders bevorzugt ist das Gyroskop 490 starr innerhalb eines Gehäuses der Kamera 455 festgelegt und/oder eingebaut.

Die Kamera 455 ist in Sichtkontakt mit wenigstens zwei Reflektoren 420. Die wenigstens zwei Reflektoren 420 sind starr an der Rotorblattstruktur und/oder an

dem Rotorblatt 100 befestigt. Somit sind die wenigstens zwei Reflektoren 420 zusammen mit der Rotorblattstruktur und/oder dem Rotorblatt 100 einer Verlagerung und/oder Torsion am Ort der Reflektorbefestigung ausgesetzt. In der bevorzugten Ausgestaltung umfasst die Kamera 455 Beleuchtungsmittel, wie beispielsweise Leuchtdioden (LEDs), um die Reflektoren 420 zu beleuchten. Die Reflektoren 420 werden an der ersten vorbestimmten Abstandslage positioniert, wobei diese Abstandslage derart gewählt ist, dass die Reflektoren 420 in Sichtkontakt mit der Kamera 455 bleiben, wenn das Rotorblatt 100 eine Verbiegung unter Last während des Windkraftanlagenbetriebs erfährt. Die erste Profilsehnenrichtung 140 wird nun definiert als Profilsehnenrichtung des Rotorblatts 100 in der Abstandslage der wenigstens zwei Reflektoren 420.

Die wenigstens zwei Reflektoren 420 definieren eine Reflektor-Achse oder Reflektorrichtung 160. In der bevorzugten Ausgestaltung wird diese Achse 160 durch die Mittelpunkte der Reflektoren 420 definiert, wobei aber auch jede andere Definition möglich ist, sofern die Definition eindeutig eine Achse in Bezug auf die Position der Reflektoren 420 definiert. Ein Winkel σ wird als Winkel zwischen der Reflektor-Achse 160 und der ersten Profilsehnenrichtung 140 definiert, wenn das Rotorblatt 100 unbelastet ist. Der Winkel σ wird, insbesondere nur einmal, für das Rotorblatt 100 berechnet und/oder erfasst und vorzugsweise in einer Recheneinheit (Auswerteeinheit) der Hauptmesseinheit 460 gespeichert. Die Kombination aus der Reflektor-Achse 160 und dem Winkel σ definiert einen ersten

Profilsehnenrichtungs-lageindikator, insbesondere deshalb, da diese beiden Größen, nämlich die Reflektor-Achse und der Winkel σ , kombiniert werden können, um die Ausrichtung der ersten Profilsehnenrichtung 140 in der Abstandslage der Reflektoren 420 zu definieren.

Da die wenigstens zwei Reflektoren 420 starr an die Rotorblattstruktur und/oder das Rotorblatt 100 gebunden sind, beschreibt die Reflektor-Achse 160 die lokale Ausrichtung des Rotorblatts 100, wenn das Rotorblatt 100 eine Biegung und/oder eine Torsion aufgrund von Windlasten erfährt.

Das Bild der Reflektoren 420 auf einem lichtempfindlichen Element der Kamera 455 definiert die Reflektor-Achse 160 in Bezug auf einen Kamerakörper der Kamera 455. Die interne Orientierung zwischen dem lichtempfindlichen Element und den Gyroskop-Achsen $\{a_1, a_2, a_3\}$ wird, insbesondere einmal zum Zeitpunkt der Montage der Torsionswinkelerfassungseinheit 450, festgelegt und/oder gemessen und gespeichert, vorzugsweise bevor die Torsionswinkelerfassungseinheit 450 an der Rotorblattstruktur und/oder dem Rotorblatt 100 befestigt wird. Unter Verwendung dieses gespeicherten und/oder gemessenen Werts der internen Orientierung, wird die Orientierung der Reflektor-Achse 160 von dem lichtempfindlichen Element auf die Gyroskop-Achsen $\{a_1, a_2, a_3\}$ umgerechnet und der Wert an die Recheneinheit (Auswerteeinheit) der Hauptmesseinheit 460 übertragen.

Die Recheneinheit (Auswerteeinheit), die sowohl die Reflektor-Achse 160 als auch den Hauptwinkelgeschwindigkeitsvektor 36 in dem Koordinatensystem $\{a_1, a_2, a_3\}$ kennt, berechnet, insbesondere in Form eines Signals, den Winkel zwischen dem Winkelgeschwindigkeitsvektor 36 und der Reflektor-Achse 160. Unter Hinzufügung der gespeicherten Daten über die Orientierung σ der Reflektor-Richtung 160 relativ zu der ersten Profelsehnenrichtung 140 des Rotorblatts 100 wird, bevorzugt augenblicklich oder im Wesentlichen augenblicklich, ein erster Pitch-Winkel θ des Rotorblatts 100 berechnet und/oder ermittelt, der insbesondere ein wahrer Pitch-Winkel ist.

In einer weiteren Ausgestaltung wird eine zweite Profelsehnenrichtung 140' für das Rotorblatt 100 als Profelsehnenrichtung in einer zweiten vorgegebenen Abstandslage definiert. Reflektoren 420' werden starr an dem Rotorblatt 100 an der zweiten vorgegebenen Abstandslage befestigt, wobei die Reflektoren 420' eine zweite Reflektor-Achse oder Reflektorrichtung 160' definieren. Das Verfahren zur Ermittlung des ersten Pitch-Winkels θ des Rotorblatts 100 wird zum Ermitteln eines zweiten Pitch-Winkels des Rotorblatts 100 wiederholt, der insbesondere ein wahrer Pitch-Winkel ist. Zeitlich variierende Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Pitch-Winkel zeigen dabei die dynamische Torsionsbewegung des Rotorblatts 100. Ein Mittelwert aus dem ersten und zweiten Pitch-Winkel bildet insbesondere einen alternativen repräsentativen Pitch-Winkel für das Rotorblatt 100. Sowohl die dynamische Torsionsbewegung als auch der repräsentative

Pitch-Winkel werden an eine zentrale Steuereinheit der Windkraftanlage übertragen, um insbesondere die Verwendung erweiterter Steuerungsalgorithmen zu ermöglichen.

Aus Fig. 4 ist eine schematische Seitenansicht eines Rotorblatts 100 gemäß einer Variante oder zweiten Ausgestaltung ersichtlich, wobei die Torsionswinkelermessungseinheit 450 einen 3-achsigen Beschleunigungsmesser 560 umfasst, der entlang der Längserstreckung des Rotorblatts 100 an einer beliebigen Stelle positioniert ist, an der insbesondere signifikante Biegungen des Rotorblatts 100 im Normalbetrieb auftreten, wie beispielsweise in der Nähe der Rotorblattspitze 115. Bevorzugt ist der Beschleunigungsmesser 560 in der oder einer ersten Abstandslage oder in einer anderen Abstandslage positioniert. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit werden die Achsen $\{e_1, e_2, e_3\}$ des Beschleunigungsmessers 560 derart orientiert, dass die e_3 -Achse entlang und/oder in Richtung der Längsachse 180 des Rotorblatts 100 zeigt und/oder orientiert ist, wobei die e_1 -Achse und die e_2 -Achse insbesondere eine Querschnitts-Ebene in der Abstandslage des Beschleunigungsmessers 560 aufspannen. In Anwesenheit von Biegungen des Rotorblatts 100 während des Windkraftanlagenbetriebs weist der zentripetale Beschleunigungsvektor c eine Projektion auf die durch die Achsen $\{e_1, e_2\}$ aufgespannte Querschnitts-Ebene des Rotorblatts 100 auf. Da die Orientierung des zentripetalen Beschleunigungsvektors c bekannt ist, nämlich senkrecht zu dem Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor

36, und insbesondere ferner der Gravitationsbeschleunigungsvektor in der momentanen Azimutposition des Rotorblatts 100 aus der Windkraftanlagegeometrie berechnet wird, ist der Gesamtbeschleunigungsvektor an dem Beschleunigungsmesser 560 bekannt. Die Azimutposition charakterisiert dabei insbesondere die Drehlage des Rotorblatts 100 bezüglich der Rotorachse 35, vorzugsweise in Bezug auf eine Referenzdrehlage. Folglich kann der Torsionswinkel des oder am Ort des Beschleunigungsmessers 560, insbesondere durch eine Arkustangens-Berechnung der Komponenten des Beschleunigungsvektors c entlang der Achsen e_1 und e_2 , bestimmt werden. Da die Position und die Orientierung des Beschleunigungsmessers 560 relativ zu der Profilsehnenrichtung des Rotorblatts 100 sowie relativ zu dem vorgewählten Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$ an der Blattwurzel 114 bekannt sind, kann der momentane Winkel der Profilsehnenrichtung in Bezug auf das vorgewählte Blattkoordinatensystem $\{b_1, b_2, b_3\}$ an der Blattwurzel 114 berechnet werden. Der Torsionswinkel wird somit insbesondere durch eine Projektion der zentripetalen Beschleunigung und/oder des zentripetalen Beschleunigungsvektors c auf die Achsen $\{e_1, e_2, e_3\}$ gemessen und/oder erfasst und/oder bestimmt. In dieser Ausführungsform definiert die Kombination der Beschleunigungsmesser-Achsen $\{e_1, e_2, e_3\}$ und des oder eines Winkels σ den oder einen ersten Profilsehnenrichtungslageindikator, da die Projektionen der Beschleunigung auf die Beschleunigungsmesser-Achsen $\{e_1, e_2, e_3\}$ und der Winkel σ kombiniert werden können, um die Orientierung der ersten Profilsehnenrichtung in der

Abstandslage der Reflektoren und/oder des Beschleunigungsmessers zu definieren. Gemäß einer Abwandlung wird anstelle des Beschleunigungsmessers 560 ein Gyroskop 590 eingesetzt. Bevorzugt wird in diesem Fall, vorzugsweise mittels des Gyroskops 590, eine Projektion des oder eines Drehwinkelgeschwindigkeitsvektors, der insbesondere durch die Drehbewegung des Rotorblatts 100 um die Rotorachse 35 definiert wird, auf die Achsen $\{e_1, e_2, e_3\}$ gemessen und/oder erfasst. Vorteilhaft wird der Torsionswinkel durch die Projektion des Drehwinkelgeschwindigkeitsvektors auf die Achsen $\{e_1, e_2, e_3\}$ erfasst und/oder bestimmt. Die Verwendung des Gyroskops 590 anstelle des Beschleunigungsmessers 560 ist insbesondere mit dem Vorteil verbunden, dass die Gravitation keine Rolle spielt, sodass bei der Bestimmung des Torsionswinkels der Gravitationsbeschleunigungsvektor in der momentanen Azimutposition des Rotorblatts 100 nicht berücksichtigt werden muss.

Diese direkte Messung des physikalischen Pitch-Winkels des Rotorblatts 100 ist unabhängig von einem Pitch-Winkeldrehgeber und somit auch frei von dessen Messfehlern.

Darüber hinaus wird der physikalische Pitch-Winkel bevorzugt automatisch, d.h. ohne manuellen Eingriff, und zeitlich kontinuierlich während des Windkraftanlagenbetriebs gemessen. Als weiterer Vorteil wird insbesondere der physikalische Pitch-Winkel aller Rotorblätter der Windkraftanlage, vorzugsweise kontinuierlich, verglichen und der Betrag einer physikalischen Pitch-Winkel-Asymmetrie zwischen

den Rotorblättern bestimmt. Wenn dieser Wert oder Betrag einen vorbestimmten Schwellenwert überschreitet, wird insbesondere ein Alarm durch das Messsystem erzeugt und an die zentrale Steuereinheit der Windkraftanlage, an eine Windkraftanlagen-SCADA-Einheit oder an eine andere von dem Betreiber oder dem Hersteller der Windkraftanlage gewünschte Einheit gemeldet. Der Schwellenwert kann ausreichend gering eingestellt werden, um eine Pitch-Winkel-Asymmetrie in ihrem frühen Entstehungsstadium zu erfassen, insbesondere bevor signifikante, schädlich, zyklische Belastungen auftreten.

Teil 2: Die eindeutige Kennzeichnung der Profilsehnen-Linie des Rotorblatts

Die Profilsehnen-Linie des Rotorblatts wird insbesondere konsistent und einzeln für jedes Rotorblatt der Windkraftanlage bestimmt. Aufgrund der glatten, gekrümmten Oberfläche des Rotorblatts 100 ist es im praktischen Einsatz schwierig, die Profilsehnen-Linie mit der erforderlichen Genauigkeit zu markieren. In der Praxis ist eine Genauigkeit von 0,5 Grad, vorzugsweise von 0,1 Grad, gewünscht. Weiterhin weist das Material des Rotorblatts 100 aus dem Herstellungsprozess herrührende Eigenspannungen auf, welche die Form des Rotorblatts 100 in einer bestimmten Weise verändern können, was die Definition einer eindeutigen und/oder konstanten und/oder gleichen Profilsehnen-Linie für alle Rotorblätter behindert oder erschwert. Zum Beispiel umfasst das Rotorblattmaterial typischerweise einen großen Anteil an Epoxid oder ähnlichen Harzen. Die Aushärtung von Epoxid und/oder der ähnlichen Harze ist aber ein

exothermer Vorgang, der häufig starke Temperaturgradienten in dem Material während der Rotorblattherstellung erzeugt und daher aufgrund der Gradienten in der thermischen Ausdehnung des Materials Spannungen hervorruft, die in jedem Rotorblatt eingefroren sind.

Eine eindeutige Profilsehnen-Linie wird gemäß einer ersten Ausführungsform, die insbesondere unter Bezugnahme auf die Fig. 5 bis 11 erläutert wird, durch die Verwendung eines mechanischen Referenzsystems 300 definiert, welches sich die Geometrie einer Herstellform 200 zunutze macht, in welcher das Rotorblatt 100 oder ein Rotorblattteil des Rotorblatts 100 hergestellt wird. Die Geometrie der Herstellform 200 ist eine eindeutige und gleiche und/oder konstante Größe, welche über alle mittels der Herstellform 200 hergestellten Rotorblätter invariant ist. Das mechanische Referenzsystem 300 schafft einen Zusammenhang zwischen dem Rotorblatt 100 und der Herstellform 200 in einer eindeutigen und wiederholbaren Weise dadurch, dass dieser Zusammenhang hergestellt wird, wenn das Rotorblatt 100 noch in der Herstellform 200 einliegt, und zwar nachdem das Aushärten abgeschlossen ist und bevor das Rotorblatt 100 von der Herstellform separiert wird. Insbesondere nimmt an diesem Punkt des Herstellungsprozesses das Rotorblatt 100 eine Konfiguration an, die, vorzugsweise per Definition, die oder eine belastungsfreie Konfiguration des Rotorblattes 100 ist und/oder den oder einen belastungsfreien Zustand des Rotorblattes kennzeichnet.

Das Rotorblatt 100 wird gemäß der ersten Ausführungsform aus der oder einer unteren Halbschale 101 und der oder einer oberen Halbschale 102 hergestellt, wobei die Halbschalen 101 und 102 zunächst, insbesondere separat, hergestellt und anschließend miteinander verbunden werden. Bevorzugt werden zusätzlich ein oder mehrere, die beiden Halbschalen 101 und 102 miteinander verbindende, Blattholme 130 vorgesehen und/oder montiert. Die Halbschalen 101 und 102 repräsentieren vorzugsweise die Saug- und die Druckseite des Rotorblatts 100. Die Rotorblatt-Halbschalen 101 und 102 werden insbesondere durch gedachtes Schneiden des vollständigen Rotorblatts 100 im Wesentlichen entlang der Profilsehnen-Linie des Rotorblattquerschnitts 105 gebildet, sodass die Verbindung zwischen der oberen und der unteren Halbschale 101, 102 an der Vorderkante 106 und an der Hinterkante 107 des Rotorblatts 100 erfolgt.

Unter Bezugnahme auf Fig. 5 sind die oder eine Herstellform 200 und die oder eine untere Halbschale 101 des Rotorblatts 100 gezeigt, wobei die untere Halbschale 101 zu Veranschaulichungszwecken gegenüber der Herstellform 200 versetzt dargestellt ist. Die untere Halbschale 101 umfasst eine Halbschalenhaut 110 und einen Holmgurt 120. Der Holmgurt 120 umfasst insbesondere starke, im Wesentlichen unidirektionale Fasern, die dem gesamten Rotorblatt 100 Festigkeit gegen Biegung des Rotorblatts 100 verleihen.

Gemäß Fig. 6 weist die Herstellform 200 Ausrichtungsstifte 310 zur Aufnahme und Ausrichtung einer Brückenkomponente 320 des mechanischen Referenzsystems

300 auf. Das mechanische Referenzsystem 300 bildet insbesondere ein Montagewerkzeug. Ferner werden die Ausrichtungsstifte 310 insbesondere als Montagemarkierungen bezeichnet. Nachdem die Halbschalenhaut 110 und der Holmgurt 120 in der Herstellform 200 hergestellt und ausgehärtet sind, aber bevor die untere Halbschale 101 der Herstellform 200 entnommen wird, wird das mechanische Referenzsystem 300 unter Verwendung der Ausrichtungsstifte 300 an der Herstellform 200 befestigt.

Das mechanische Referenzsystem 300 umfasst wenigstens einen Arm 330, der sich in Richtung der unteren Halbschale 101 erstreckt und lösbar einen Reflektorfuß 400 hält, was aus Fig. 7 ersichtlich ist. Wenn das mechanische Referenzsystem 300 mit den Ausrichtungsstiften 310 vollständig ineinandergreift, sodass es sich bezüglich der Herstellform 200 in seiner gewünschten Position befindet, ist der Reflektorfuß 400 an einer spezifizierten, vorbestimmten Position in Bezug auf die untere Halbschale 101 angeordnet, was aus Fig. 8 ersichtlich ist. Gemäß der ersten Ausführungsform lokalisiert das mechanische Referenzsystem 300 den Reflektorfuß 400 in der spezifizierten, vorbestimmten Position insbesondere über dem Holmgurt 120. Der Holmgurt 120, der aus einer festeren Materialzusammensetzung als die Halbschalenhaut 110 besteht, erfährt eine geringere Verformung in der Querschnittsebene, wenn das Rotorblatt 100 im Betrieb belastet wird. Folglich ist die Torsionsbewegung des Holmgurts 120

indikativer für die mittlere Torsionsbewegung des Rotorblattquerschnitts, als z.B. die Halbschalenhaut 110, wenn das Rotorblatt 100 unter Belastung steht.

Gemäß der ersten Ausführungsform ist in der spezifizierten, vorbestimmten Position des Reflektorfußes 400 über dem Holmgurt 120 insbesondere ein Raum oder Spalt zwischen dem Reflektorfuß 400 und der Oberfläche des Holmgurts 120 vorgesehen. Dieser Raum oder Spalt wird mit einem Klebstoff 500 gefüllt, beispielsweise mit Epoxid oder einem ähnlichen Harz, was aus Fig. 9 ersichtlich ist. Gemäß der ersten Ausführungsform definiert der Reflektorfuß 400 eine Referenzfläche 150, die eindeutig und fest und/oder starr in Bezug auf die lokale Profilsehnen-Linie des Rotorblattquerschnitts am Ort des Reflektorfußes 400 positioniert ist. Die Referenzfläche 150 ist entweder parallel zu der lokalen Profilsehnen-Linie oder gegenüber der lokalen Profilsehnen-Linie um einen vorbestimmten Betrag drehversetzt. Die lokale Profilsehnen-Linie wird als erste Profilsehnenrichtung ausgewählt.

Nachdem der Klebstoff 500 ausgehärtet ist, wird der wenigstens eine Arm 330, der hier insbesondere durch lösbare Befestigungsmittel 345 in Form von Schrauben mit dem Reflektorfuß 400 verbunden ist, vom Reflektorfuß 400 gelöst und abgenommen und ein Reflektorkörper 430, der ein oder mehrere Reflektoren 420 umfasst, an dem Reflektorfuß 400 befestigt, was aus Fig. 10 ersichtlich ist. Insgesamt werden wenigstens zwei Reflektoren 420 an der Rotorblatt-Halbschale 101 montiert, sodass die durch einen vorbestimmten Abstand voneinander

getrennten Mittelpunkte der Reflektoren 420 eine Reflektorrichtung 160 definieren. Gemäß der ersten Ausführungsform werden insbesondere zwei Reflektorfüße 400 verwendet, von denen jeder vorzugsweise zwei Reflektoren 420 hält, sodass ein Reflektor-Muster aus vier oder mehr im Wesentlichen linear ausgerichteten Reflektoren 420 geschaffen wird, wobei das Reflektor-Muster direkt oder indirekt, z.B. im Sinne der kleinsten Quadrate, die Reflektorrichtung 160 definiert.

Bevorzugt bildet oder bilden die Reflektoren 420 und/oder der oder die Reflektorfüße 400 und/oder der Reflektorkörper 430, vorzugsweise zusammen, einen Profilsehnenrichtungsindikator, der insbesondere fest mit dem Rotorblatt 100 verbunden ist oder wird. Ferner bildet die Reflektorrichtung 160 und/oder die Reflektor-Achse 160 insbesondere eine Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung.

Die Reflektoren 420 werden vorzugsweise auf dem Reflektorkörper 430 montiert, bevor irgendeine Tätigkeit bezüglich der Rotorblattmontage vorgenommen wird, und insbesondere optisch kalibriert. Die Kalibrierung umfasst bevorzugt die optische Messung der Reflektorrichtung 160 und vorzugsweise die Messung des Winkels zwischen der Reflektorrichtung 160 und der Referenzfläche und/oder einer Fläche des Reflektorkörpers 430, die mit dem Reflektorfuß 400 zusammentrifft, welche insbesondere der Referenzfläche 150 entspricht.

Nachdem der Reflektorkörper 430 an dem Reflektorfuß 400 befestigt ist, ist der Winkel zwischen der Reflektorrichtung 160 und der Referenzfläche 150 bekannt.

Wenn die zweite Profilsehnenrichtung für das Rotorblatt 100 definiert werden soll, wird ein zweites mechanisches Referenzsystem 300' an der zweiten vorgegebenen Abstandslage verwendet, was aus Fig. 6 ersichtlich ist. Das gleiche Verfahren, welches zur Montage der Reflektorfüße 400 an der ersten vorgegebenen Abstandslage verwendet wurde, wird wiederholt, um Reflektorfüße an der zweiten vorgegebenen Abstandslage zu montieren.

Die obere Halbschale 102 wird mit einem gleichartigen Verfahren in einer zweiten Rotorblatt-Halbform und/oder Herstellform hergestellt. In diesem Verfahren wird eine zusätzliche Gruppe von Reflektoren 422 vorzugsweise an einem oberen Holmgurt 122 befestigt. Wenn die obere und die untere Halbschale zum Miteinanderverbinden zusammengebracht werden, was aus Fig. 11 ersichtlich ist, umfasst das komplette Reflektormuster eine Vielzahl von Reflektoren, welche die Profilsehnenrichtung insbesondere überbestimmen. Die Überbestimmung ist vorteilhaft, da sie es ermöglicht, die Profilsehnenrichtung des Rotorblatts in einer robusteren Art und Weise auszudrücken, z.B. als ein Mittel aus der oberen und unteren Reflektor-Muster-Richtung.

Gemäß der Variante, wonach die Torsionswinkelerfassungseinheit 450 und/oder der oder ein Profilsehnenrichtungsindikator den an einer vorbestimmen Abstandslage in dem Rotorblatt 100 angeordneten Beschleunigungsmesser 560 umfasst, folgt die Befestigung des Beschleunigungsmessers 560 an der Innenoberfläche des Rotorblatts 100 den oben für die Reflektoren genannten

Schritten, mit dem Unterschied, dass das Gehäuse des Beschleunigungsmessers 560 den Reflektorkörper 430 ersetzt. Insbesondere orientiert die Befestigung des Gehäuses des Beschleunigungsmessers 560 an dem Reflektorfuß 400 das Gehäuse des Beschleunigungsmessers 560 entlang der Referenzfläche 150, wodurch der Beschleunigungsmesser 560 sowohl in Bezug auf die Profilschwenkrichtung als auch in Bezug auf die Blattwurzel 114 eindeutig ausgerichtet wird.

Gemäß einer zweiten Ausführungsform wird das gesamte Rotorblatt 100 als eine monolithische Einheit hergestellt, wobei z.B. Airbags oder ähnliche Geräte verwendet werden, welche während der Harzinjektion und Aushärtung einen Kern bilden und/oder den leeren Innenraum des Rotorblatts besetzen. Die zweite Ausführungsform wird insbesondere unter Bezugnahme auf die Fig. 12 und 13 erläutert. Gemäß der zweiten Ausführungsform kann das mechanische Referenzsystem 300 insbesondere nicht verwendet werden. Um die optischen Markierungen an der Innenoberfläche des Rotorblatts 100 an ausgewählten Abstandslagen vorzusehen, wird nach dem Aushärten des Rotorblatts 100 wenigstens ein Reflektorkörper 430 mit wenigstens zwei Reflektoren 420 an der Innenoberfläche des Rotorblatts 100 befestigt, und zwar bevor das Rotorblatt 100 der Herstellform 200 entnommen wird. Das Verkleben des Reflektorkörpers 430 wird insbesondere ohne engeren Bezug zur Herstellform 200 durchgeführt, welche von der Innenseite des Rotorblatts 100 her nicht sichtbar ist. Somit ist die

Winkeldifferenz zwischen der Reflektorrichtung 160 und der Profelsehnenrichtung des Rotorblatts 100 nicht bekannt. Um diese Winkeldifferenz zu quantifizieren, werden an einer, insbesondere der Blattwurzel zugeordneten, Blattwurzelposition 210 der Herstellform 200 Referenzstifte 340 an der Herstellform 200 befestigt und/oder vorgesehen. Die Referenzstifte 340 werden eingesetzt, um einen Hilfsrahmen 240 aufzunehmen und den Hilfsrahmen 240 eindeutig und reproduzierbar in Bezug auf die Herstellform 200 zu positionieren. Eine Referenzkamera 440 wird an einer vorbestimmten Stelle und mit einer vorbestimmten Orientierung an dem Hilfsrahmen 240 befestigt, sodass die Referenzkamera 440 eine bekannte, vorbestimmte Orientierung in Bezug auf die Profelsehnenrichtung des Rotorblatts 100 aufweist. Die Referenzkamera 440 ist ferner in Sichtkontakt mit dem wenigstens einen Reflektorkörper 430 und kann daher die Reflektorrichtung 160 messen. Die Position der Referenzkamera 440 in Bezug auf die Blattwurzel 114 muss dabei nicht die gleiche sein wie die Position der Kamera 455, die während des Windkraftanlagenbetriebs verwendet wird.

Insbesondere bildet der Hilfsrahmen 240, vorzugsweise zusammen mit der Referenzkamera 440, ein Messwerkzeug. Ferner werden die Referenzstifte 340 insbesondere als Messmarkierungen bezeichnet.

Durch die Kombination der gemessenen Reflektorrichtung 160 und der vordefinierten Orientierung der Referenzkamera 440 in Bezug auf die Profelsehnenrichtung des Rotorblatts 100, wird die Winkelausrichtung der

Reflektorrichtung 160 in Bezug auf die Profilsehnenrichtung des Rotorblatts 100 berechnet und/oder erfasst und für die Verwendung während des Windkraftanlagenbetriebs gespeichert.

Bezugszeichenliste

10	Maschinenträger
20	Rotornabe
30	Rotorwelle
35	Rotorachse
36	Hauptdrehgeschwindigkeitsvektor
40	Blattlager
50	elektrischer Generator
100	Rotorblatt
101	untere Blatthälfte des Rotorblatts
102	obere Blatthälfte des Rotorblatts
104	Abschlussplatte des Rotorblatts
105	Blattquerschnitt des Rotorblatts
106	Vorderkante des Rotorblatts
107	Hinterkante des Rotorblatts
110	Haut der unteren Blatthälfte
112	Haut der oberen Blatthälfte
114	Blattwurzel des Rotorblatts
115	Blattspitze des Rotorblatts
120	Holmgurt der unteren Blatthälfte des Rotorblatts
122	oberer Holmgurt
130	Blattholm des Rotorblatts

- 140 (erste) Profilsehne/Profilsehnennrichtung des Rotorblatts
- 140' zweite Profilsehne/Profilsehnennrichtung des Rotorblatts
- 150 Referenzfläche
- 160 Profilsehnennrichtung / Reflektor-Achse / Reflektorrichtung
- 180 Blattlängsachse des Rotorblatts
- 200 Herstellform
- 210 Blattwurzelposition der Herstellform
- 240 Hilfsrahmen / Messwerkzeug
- 300 mechanisches Referenzsystem / Montagewerkzeug
- 300' zweites mechanisches Referenzsystem
- 310 Ausrichtungsstifte / Montagemarkierungen
- 320 Brückenkomponente des mechanischen Referenzsystems
- 330 Arm des mechanisches Referenzsystems
- 340 Referenzstifte / Messmarkierungen
- 345 lösbare Befestigungsmittel / Schrauben
- 400 Reflektorfuß
- 420 Reflektor
- 422 zusätzliche Gruppe von Reflektoren
- 430 Reflektorkörper
- 440 Referenzkamera
- 450 Torsionswinkelerfassungseinheit
- 455 Kamera der Torsionswinkelerfassungseinheit

460 Hauptmesseinheit

490 Blattwurzelwinkelerfassungseinheit / Gyroskop

500 Klebstoff

560 Beschleunigungsmesser

590 Gyroskop

θ Pitch-Winkel

σ Winkel

c Beschleunigungsvektor

$\{b_1, b_2, b_3\}$ Blattkoordinatensystem an der Blattwurzel

$\{a_1, a_2, a_3\}$ Koordinatensystem des Gyroskops

$\{e_1, e_2, e_3\}$ Koordinatensystem des Beschleunigungsmessers

Ansprüche

1. Verfahren zur Pitch-Winkelmessung und/oder zum Aufbau eines Messsystems zur Pitch-Winkelmessung an einem eine Blattwurzel (114) aufweisenden und sich in Richtung einer Blattlängsachse (180) erstreckenden Rotorblatt (100) einer Windkraftanlage, welches mit seiner Blattwurzel (114) an einer um eine Rotorachse (36) drehenden oder drehbaren Rotornabe (20) der Windkraftanlage um die Blattlängsachse (180) drehbar gelagert ist oder wird, wobei im Abstand zur Blattwurzel (114) wenigstens ein Profilsehnenrichtungsindikator (430) fest mit dem Rotorblatt (100) verbunden wird, der eine Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung (160) definiert, die indikativ für eine Richtung einer Profilsehne (140) des Rotorblatts (100) am Ort des Profilsehnenrichtungsindikators (430) ist, mittels wenigstens einer Torsionswinkelerfassungseinheit (450) ein Torsionswinkel des Rotorblatts (100) erfasst wird, um welchen die Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung (160) relativ zu einer Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung verdreht ist, mittels einer Blattwurzelwinkelerfassungseinheit (490) ein Blattwurzelwinkel erfasst wird, um welchen die Blattwurzel (114) relativ zu einer Blattwurzelreferenzlage um die Blattlängsachse (180) verdreht ist, und mittels einer Auswerteeinheit auf Basis des Torsionswinkels und des Blattwurzelwinkels ein Pitch-Winkel (θ) des Rotorblatts (100) am Ort des Profilsehnenrichtungsindikators (430) ermittelt wird, wobei das Rotorblatt (100) oder wenigstens ein mit dem Profilsehnenrichtungsindikator (430) fest verbundenes Rotorblattteil (101) des

Rotorblatts vor seinem Verbinden mit dem Profilsehnenrichtungsindikator (430) in einer Herstellform (200) hergestellt wird, dadurch gekennzeichnet, dass während das Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) in der Herstellform (200) einliegt, der Profilsehnenrichtungsindikator (430) in einer Lage fest mit dem Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) verbunden wird, die relativ zu der Herstellform (200) definiert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Lage des Profilsehnenrichtungsindikators (430) relativ zu der Herstellform (200) mittels eines Werkzeugs (300; 240) definiert wird, welches relativ zu der Herstellform (200) ausgerichtet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Herstellform (200) mit mehreren Herstellform-Markierungen (310, 340) versehen wird, mittels welchen das Werkzeug (300; 240) relativ zu der Herstellform (200) ausgerichtet wird.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Herstellform (200) mit mehreren Montagemarkierungen (310) versehen wird, an welchen wenigstens ein Montagewerkzeug (300) angesetzt wird, mittels welchem der Profilsehnenrichtungsindikator (430) oder wenigstens ein Profilsehnenrichtungsindikatorhalter (400) zum Halten des Profilsehnenrichtungsindikators (430) relativ zu der Herstellform (200) positioniert

wird, wonach der Profilsehnenrichtungsindikator (430) oder Profilsehnenrichtungsindikatorhalter (400) fest mit dem Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) verbunden wird.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Herstellform (200) mit mehreren Messmarkierungen (340) versehen wird, an welchen ein Messwerkzeug (240, 440) angesetzt wird, mittels welchem die Lage des bereits mit dem Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) fest verbundenen Profilsehnenrichtungsindikators (430) relativ zu der Herstellform (200) erfasst und somit definiert wird.

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass während das Rotorblatt (100) oder Rotorblattteil (101) in der Herstellform (200) einliegt, die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung definiert wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung relativ zu der Herstellform (200) definiert oder ermittelt wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Rotorblatt (100) aus zwei Rotorblatthalbschalen (101, 102) zusammengesetzt wird, von denen eine das Rotorblattteil (101) bildet.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Profilsehnenrichtungsindikator (430) mit wenigstens zwei entlang der Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung (160) nebeneinander angeordneten Profilsehnenrichtungsindikator-Markierungen (420) versehen wird, und die Torsionswinkelerfassungseinheit (540) wenigstens einen optischen Sensor aufweist, mittels welchem die Profilsehnenrichtungsindikator-Markierungen (420) optisch erfasst werden.

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Torsionswinkelerfassungseinheit (450) an oder im Bereich der Blattwurzel fest mit dem Rotorblatt (100) verbunden wird.

11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung indikativ für die Profilsehnenrichtungsindikator-Richtung (160) in einem nicht tordierten Zustand des Rotorblatts (100) ist.

12. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blattwurzelreferenzlage und die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung relativ zueinander festgelegt sind oder werden.

13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Torsionswinkel und der Blattwurzelwinkel in einem

blattwurzelfesten Bezugssystem (b1, b2, b3) erfasst werden, welches in dem unbelasteten Zustand des Rotorblatts (100) definiert wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Blattwurzelreferenzlage und die Profilsehnenrichtungsindikator-Referenzrichtung in dem blattwurzelfesten Bezugssystem (b1, b2, b3) definiert sind oder werden.

15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blattwurzelwinkelerfassungseinheit (490) an oder im Bereich der Blattwurzel (114) fest mit dem Rotorblatt (100) verbunden wird und relativ zu der Torsionswinkelerfassungseinheit (450) ortsfest ist.

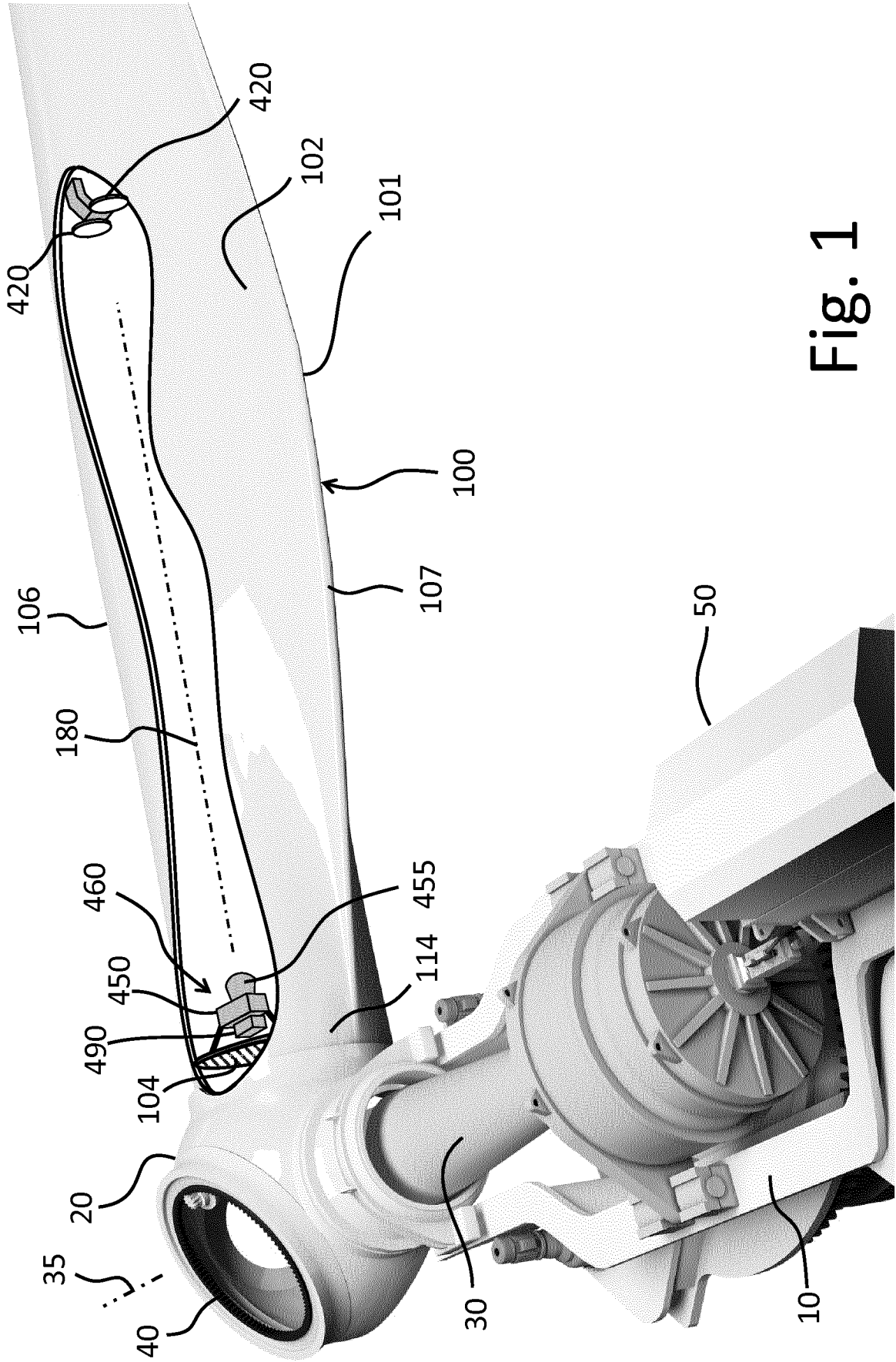


Fig. 1

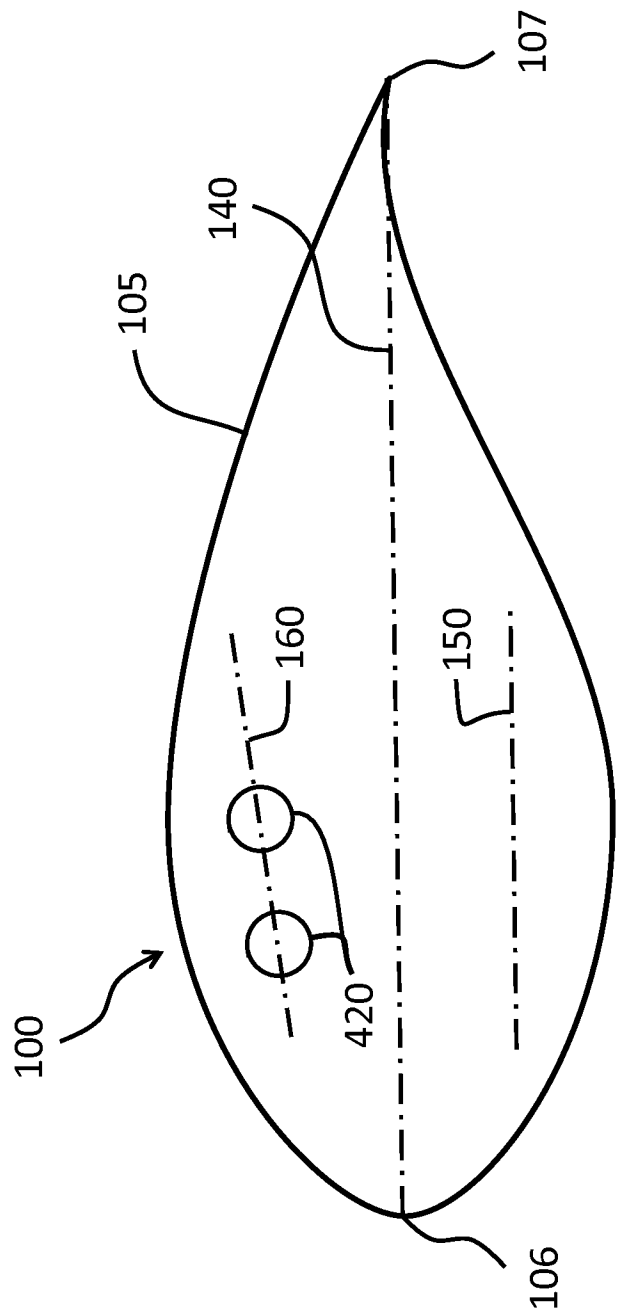


Fig. 2

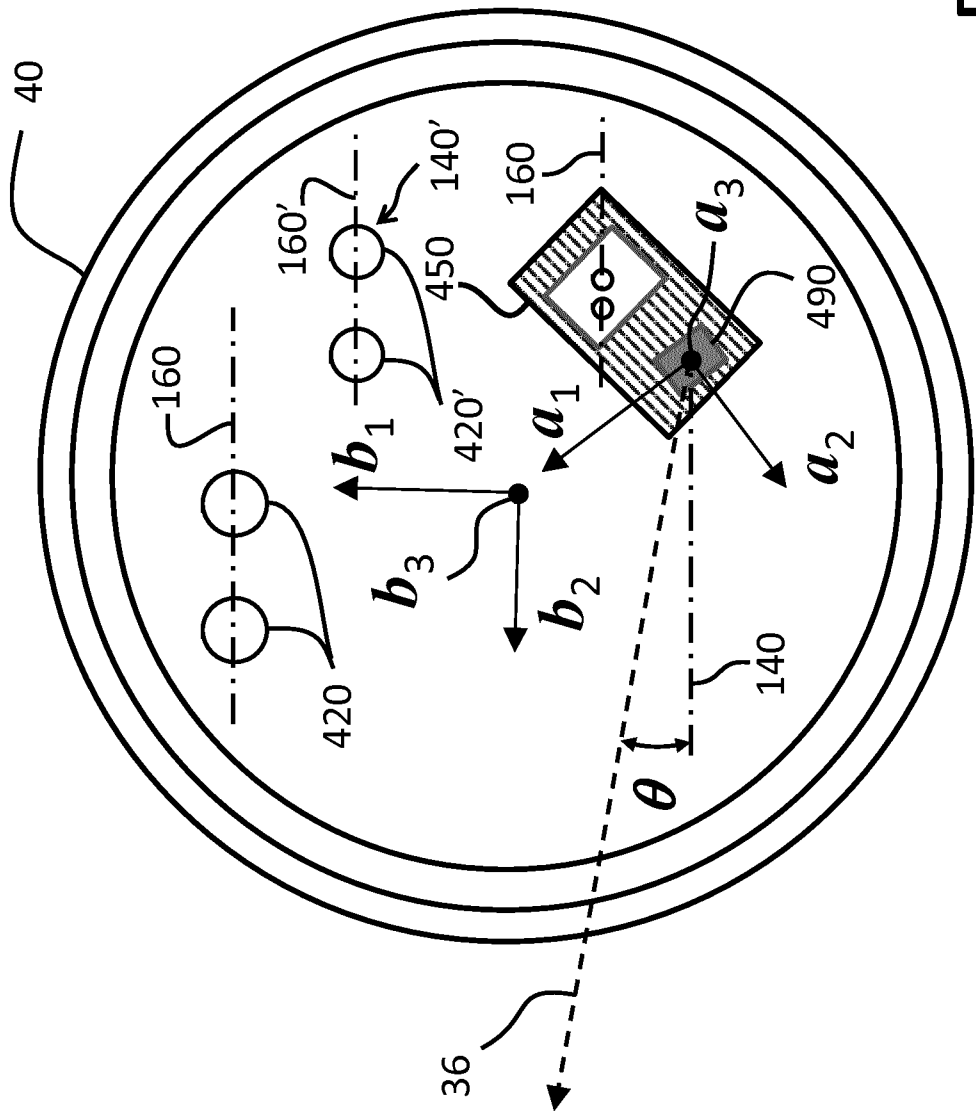


Fig. 3

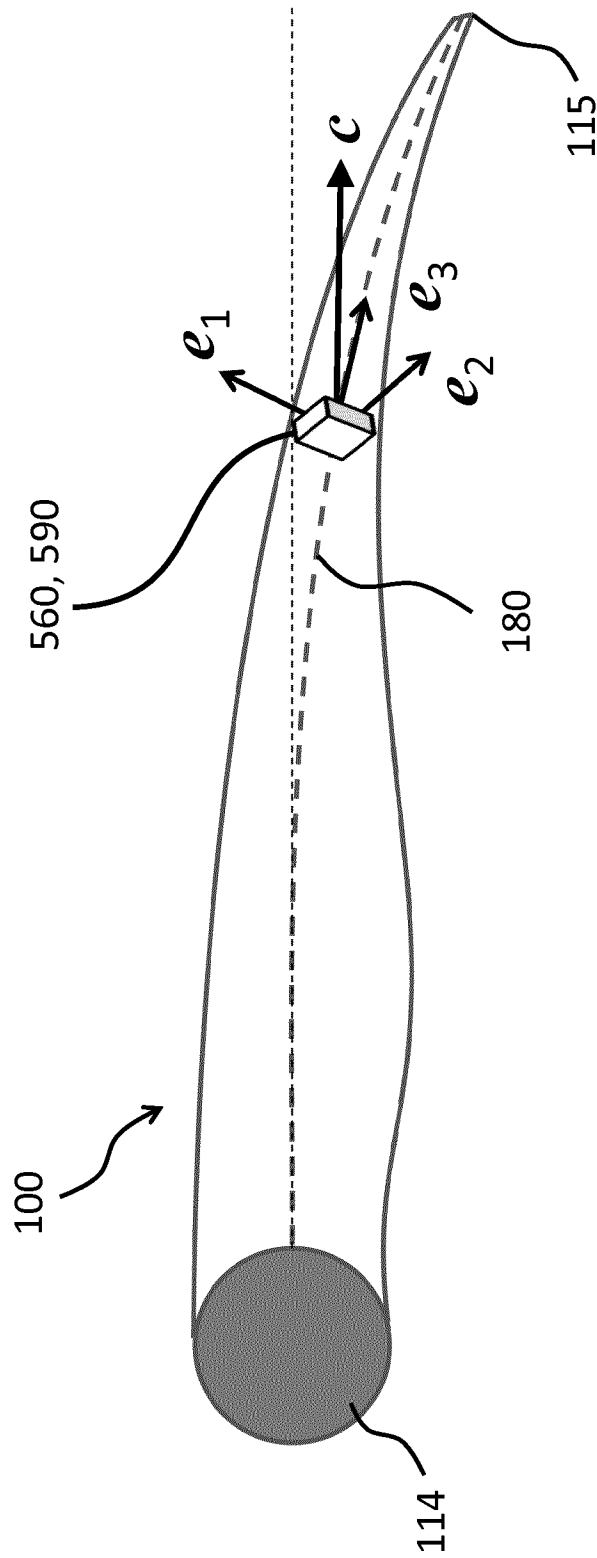


Fig. 4

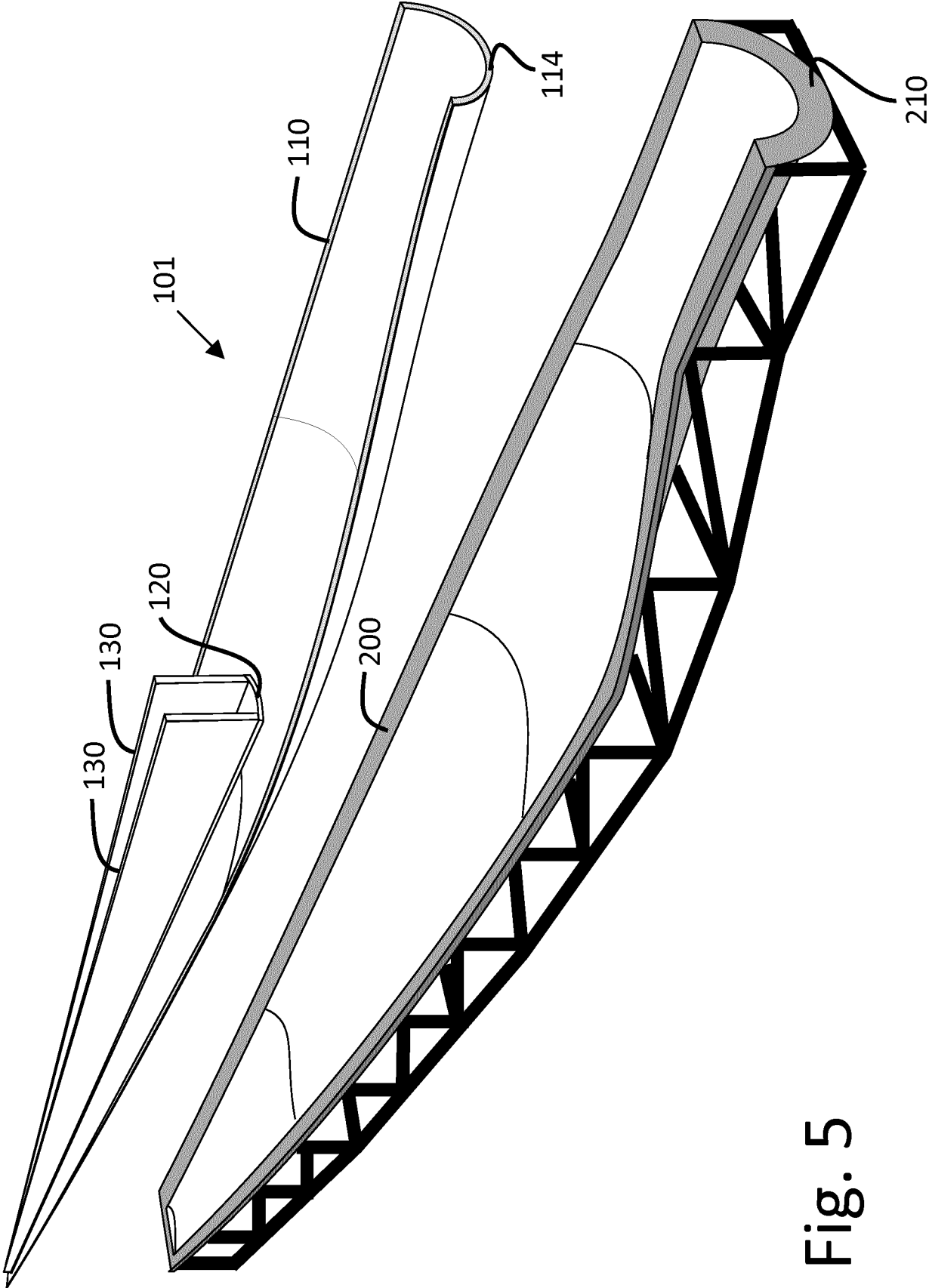
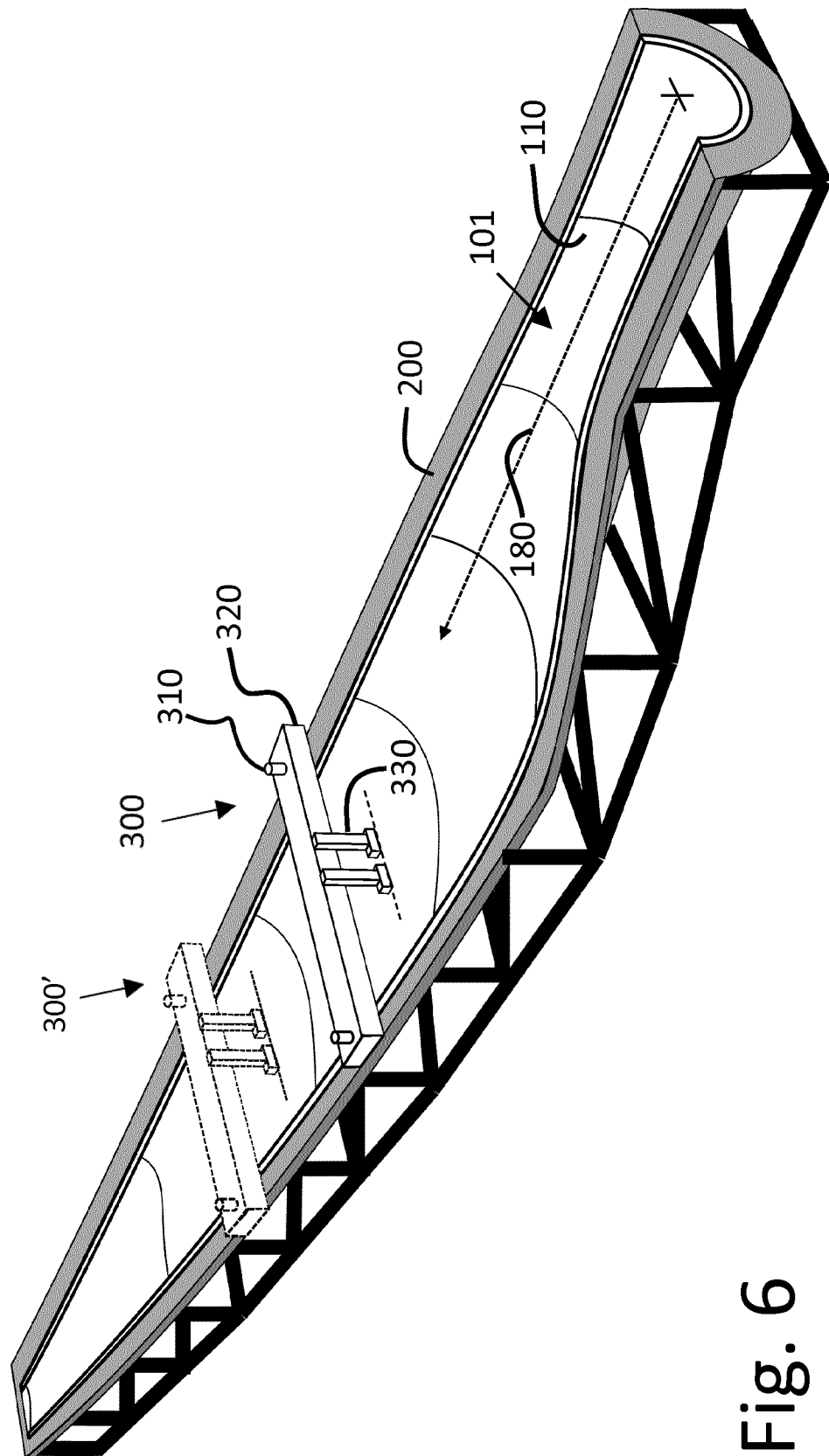


Fig. 5



6
m
E

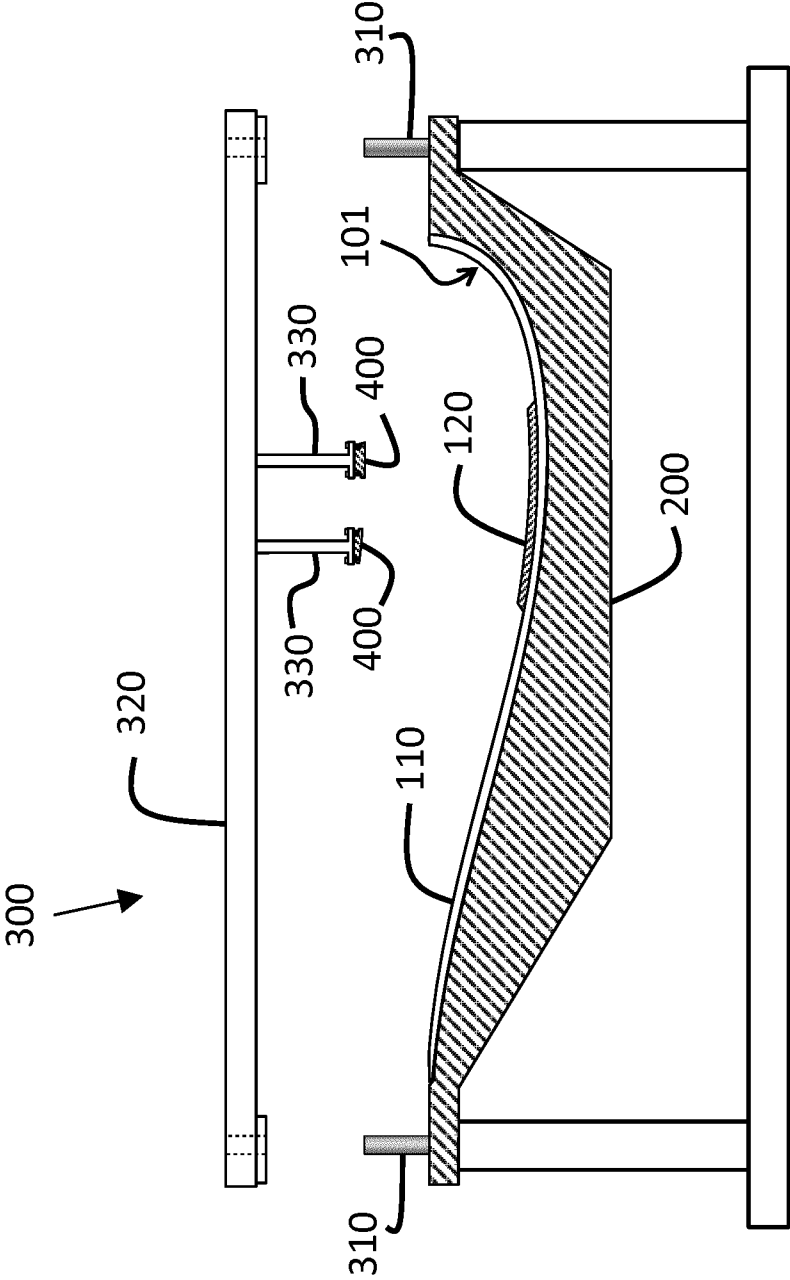


Fig. 7

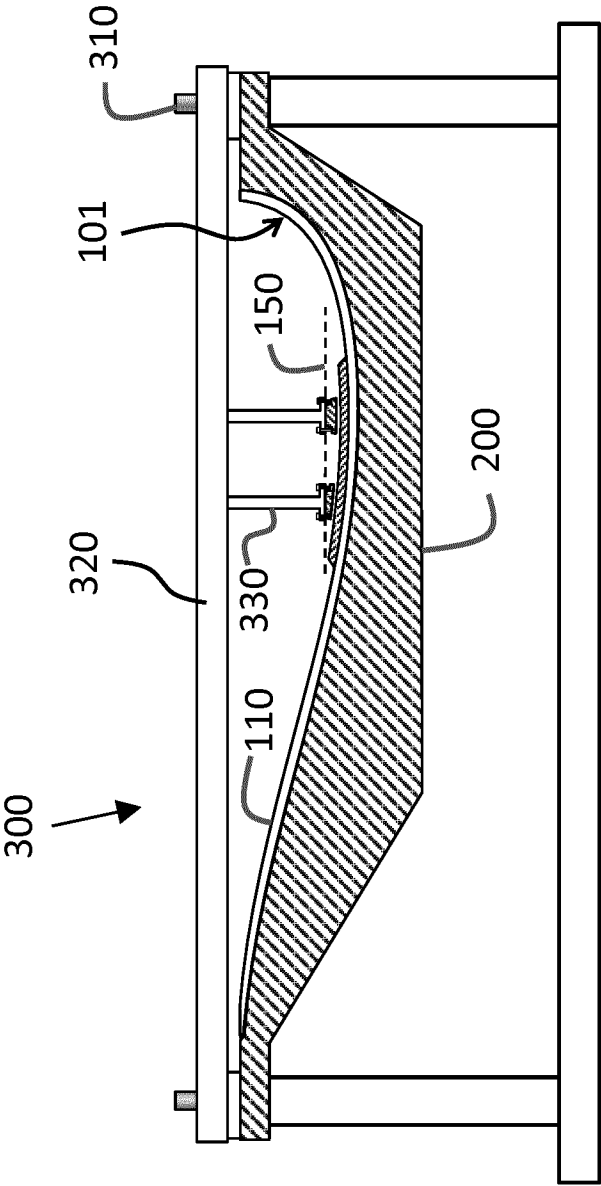


Fig. 8

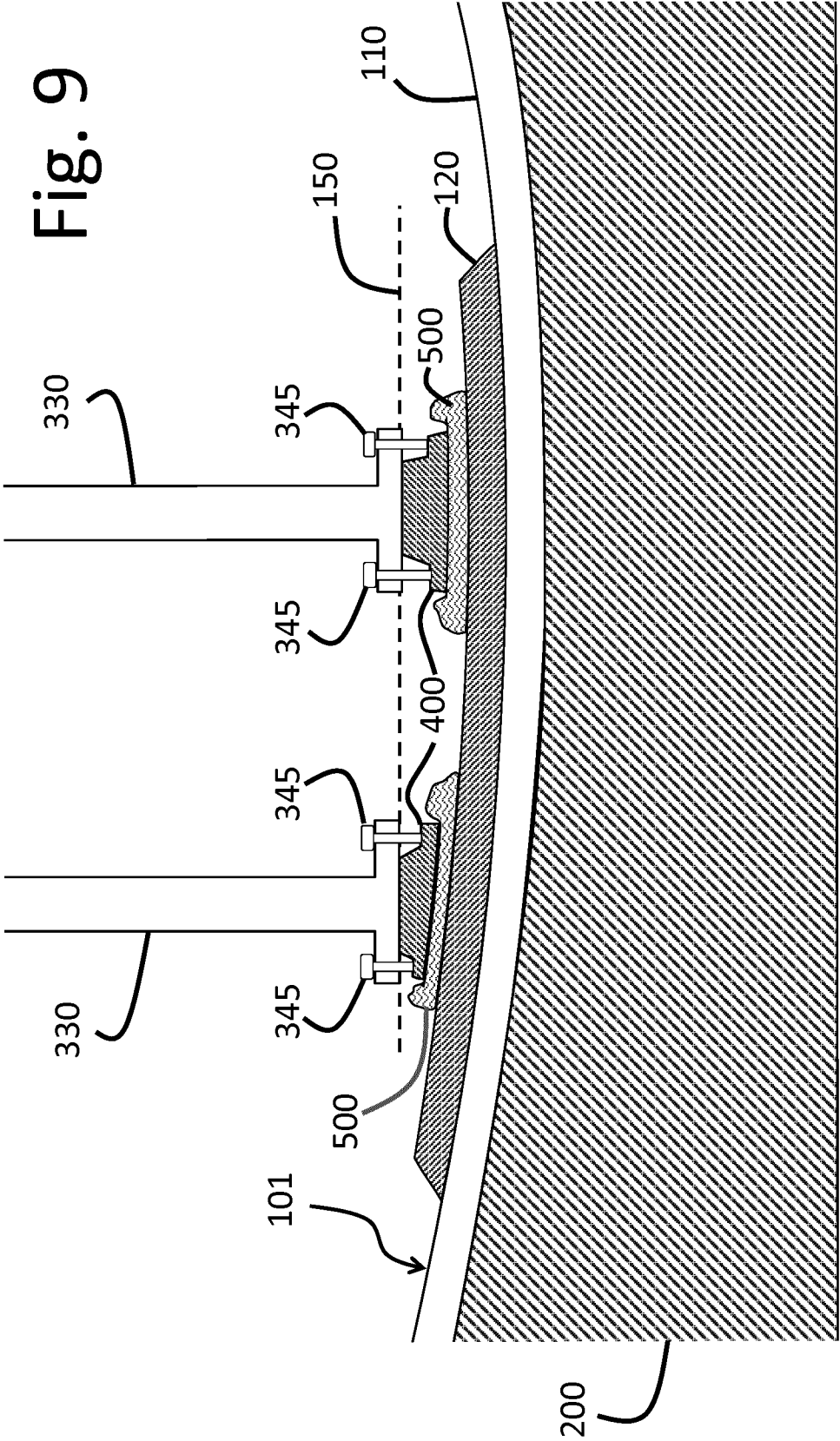
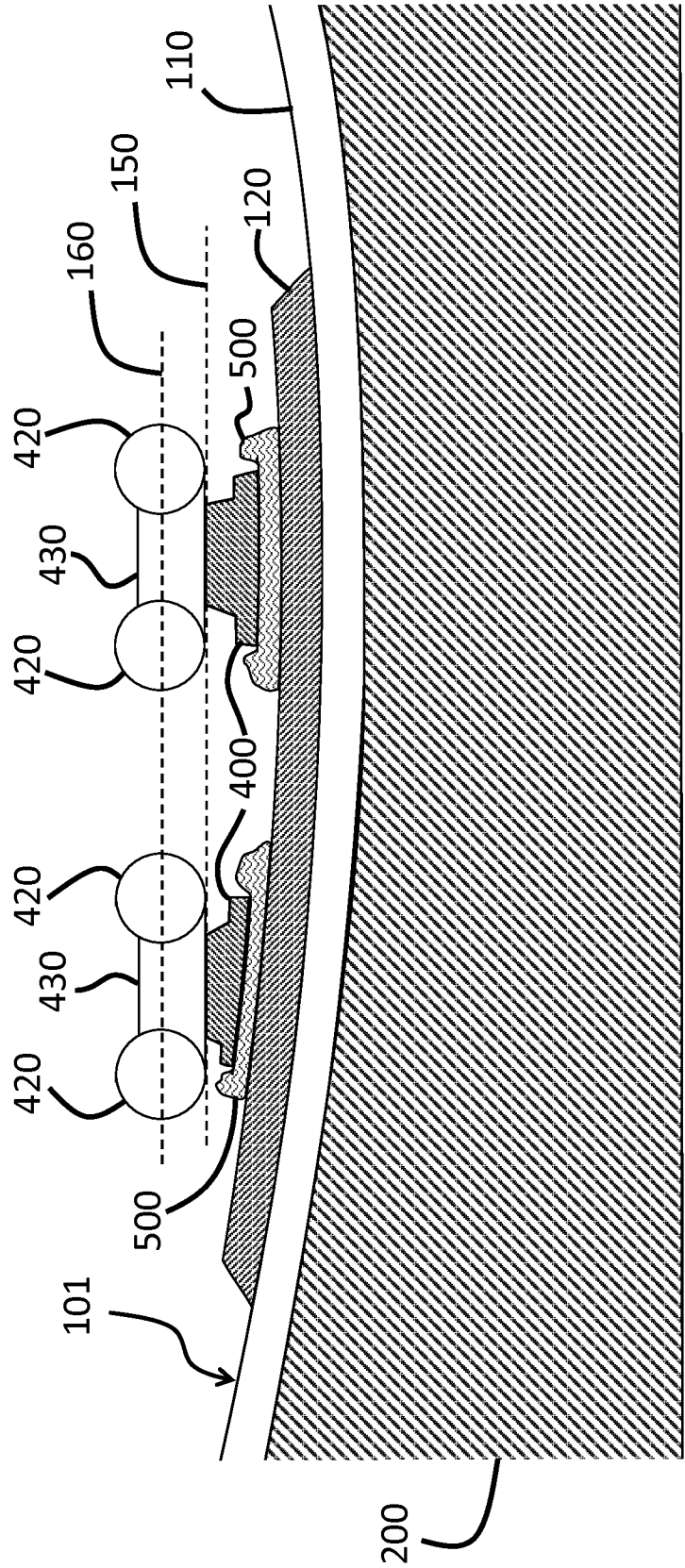


Fig. 10



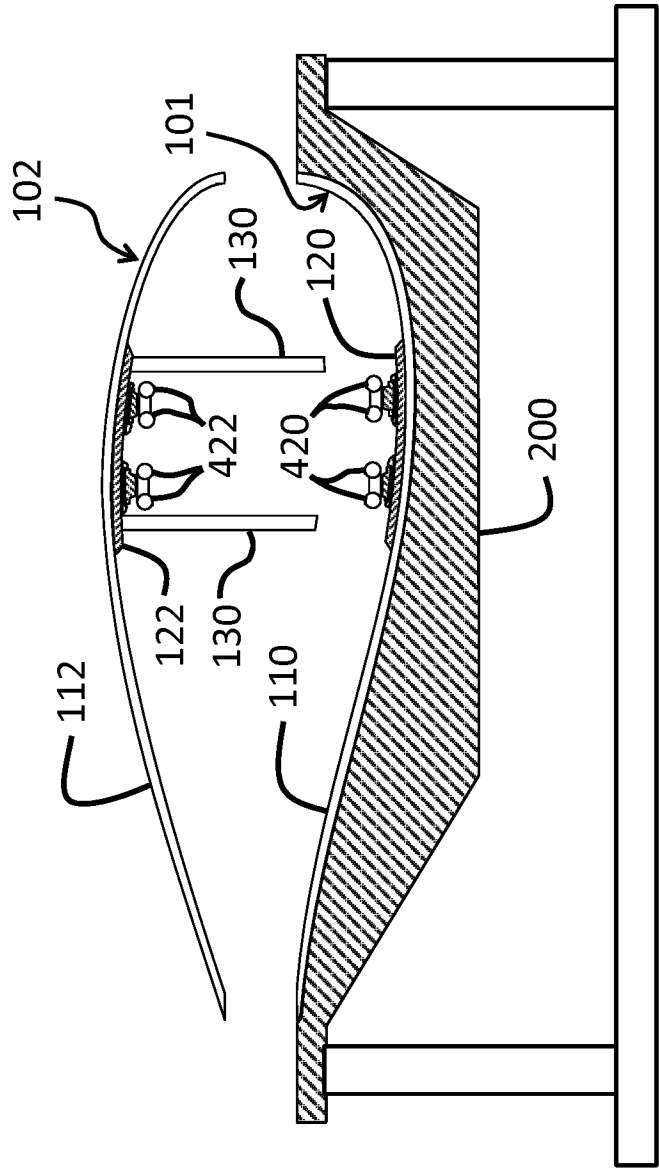


Fig. 11

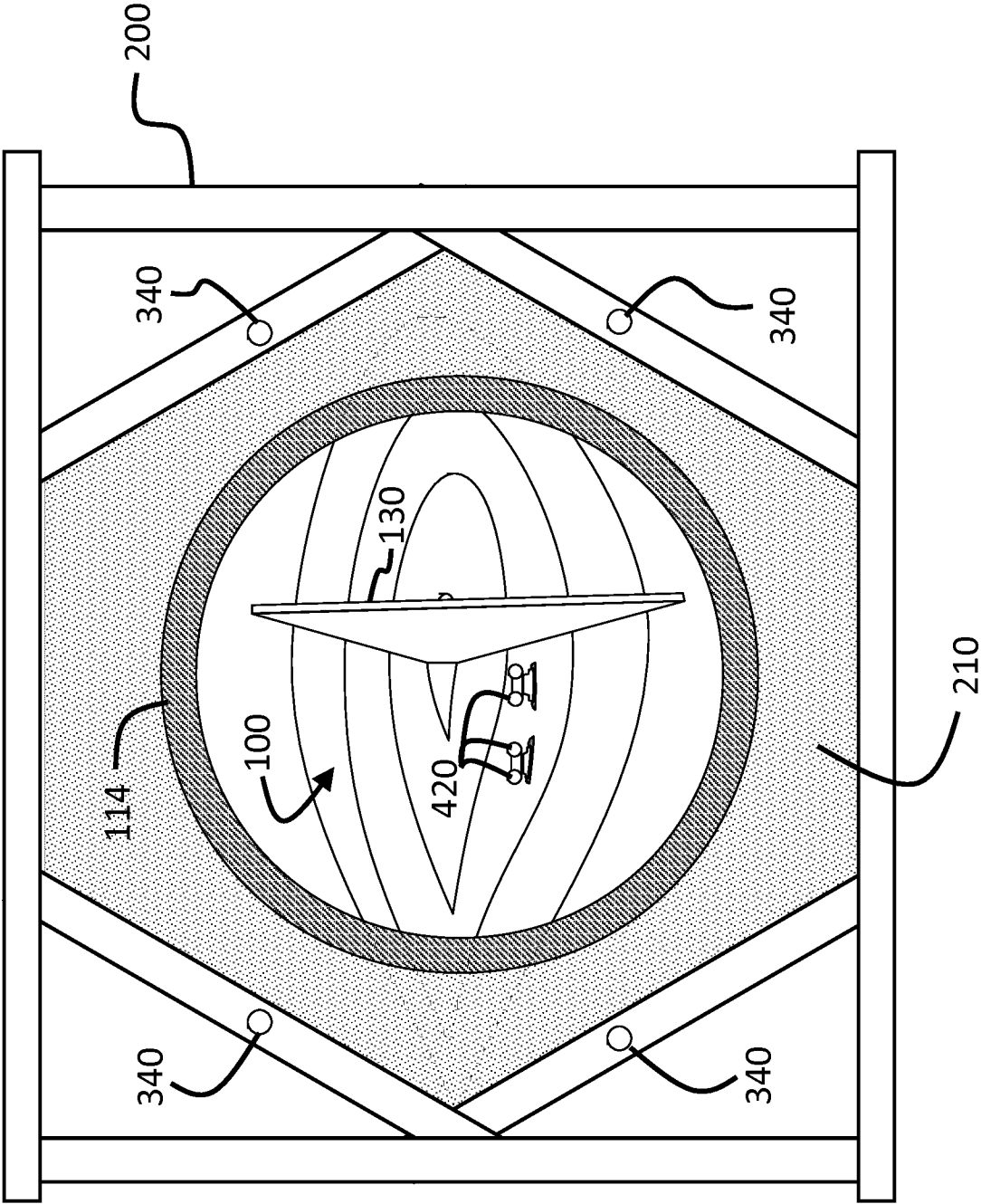


Fig. 12

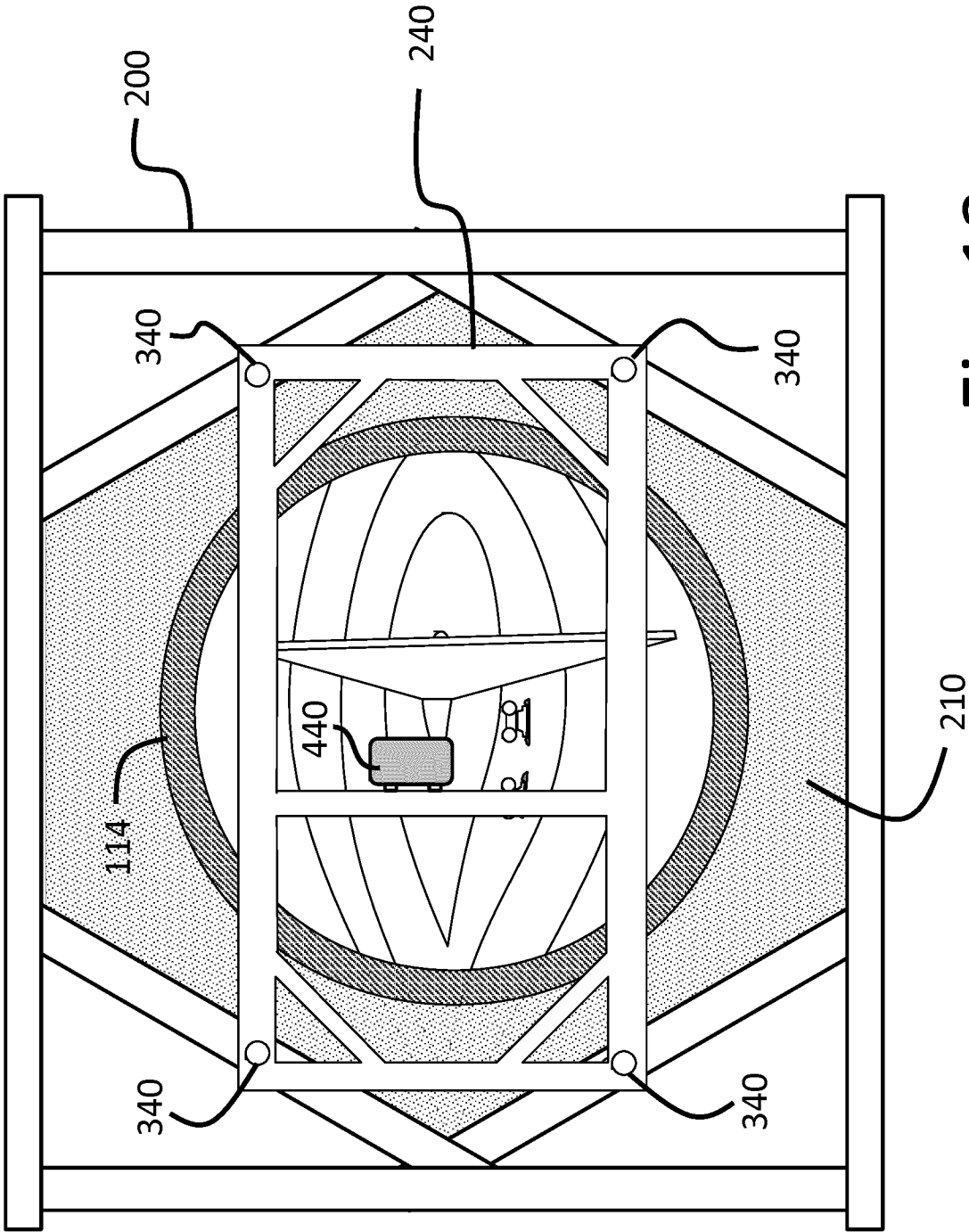


Fig. 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/068878

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. F03D17/00
ADD.

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)
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	US 2010/121606 A1 (VESTERGAARD JORGEN DAHL [DK]) 13 May 2010 (2010-05-13) paragraphs [0003], [0006], [0008], [0017], [0021], [0043], [0044] -----	1,4-15
A	US 2013/302161 A1 (KOERBER ARNE [DE] ET AL) 14 November 2013 (2013-11-14) the whole document -----	1
A	US 2011/285129 A1 (LI XIAO QIAN [SG] ET AL) 24 November 2011 (2011-11-24) paragraph [0093] -----	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

31 October 2017

Date of mailing of the international search report

07/11/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Biloen, David

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/068878

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2010121606 A1	13-05-2010	CN 101680429 A DE 112008001197 T5 US 2010121606 A1 WO 2008092461 A2	24-03-2010 02-06-2010 13-05-2010 07-08-2008
US 2013302161 A1	14-11-2013	NONE	
US 2011285129 A1	24-11-2011	US 2011285129 A1 WO 2010046403 A2	24-11-2011 29-04-2010

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. F03D17/00
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
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	US 2010/121606 A1 (VESTERGAARD JORGEN DAHL [DK]) 13. Mai 2010 (2010-05-13) Absätze [0003], [0006], [0008], [0017], [0021], [0043], [0044] -----	1,4-15
A	US 2013/302161 A1 (KOERBER ARNE [DE] ET AL) 14. November 2013 (2013-11-14) das ganze Dokument -----	1
A	US 2011/285129 A1 (LI XIAO QIAN [SG] ET AL) 24. November 2011 (2011-11-24) Absatz [0093] -----	1



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

31. Oktober 2017

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

07/11/2017

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

Biloen, David

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/068878

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2010121606 A1	13-05-2010	CN 101680429 A	24-03-2010
		DE 112008001197 T5	02-06-2010
		US 2010121606 A1	13-05-2010
		WO 2008092461 A2	07-08-2008

US 2013302161 A1	14-11-2013	KEINE	

US 2011285129 A1	24-11-2011	US 2011285129 A1	24-11-2011
		WO 2010046403 A2	29-04-2010
