

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50097/2023
(22) Anmeldetag: 15.02.2023
(43) Veröffentlicht am: 15.09.2024

(51) Int. Cl.: **G01P 5/24** (2006.01)
F03D 7/02 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
EP 2 017
AT 523 396
EP 2 273
EP 2 048
DE 30 00
EP 2 148

(71) Patentanmelder:
Windpuls GmbH
4020 Linz (AT)

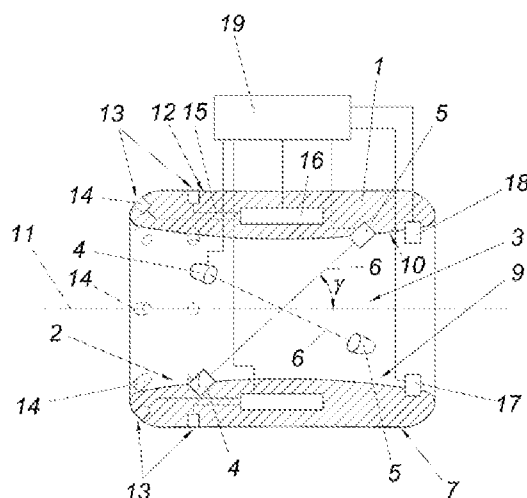
(72) Erfinder:
Feichtinger Christoph
4920 Schildorn (AT)

(74) Vertreter:
Hübscher & Partner Patentanwälte GmbH
4020 Linz (AT)

(54) **Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen**

(57) Es wird eine Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfkörpers (8) in rauen Einsatzgebieten umfassend ein Ultraschallanemometer (3) mit wenigstens einem Ultraschallsender (4) und einem Ultraschallempfänger (5), die gemeinsam eine Messstrecke (6) ausbilden, beschrieben. Um eine robuste Vorrichtung zu erhalten, die trotz kompakten Abmessungen eine repräsentative Messung von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfungskörpers ermöglicht, ohne dabei die Windanströmbedingungen im Messbereich gravierend zu beeinflussen, wird vorgeschlagen, dass das Ultraschallanemometer (3) in einem einen Einlaufkonus (2) aufweisenden Gehäuserohr (1) angeordnet ist und dass das Gehäuserohr (1) einen Montageabschnitt (7) zum Einführen in einen Prüfkörper (8) aufweist.

FIG. 1



Zusammenfassung

Es wird eine Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfkörpers (8) in rauen Einsatzgebieten umfassend ein Ultraschallanemometer (3) mit wenigstens einem Ultraschallsender (4) und einem Ultraschallempfänger (5), die gemeinsam eine Messstrecke (6) ausbilden, beschrieben. Um eine robuste Vorrichtung zu erhalten, die trotz kompakten Abmessungen eine repräsentative Messung von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfungskörpers ermöglicht, ohne dabei die Windanströmbedingungen im Messbereich gravierend zu beeinflussen, wird vorgeschlagen, dass das Ultraschallanemometer (3) in einem einen Einlaufkonus (2) aufweisenden Gehäuserohr (1) angeordnet ist und dass das Gehäuserohr (1) einen Montageabschnitt (7) zum Einführen in einen Prüfkörper (8) aufweist.

(Fig. 1)

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfkörpers in rauen Einsatzgebieten umfassend ein Ultraschallanemometer mit wenigstens einem Ultraschallsender und einem Ultraschallempfänger, die gemeinsam eine Messstrecke ausbilden. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf eine Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines Rotorblattes eines Windkraftrades, sowie auf ein Rotorblatt selbst. Darüber hinaus bezieht sich die Erfindung auf ein Verfahren zur Bestimmung des Lastzustandes eines Windkraftrades.

Vorrichtungen zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines Windkraftrades können zur Regelung der Ausrichtung der Windkrafträder, aber auch zur Belastungsmessungen und zur Berechnung der Restlebensdauer von Windkraftanlagen eingesetzt werden.

Aus der EP2048507A3 ist eine Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen umfassend ein Ultraschallanemometer mit wenigstens einem Ultraschallsender und einem Ultraschallempfänger, zwischen denen eine Messstrecke verläuft, vorbekannt. Das Ultraschallanemometer ist dabei an der Nabe des Windkraftrades angeordnet. Nachteilig daran ist allerdings, dass die aus der EP2048507A3 bekannte Vorrichtung einerseits verhältnismäßig groß ausgebildet ist und dass andererseits eine solche zentrale Messung der Windanströmungsbedingungen vor allem im Hinblick auf die an den Rotorblättern vorherrschenden Turbulenzen nur unzufriedenstellende Rückschlüsse auf die Windanströmungsbedingungen an den Rotorblättern zulassen. Vor allem bei

Belastungsmessungen und der Bestimmung Restlebensdauer von Windkraftanlagen ist eine solche Vorrichtung daher nur bedingt zum Messen von Windanströmungsbedingungen geeignet.

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, eine robuste Vorrichtung der eingangs geschilderten Art vorzuschlagen, die trotz kompakten Abmessungen eine repräsentative Messung von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfungskörpers ermöglicht, ohne dabei die Windanströmbedingungen im Messbereich gravierend zu beeinflussen.

Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe dadurch, dass das Ultraschallanemometer in einem einen Einlaufkonus aufweisenden Gehäuserohr angeordnet ist und dass das Gehäuserohr einen Montageabschnitt zum Einführen in einen Prüfkörper aufweist. Zufolge des erfindungsgemäßen Einsatzes des Einlaufkonus kann die Vorrichtung zur Messung von Windanströmungsbedingungen unterschiedlicher Prüfkörper eingesetzt werden, da der Einlaufkonus, dessen Querschnitt sich in Richtung des Gehäuserohrzentrums verjüngt, eine effektive Einleitung des zu messenden Windes in das Gehäuserohr und eine Lenkung der Strömung in Axialrichtung der Vorrichtung bedingt, sodass die Vorrichtung prinzipiell eine geringe Sensitivität bezüglich des Anströmwinkels des zu messenden Windes aufweist. Gerade durch diese geringere Sensitivität ist ein Vorsehen der Vorrichtung in Prüfkörpern unterschiedlicher Ausprägung überhaupt erst möglich. Insbesondere durch das Vorsehen eines vorzugsweise sensorfreien Montageabschnitts kann die Vorrichtung unmittelbar im Bereich einer Anströmkante eines Prüfkörpers angeordnet werden, wodurch die Windanströmbedingungen an dieser Anströmkante exakt und repräsentativ gemessen werden können. Vorzugsweise ist der Montageabschnitt von einem sensorfreien Gehäuserohraußenmantel ausgebildet. Dadurch, dass die Vorrichtung durch den Montageabschnitt des Gehäuserohrs wenigstens abschnittsweise im Prüfkörper integriert werden kann, werden darüber hinaus die Strömungsbedingungen im Messbereich nur geringfügig beeinflusst. Gleichzeitig bietet das Gehäuserohr Schutz für den Ultraschallsender und Ultraschallempfänger des Ultraschallanemometers, sodass Störungen durch

Schmutzpartikel oder Regentropfen weitgehend verhindert werden können. Vorzugsweise ist das Ultraschallanemometer in einer Venturidüse angeordnet, sodass das Gehäuserohr neben dem Einlaufkonus auch einen sich in Richtung seines Endabschnitts erweiternden Auslaufkonus aufweist, wodurch sich besonders gleichmäßige Strömungsbedingungen im Gehäuserohr ergeben. Insbesondere kann es sich beim Ultraschallanemometer um ein Laufzeitultraschallanemometer handeln.

Zur Ausbildung einer Messstrecke mit ausreichend hoher Auflösung können der Ultraschallsender und Ultraschallempfänger an sich gegenüberliegenden Seiten an der Innenfläche des Gehäuserohrs angeordnet sein. Auf diese Weise können der Ultraschallsender und Ultraschallempfänger eine ausreichend lange Messstrecke aufspannen und gleichzeitig eine kompakte Ausgestaltung der Vorrichtung aufrechterhalten bleiben. Durch Laufzeitberechnungen von zwischen Ultraschallsender und Ultraschallempfänger übermittelten Signalen, deren Laufzeit sich in Abhängigkeit eines die Messstrecke durchströmenden Mediums verändert, kann in aus dem Stand der Technik bekannter Weise die Windgeschwindigkeit ermittelt werden.

Um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, wird vorgeschlagen, dass mehrere je ein Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paar ausbildende Ultraschallsender und Ultraschallempfänger vorgesehen sind, wobei wenigstens zwei Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paare in Umfangsrichtung des Gehäuserohrs zueinander versetzt sind. Auf diese Weise ergeben sich mehrere zueinander versetzte Messstrecken, sodass die Ausbreitung der Signale zwischen Ultraschallsender und dem dazugehörigen Ultraschallempfänger in verschiedenen Raumrichtungen gemessen werden kann. Dadurch können sowohl horizontale als auch vertikale Windgeschwindigkeiten berechnet werden.

Damit eine ausreichend hohe Messauflösung der Vorrichtung geschaffen werden kann, ohne dabei die kompakte Ausgestaltung der Vorrichtung negativ zu beeinflussen, kann die Messstrecke in einem Winkel von 25° - 75° zur

Gehäuserohrlängsachse verlaufen. Auf diese Weise ergibt sich auch bei verhältnismäßig schmalen Gehäuserohren mit geringen Durchmessern eine ausreichend lange Messstrecke zwischen einem Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paar.

Mithilfe eines Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paares lässt sich die Windgeschwindigkeit u_{us} , welche aufgrund des Einlaufkonus in Gehäuserohrlängsachse der Vorrichtung gelenkt wird, messen. Um darüber hinaus auch die tatsächliche Richtung des auf den zu prüfenden Körper einwirkenden Windes bestimmen zu können und somit Aufschluss über die Anströmgeschwindigkeit u_{Ans} zu erhalten, wird vorgeschlagen, dass am Gehäuserohraußenmantel über den Mantelumfang verteilt angeordnete Staudrucksensoren vorgesehen sind. Insbesondere können hierzu Löcher am Gehäuserohraußenmantel verteilt sein, die über Staudruckkanäle an die Staudrucksensoren anschließen. Vorzugsweise sind die Staudrucksensoren außerhalb des Montageabschnitts am Gehäuserohraußenmantel angeordnet. Die am Mantelumfang verteilt angeordnete Staudrucksensoren ermöglichen die Bestimmung einer Winkeltransformationsmatrix A_{SW} mit den beiden Strömungswinkeln, dem Höhenanstellwinkel α , und dem Seitenanströmwinkel β , indem von den unterschiedlich gemessenen Staudrücken in aus dem Stand der Technik bekannter Weise auf die Anströmrichtung geschlossen wird. Herrscht an den am Mantelumfang verteilt angeordnete Staudrucksensoren beispielsweise der gleiche Staudruck, so deutet diese auf eine Anströmrichtung hin, die in Gehäuserohrlängsachse des Gehäuserohrs verläuft. Bei Ungleichverteilung der Staudrücke kann darauf geschlossen werden, dass die Staudrucksensoren, die einen höheren Staudruck messen, mit höheren Windgeschwindigkeiten beaufschlagt sind, sodass bei entsprechender Anzahl an Staudrucksensoren die Windrichtung, also der Anstellwinkel α , und der Seitenanströmwinkel β eruiert werden kann.

Mit der gemessenen u_{us} , dem bekannten Höhenanstellwinkel α , und dem bekannten Seitenanströmwinkel β lassen sich durch den Zusammenhang

$$\mathbf{u}_{Ans} = \begin{bmatrix} u_{us} \\ v_{us} \\ w_{us} \end{bmatrix} = |\mathbf{u}_{Ans}| \mathbf{A}_{SW}$$

$$\mathbf{A}_{SW} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta \\ \sin\alpha \\ \sin\alpha \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$|\mathbf{u}_{Ans}| = \sqrt{u_{us}^2 + v_{us}^2 + w_{us}^2}$$

$$\alpha = \arctan \frac{w_{us}}{u_{us}}$$

$$\beta = \arctan \frac{v_{us}}{\sqrt{u_{us}^2 + w_{us}^2}}$$

$|\mathbf{u}_{Ans}|$, v_{us} und w_{us} errechnen, wodurch sich die Anströmgeschwindigkeit, dargestellt durch den dreidimensionalen Anströmgeschwindigkeitsvektor $\mathbf{u}_{Ans}$, eindeutig bestimmen lässt.

Die Anströmgeschwindigkeit $\mathbf{u}_{Ans}$ wird naturgemäß von der Bewegung des bewegten Prüfkörpers beeinflusst. Um daher die absolute Windgeschwindigkeit $\mathbf{u}_{Abs}$ messen zu können, wird vorgeschlagen, dass im Gehäuserohr ein inertiales Navigationssystem und/oder ein globales Positionsbestimmungssystem vorgesehen ist. Mithilfe dieser Systeme kann die Vorrichtungsgeschwindigkeit $\mathbf{u}_{Vor}$ gemessen werden. Mit

$$\mathbf{u}_{Abs} = \mathbf{u}_{Ans} - \mathbf{u}_{Vor}$$

kann die absolute Windgeschwindigkeit $\mathbf{u}_{Abs}$ errechnet werden.

Im Gehäuserohr können darüber hinaus Sensoren zur Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Umgebungsdruck vorgesehen sein, deren Messgrößen in die

Berechnungen der Windgeschwindigkeiten und Anströmgeschwindigkeiten einfließen können, um beispielsweise temperaturbedingte und druckbedingte Einflüsse zu kompensieren. Die oben angeführten Berechnungen können mit einem vorzugsweise ebenfalls im Gehäuserohr eingebauten Mikrocontroller durchgeführt werden. Die Mikrocontroller mehrerer Vorrichtungen können über aus dem Stand der Technik bekannte Kommunikationsmitteln miteinander und gegebenenfalls mit einer Zentralrecheneinheit kommunizieren.

Um die tatsächliche Belastung diverser sich im Einsatz befindlicher Prüfkörper bestimmen zu können, müssen neben den Umgebungsbedingungen (Witterung, Temperatur etc.) vor allem die Turbulenzintensitäten bestimmt werden, denen der Prüfkörper ausgesetzt ist. Hierzu sollen einerseits detaillierte Aufzeichnungen über die Lastzustände der Prüfkörper eruiert werden können, andererseits jedoch der eigentliche Zweck des Prüfkörpers im Betrieb nicht verfälscht werden und dessen ordnungsgemäße Betriebsmöglichkeit durch die Messapparate unbeeinflusst bleiben. Bei der Überprüfung von Windkrafträdern als Prüfkörper werden bislang Anemometer an der Gondel oder der Nabe des Windkraftrades eingesetzt. Hierbei wird jedoch nicht die reine Turbulenz der ungestörten Strömung an den eigentlichen Schwachstellen des Windkraftrades gemessen, sondern auch die durch die Nabe und beim Vorbeistreichen des Rotorblatts erzeugten Turbulenzintensitäten, was regelmäßig zu einer zu hoch eingeschätzten Turbulenzintensität und somit zu einer Überschätzung der Ermüdungslasten führt. Um daher trotz einer nur geringen Beeinflussung der Umströmungsbedingungen am Prüfkörper eine akkurate Belastungsmessung desselbigen zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass ein Prüfkörper mit einer Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen ausgestattet ist, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante des Prüfkörpers angeordnet ist, wobei vorzugsweise das Gehäuserohr aus der Anströmkante hervorragt. Vorteilhafterweise kann die erfindungsgemäße Vorrichtung äußerst kompakt ausgebildet sein, da das gesamte Messinstrumentarium im Gehäuserohr angeordnet ist, das wiederum wenigstens abschnittsweise im Prüfkörper eingeführt sein kann. Überraschenderweise hat sich herausgestellt, dass eine Anordnung der Vorrichtung im Bereich der Anströmkante

des Prüfkörpers, vorzugsweise wenigstens abschnittsweise im Prüfkörper, besonders repräsentative Aussagen über die Belastungszustände des Prüfkörpers zulassen, da die Anströmbedingungen direkt an jenem Teil des Prüfkörpers gemessen werden, der besonders hohen Belastungen ausgesetzt ist.

Vorteilhafterweise beeinflusst die Vorrichtung das Umströmungsverhalten des Prüfkörpers kaum, insbesondere dann nicht, wenn die Vorrichtung wenigstens abschnittsweise im Prüfkörper angeordnet ist. Dies gilt vor allem für ein Rotorblatt eines Windkrafttrades als Prüfkörper mit einer Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante des Rotorblattes angeordnet ist, wobei vorzugsweise das Gehäuserohr aus der Anströmkante hervorragt. Durch das Vorragen des Gehäuserohrs sind die vorzugsweise vorgesehenen Staudrucksensoren frei zugänglich und somit nicht vom Prüfkörper umgeben, sodass die Windrichtung ordnungsgemäß bestimmt werden kann. Durch die erfindungsgemäße Anordnung der Vorrichtung an der Anströmkante des Rotorblattes wird darüber hinaus die Pitch-Regelung der Windkraftanlage nicht negativ beeinflusst, sodass ein ordnungsgemäßer Betrieb der Windkraftanlage gewährleistet ist. Vorzugsweise mündet die Vorrichtung, insbesondere das Gehäuserohr in einen durch den Prüfkörper verlaufenden Strömungskanal, um die Strömungsbedingungen weiter zu verbessern. Vorzugsweise ist das Gehäuserohr wenigstens abschnittsweise in das Rotorblatt im Bereich der Anströmkante eingeschoben. Insbesondere kann der Montageabschnitt im Rotorblatt angeordnet sein und der Rest des Gehäuserohrs gegenüber der Anströmkante vorragen.

Neben einem Rotorblatt können auch andere Prüfkörper eingesetzt werden. Als Prüfkörper kann beispielsweise ein Tragflügel eines Flugzeugs vorgesehen sein. Als Prüfkörper kann auch ein Spoiler eines Autos vorgesehen sein. Als Prüfkörper können auch andere aerodynamisch zu überprüfende Körper vorgesehen sein.

Um auch bei besonders großen Rotorblättern eine repräsentative Bestimmung des Lastzustandes zu ermöglichen, können mehrere entlang der Anströmkante des Prüfkörpers, insbesondere des Rotorblattes, angeordnete Vorrichtungen

vorgesehen sein. Auf diese Weise können sich auch in Radialrichtung verändernde Wind- und somit Belastungsbedingungen festgestellt werden. Darüber hinaus können durch die Relativbewegung der vorzugsweise jeder Vorrichtung zugeordneten inertialen Navigationssysteme und/oder globalen Positionsbestimmungssysteme Verformungen der Rotorblätter bestimmt werden, die wiederum in die Belastungsberechnung miteinbezogen werden können. Ein besonders ausgeglichenes Belastungsprofil, ohne dabei einen übermäßigen Einsatz von Sensoren zu benötigen, ergibt sich, wenn die Vorrichtungen zum Messen von Windanströmungsbedingungen unterschiedlicher Rotorblätter zueinander auf Lücke versetzt sind.

Eine erfindungsgemäße Vorrichtung kann zur Bestimmung des Lastzustandes eines Windkraftrades eingesetzt werden, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante des Rotorblattes angeordnet ist und wobei mittels der Vorrichtung eine Anströmgeschwindigkeit des Windes im Bereich der Anströmkante gemessen wird, wonach in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit eine auf das Rotorblatt einwirkende Einwirkkraft bestimmt wird, welche gegen Lastzyklen des Windkraftrades aufgetragen wird.

Mit Hilfe der Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen kann in oben beschriebener Weise die absolute Windgeschwindigkeit u_{Abs} bestimmt werden, von der auf die aerodynamische Kraft F_{Aer} als Einwirkkraft auf den Prüfkörper geschlossen werden kann. Die aerodynamische Kraft kann durch

$$F_{Aer} = \frac{1}{2} c_{Aer} * \rho * A * u_{Abs}^2$$

berechnet werden, wobei c_{Aer} ein aerodynamischer Beiwert des Prüfkörpers, ρ die Dichte des Anströmfluids, beispielsweise der Luft bzw. des Windes, und A die Referenzfläche, beispielsweise die Rotorblattoberfläche ist.

Anschließend kann die aerodynamische Kraft als Einwirkkraft gegen Lastzyklen des Windkraftrades aufgetragen werden. Ein Lastzyklus kann im einfachsten Fall eine

bestimmte Betriebszeit des Windkrafttrades, beispielsweise 1h, 1 Tag oder dergleichen sein.

Mit Hilfe der Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen können durch die im Gehäuserohr der Vorrichtung zum Messen der Windanströmungsbedingungen vorgesehenen inertialen Navigationssysteme und/oder globalen Positionsbestimmungssysteme auch die Geschwindigkeit und die Position des Gehäuserohrs gemessen werden. Auf diese Weise können translationsbedingte und/oder rotationsbedingte auf das Rotorblatt einwirkende Kräfte gemessen und als eine auf das Rotorblatt einwirkende Einwirkkraft bestimmt werden. Insbesondere können Biegemomente, sowie auf die Rotorblätter einwirkende Normal- und Lateralkräfte bestimmt werden. Diese Kräfte werden im Folgenden als generalisierte Einwirkkräfte benannt.

Somit können in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit, der translationsbedingten Kräfte und/oder rotationsbedingten Kräfte auf das Rotorblatt einwirkende generalisierte Einwirkkräfte bestimmt werden, welche gegen Lastzyklen des Windkrafttrades aufgetragen werden.

Es ergibt sich somit ein Verfahren zur Bestimmung des Lastzustandes eines Windkrafttrades mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante des Rotorblattes angeordnet ist und wobei mittels der Vorrichtung eine Anströmgeschwindigkeit des Windes im Bereich der Anströmkante gemessen wird, wonach in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit, der translationsbedingten Kräfte und/oder der rotationsbedingten Kräfte auf das Rotorblatt einwirkende generalisierte Einwirkkräfte als Einwirkkraft bestimmt werden, welche gegen Lastzyklen des Windkrafttrades aufgetragen werden.

Die generalisierten Einwirkkräfte $Q_{General}$ können beispielsweise wie folgt berechnet werden:

$$Q_{General(y,z)} = M_{(y)} \dot{z}_{General}$$

wobei $\mathbf{M}_{(y)}$ die generalisierte Massenmatrix für einen gegebenen Prüfkörper, beispielsweise das Rotorblatt, und $\dot{\mathbf{z}}_{General}$ der generalisierte Beschleunigungsvektor ist.

Hierzu kann ein generalisierter Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{z}_{General}$ definiert werden

$$\mathbf{z}_{General} = \{u_P \ v_P \ w_P \ \omega_{xb} \ \omega_{yb} \ \omega_{zb} \ u_{us} \ v_{us} \ w_{us}\}^T$$

wobei der Term $u_P \ v_P \ w_P$ den translationsbedingten Anteil eines Punktes P am Prüfkörper, der Term $\omega_{xb} \ \omega_{yb} \ \omega_{zb}$ den rotationsbedingten Anteil im Körperachsensystem b um die x,y,z-Achsen und der Term $u_{us} \ v_{us} \ w_{us}$ den windbedingten bzw. aerodynamischen Anteil beschreibt.

Aus dem generalisierten Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{z}_{General}$ kann der generalisierte Beschleunigungsvektor $\dot{\mathbf{z}}_{General}$ abgeleitet werden:

$$\dot{\mathbf{z}}_{General} = \{\dot{u}_P \ \dot{v}_P \ \dot{w}_P \ \dot{\omega}_{xb} \ \dot{\omega}_{yb} \ \dot{\omega}_{zb} \ \dot{u}_{us} \ \dot{v}_{us} \ \dot{w}_{us}\}^T$$

Die generalisierte Massenmatrix $\mathbf{M}_{(y)}$ kann wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{M}_{(y)} = \sum_{b=1}^n \left\{ \frac{\partial_I \mathbf{v}_{0b}^T}{\partial \mathbf{z}} m_b \frac{\partial_I \mathbf{v}_{0b}}{\partial \mathbf{z}} + \frac{\partial_b \boldsymbol{\omega}_{0b}^T}{\partial \mathbf{z}} {}_b \mathbf{T}_{Sb} \frac{\partial_b \boldsymbol{\omega}_{0b}}{\partial \mathbf{z}} \right\}$$

wobei ${}_I \mathbf{v}_{0b}$ die Geschwindigkeit des Schwerpunkts, angegeben durch den Index 0 und definiert im Trägheitsachsensystem I, ist und ${}_b \boldsymbol{\omega}_{0b}$ der im Körperachsensystem b definierte Winkelgeschwindigkeitsvektor ist. Beide Geschwindigkeitsvektoren und ihre transponierten Vektoren werden über den generalisierten Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{z}_{General}$ abgeleitet. Die Masse des Körpers m_b und der Trägheitstensor ${}_b \mathbf{T}_{Sb}$ werden durch die Masse- und Trägheitseigenschaften des Prüfkörpers vorgegeben. Der Term $\frac{\partial_I \mathbf{v}_{0b}^T}{\partial \mathbf{z}} m_b \frac{\partial_I \mathbf{v}_{0b}}{\partial \mathbf{z}}$ gibt den Translationsanteil und der Term $\frac{\partial_b \boldsymbol{\omega}_{0b}^T}{\partial \mathbf{z}} {}_b \mathbf{T}_{Sb} \frac{\partial_b \boldsymbol{\omega}_{0b}}{\partial \mathbf{z}}$ den Rotationsanteil an.

Somit können die generalisierten Einwirkkräfte $Q_{General}$

$$Q_{General(y,z)} = M_{(y)} \dot{z}_{General}$$

eindeutig bestimmt werden.

Die generalisierten Einwirkkräfte $Q_{General}$ können als Einwirkkraft gegen Lastzyklen des Windkrafttrades aufgetragen werden. Durch die Verwendung der generalisierten Einwirkkräfte $Q_{General}$ als Einwirkkraft kann vorteilhafterweise gemäß dem Jourdainischen Prinzip Aufschluss darüber erhalten werden kann, welche Faktoren einen Großteil der Belastung des Prüfkörpers ausmachen. Aus nachfolgender Vektordarstellung ist ersichtlich, dass sich $Q_{General}$ aus mehreren generalisierten einzelnen Einwirkkräften q zusammensetzt, die jeweils unterschiedliche

Belastungsfaktoren darstellen, nämlich q_{uP} die Kräfte aus dem q_{vP} q_{wP}

translationsbedingten Anteil eines Punktes P am Prüfkörper, $q_{\omega_{xb}}$ $q_{\omega_{yb}}$ die Kräfte aus $q_{\omega_{zb}}$

dem rotationsbedingten Anteil im Körperachsensystem b um die x,y,z-Achsen und

$q_{u_{us}}$ $q_{v_{us}}$ die Kräfte aus dem windbedingten bzw. aerodynamischen Anteil. $q_{w_{us}}$

$$Q_{General(y,z)} = \begin{Bmatrix} q_{uP} \\ q_{vP} \\ q_{wP} \\ q_{\omega_{xb}} \\ q_{\omega_{yb}} \\ q_{\omega_{zb}} \\ q_{u_{us}} \\ q_{v_{us}} \\ q_{w_{us}} \end{Bmatrix}$$

Zur Identifikation der unterschiedlichen Belastungen können die generalisierten Einwirkkräfte $Q_{General}$ auch wie folgt aufgeschlüsselt werden

$$\mathbf{Q}_{General(y,z)} = \mathbf{Q}_{act(y,z)} + \mathbf{Q}_{app(y,z)} + \mathbf{Q}_{gyro(y,z)}$$

wobei die verallgemeinerte Scheinkraft $\mathbf{Q}_{app(y,z)}$ und die verallgemeinert gyroskopische Kraft $\mathbf{Q}_{gyro(y,z)}$ direkt aus der Jakobimatrix, den scheinbaren Beschleunigungen und den Massen- und Trägheitseigenschaften berechnet werden können. Die aktiven generalisierten Kräfte $\mathbf{Q}_{act(y,z)}$ sind diejenigen Kräfte, die aktive Arbeit leisten - also Gewichtskräfte, elastische Kräfte, Reibungskräfte und

insbesondere aerodynamische Kräfte und Momente und können somit weiter in folgende Komponenten unterteilt werden: $\mathbf{Q}_{act(y,z)} = \mathbf{Q}_{Gewicht(y,z)} + \mathbf{Q}_{Elastisch(y,z)} + \mathbf{Q}_{Reibung(y,z)} + \mathbf{Q}_{Aer(y,z)} + \mathbf{Q}_{Rest(y,z)}$

Um auch in Gebieten mit stark variierenden Windbedingungen eine aussagekräftige Beurteilung über die Belastung der Windkraftträder durchführen zu können, wird vorgeschlagen, dass die Einwirkkraft von einer Filtereinheit in einen gleitenden Mittelwert und einen Fluktuationswert aufgeteilt wird. Dies kann dadurch erfolgen, dass die Filtereinheit den generalisierten Beschleunigungsvektor $\dot{\mathbf{z}}_{General}$ in einen gleitenden Mittelwert $\bar{\dot{\mathbf{z}}}_{General}$ und einen Fluktuationswert $\dot{\mathbf{z}}'_{General}$ aufspaltet.

$$\dot{\mathbf{z}}_{General} = \bar{\dot{\mathbf{z}}}_{General} + \dot{\mathbf{z}}'_{General}$$

Eingesetzt in

$$\mathbf{Q}_{General(y,z)} = \mathbf{M}_{(y)} \dot{\mathbf{z}}_{General}$$

ergibt sich

$$\mathbf{Q}_{General(y,z)} = \bar{\mathbf{Q}}_{General} + \mathbf{Q}'_{General}$$

sodass auch gleitende Mittelwerte und Fluktuationswerte gegen Lastzyklen des Windkrafttrades aufgetragen werden können.

Ein Lastzyklus kann im einfachsten Fall eine bestimmte Betriebszeit des Windkrafttrades, beispielsweise 1h, 1 Tag oder dergleichen sein. Alternativ kann aus

$$\dot{\mathbf{z}}_{General} = \ddot{\mathbf{z}}_{General} + \dot{\mathbf{z}}'_{General}$$

auf die Anzahl an Lastzyklen geschlossen werden, indem als 1 Lastzyklus jener Zeitraum definiert wird, der sich zwischen zwei Fluktuationsausschlägen ($\dot{\mathbf{z}}'_{General}$) erstreckt.

Um eine für die gesamte Windkraftanlage repräsentative Aussage über deren Belastungszustand erheben zu können, wird vorgeschlagen, dass in Längsrichtung der Anströmkante des Rotorblattes mehrere Vorrichtungen zum Messen von Windanströmungsbedingungen vorgesehen sind, mittels denen die Anströmgeschwindigkeit des Windes in unterschiedlichen Bereichen der Anströmkante gemessen wird. Aufgrund der multiplen Anordnung der Vorrichtungen zum Messen von Windanströmungsbedingungen kann ein dreidimensionales Abbild der Windanströmungsbedingungen des Windkrafttrades bestimmt werden.

Die Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen kann auch zur Optimierung der Anströmverhältnisse eines Rotorblattes eines Windkrafttrades eingesetzt werden, indem die Vorrichtung mit einem Pitch-Regler des Windkrafttrades kommunikationsverbunden ist und die mithilfe der Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen ermittelten Windanströmungsbedingung zur Wirkungsgraderhöhung der Rotorblattstellung herangezogen werden. Die Wirkungsgraderhöhung kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass die Rotorblätter in Abhängigkeit der lokalen Anströmbedingungen, beispielsweise in Abhängigkeit des Höhenanstellwinkels α als Parameter, so ausgerichtet werden, dass Ablösungen am Rotorblatt verhindert werden. Vorzugsweise können die Rotorblätter zur Reduktion des Höhenanstellwinkels α ausgerichtet werden.

Zwar ergeben sich durch den Einsatz der erfindungsgemäßen Vorrichtung besonders exakte Bedingungen bei der Bestimmung des Lastzustandes eines Windkraftrades, jedoch kann das erfindungsgemäße Verfahren auch ohne die erfindungsgemäße Vorrichtung eingesetzt werden. Somit ergibt sich ein Verfahren zur Bestimmung des Lastzustandes eines Windkraftrades, wobei eine Anströmgeschwindigkeit des Windes im Bereich einer Anströmkante eines Rotorblattes gemessen wird, wonach in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit eine auf das Rotorblatt einwirkende Einwirkkraft bestimmt wird, welche gegen Lastzyklen des Windkraftrades aufgetragen wird. Vorzugsweise erfolgt die Messung der Anströmgeschwindigkeit durch eine Windanströmungsbedingungsmessvorrichtung, die im Bereich einer Anströmkante des Rotorblattes angeordnet ist. Vorzugsweise werden in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit, der translationsbedingten Kräfte und/oder der rotationsbedingten Kräfte auf das Rotorblatt einwirkende generalisierte Einwirkkräfte als Einwirkkraft bestimmt, welche gegen Lastzyklen des Windkraftrades aufgetragen werden. Die translationsbedingten Kräfte und/oder der rotationsbedingten Kräfte können durch an den Rotorblättern angeordnete inertielle Navigationssysteme und/oder globale Positionsbestimmungssysteme bestimmt werden. Vorzugsweise wird die Einwirkkraft von einer Filtereinheit in einen Erwartungswert und einen Fluktuationswert aufgeteilt. Vorzugsweise sind in Längsrichtung der Anströmkante des Rotorblattes mehrere Windanströmungsbedingungsmessvorrichtungen vorgesehen, mittels denen die Anströmgeschwindigkeit und Anströmrichtung des Windes in unterschiedlichen Bereichen der Anströmkante gemessen wird.

In der Zeichnung ist der Erfindungsgegenstand beispielsweise dargestellt. Es zeigen

Fig. 1 einen schematischen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Vorrichtung in Seitenansicht,

Fig. 2 ein Querschnitt der Vorrichtung aus Fig. 1 in perspektivische Darstellung,

Fig. 3 einen schematischen Schnitt durch ein Rotorblatt einer Windkraftanlage als Prüfkörper mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung,

Fig. 4 eine Vorderansicht auf Rotorblätter eines Windkrafttrades mit mehreren in Längsrichtung der Rotorblätter verteilt angeordneten, erfindungsgemäßen Vorrichtungen,

Fig. 5 eine schematische Seitenansicht eines Rotorblattes eines Windkrafttrades als Prüfkörper mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wobei die aufgrund des Einlaufkonus in Axialrichtung der Vorrichtung gelenkte Windgeschwindigkeit u_{us} und die Anströmgeschwindigkeit u_{Ans} exemplarisch eingezeichnet sind und

Fig. 6 zwei Belastungsdiagramme unterschiedlicher Windkraftträder mit unterschiedlichen über einen Lastzyklus ausgesetzten Lasten.

Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen weist, wie der Fig. 1 zu entnehmen, ein Gehäuserohr 1 mit einem Einlaufkonus 2 auf. Im Gehäuserohr 1 ist ein Ultraschallanemometer 3 mit wenigstens einem Ultraschallsender 4 und einem Ultraschallempfänger 5 vorgesehen. Die Ultraschallsender 4 bzw. Ultraschallempfänger 5 können auch gleichzeitig Sender und Empfänger sein. Zusammengehörende Ultraschallsender 4 und Ultraschallempfänger 5 bilden gemeinsam eine Messstrecke 6 aus, entlang der Signale ausgetauscht werden. Auf Basis der Laufzeit der Signale kann in aus dem Stand der Technik bekannter Weise auf die Geschwindigkeit des die Messstrecke 6 passierenden Luftstroms geschlossen werden. Das Gehäuserohr 1 weist einen vorzugsweise sensorfreien Montageabschnitt 7 auf, der von einem Abschnitt des Gehäuserohräußenmantels gebildet sein kann, mithilfe dessen die Vorrichtung in einem Prüfkörper 8 angeordnet werden kann. Auf diese Weise kann die Vorrichtung zum Messen der Windanströmungsbedingungen unmittelbar an den relevanten Stellen eines Prüfkörpers 8 (Fig. 3) eingesetzt werden. Aufgrund des Montageabschnitts 7 kann die Vorrichtung dabei wenigstens abschnittsweise im Prüfkörper 8 eingesetzt sein, sodass die Umströmungsbedingungen kaum negativ beeinflusst werden. Durch den erfindungsgemäßen Einlaufkonus 2 ergibt sich weiter der Vorteil, dass eine Ausrichtung der Strömung in Gehäuserohr längsachse 11 der Vorrichtung erfolgt, sodass die Vorrichtung prinzipiell eine geringe Sensitivität bezüglich des

Anströmwindels des zu messenden Windes aufweist. Das Gehäuserohr 1 kann auf der gegenüberliegenden Seite des Einlaufkonus 2 einen sich endabschnittseitig erweiternden Auslaufkonus 9 aufweisen, sodass das Gehäuserohr 1 eine Venturidüse ausbildet.

Wie Fig. 1 und Fig. 2 zu entnehmen ist, können der Ultraschallsender 4 und der Ultraschallempfänger 5 an sich gegenüberliegenden Seiten an der Innenfläche 10 des Gehäuserohrs 1 angeordnet sein, wodurch sich auch bei geringer Dimensionierung des Gehäuserohres 1 eine Messstrecke 6 mit ausreichend hoher Messauflösung ergibt. Die Messstrecke 6 kann in einem Winkel μ von 25° - 75° zur Gehäuserohrängsachse 11 verlaufen, um bei geringem Durchmesser des Gehäuserohres 1 eine ausreichend hohe Messauflösung zu ermöglichen.

Aus Fig. 1 geht hervor, dass am Gehäuserohr Außenmantel 12 über den Mantelumfang verteilt angeordnete Staudrucksensoren 13 vorgesehen sein können. Die Staudrucksensoren können über den Mantelumfang verteilt angeordnete Löcher 14 aufweisen, die über Staudruckkanäle 15 an die Sensorik 16 der Staudrucksensoren 13 anschließen. Zur Messung der Vorrichtungsgeschwindigkeit kann im Gehäuserohr 1 ein inertiales Navigationssystem und/oder ein globales Positionsbestimmungssystem 17 vorgesehen sein. Im Gehäuserohr 1 können darüber hinaus Sensoren 18 zur Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und/oder Umgebungsdruck vorgesehen sein. Die Sensoren können mit einem Mikrocontroller 19 kommunikationsverbunden sein.

Um im Falle einer nicht vollständigen axialen Ausrichtung des Windes beim Eintreten in das Gehäuserohr horizontale als auch vertikale Windgeschwindigkeiten messen zu können, können mehrere Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paare vorgesehen sein, die je von einem Ultraschallsender 4 und einem Ultraschallempfänger 5 gebildet sind und können die Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paare in Umfangsrichtung des Gehäuserohrs 1 zueinander versetzt sein, wie dies insbesondere aus der Fig. 2 hervorgeht.

Fig. 3 zeigt ein Rotorblatt eines Windkrafttrades als Prüfkörper 8. Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann im Bereich der Anströmkante 20 des Prüfkörpers 8 angeordnet sein, da sich hierdurch eine besonders repräsentative Aussage über die Anströmbedingungen, insbesondere über die Turbulenzen, ergibt. Vorzugsweise ist das Gehäuserohr 1 im Prüfkörper 8 im Bereich der Anströmkante 20 angeordnet, sodass die Umströmungsbedingungen des Prüfkörpers 8 kaum beeinflusst werden. Um dennoch die Sensorik der erfindungsgemäßen Vorrichtung weitgehend unbeeinflusst zu lassen, kann das Gehäuserohr 1 aus der Anströmkante 20 hervorragen, sodass insbesondere die Staudrucksensoren 13 bzw. deren Löcher 14 außerhalb des Prüfkörpers 8 angeordnet sind. Das Gehäuserohr 1 der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann in einen im Prüfkörper 8 verlaufenden Strömungskanal 21 münden, um die Strömungsbedingungen weiter zu verbessern.

Fig. 4 offenbart, dass in Längsrichtung der Anströmkante 20 des Rotorblattes einer Windkraftanlage als Prüfkörper 8 mehrere Vorrichtungen zum Messen von Windanströmungsbedingungen vorgesehen sein können. Die Vorrichtungen, angedeutet durch Kreise, unterschiedlicher Prüfkörper 8 können zueinander auf Lücke versetzt sein.

Fig. 5 deutet den Zusammenhang zwischen der in Gehäuserohr längsachse 11 verlaufenden Windgeschwindigkeit u_{us} und der Anströmgeschwindigkeit u_{Ans} über den Anstellwinkel α , und den Seitenanströmwinkel β an, sodass bei gemessener Windgeschwindigkeit u_{us} und errechneten Anstellwinkel α und Seitenanströmwinkel β auf die Anströmgeschwindigkeit u_{Ans} geschlossen werden kann.

Auf Basis der Anströmgeschwindigkeit u_{Ans} kann eine auf das Rotorblatt als Prüfkörper 8 einwirkende Einwirkkraft F bestimmt werden, die gegen Lastzyklen C des Windkrafttrades aufgetragen wird. Dadurch ergibt sich ein in Fig. 6 dargestelltes Belastungsdiagramm, das die gegen die Lastzyklen C aufgetragene Einwirkkraft F unterschiedlicher zeitlich aufeinanderfolgender Messpunkte aufzeigt. Die Messpunkte ganz links repräsentieren die frühesten Messpunkte. Je weiter rechts

die Messpunkte sind, desto aktueller sind diese. Das Belastungsdiagramm kann beispielsweise in vier Belastungszonen eingeteilt werden.

Zone I repräsentiert einen Hochlast-Niederzyklus-Bereich. Fallen viele Messpunkte in diesen Bereich, so geht dies mit einer im Vergleich zur Auslegungslebensdauer verringerten Lebensrestdauer der Windkraftanlage einher.

Zone II repräsentiert einen Hochlast-Hochzyklus-Bereich. Messpunkte in diesem Bereich sind hochkritisch und deuten auf eine Überschreitung der Lebensdauer der Windkraftanlage hin.

Zone III repräsentiert einen Niederlast-Niederzyklus-Bereich. Messpunkte, welche vorwiegend in diesem Bereich liegen, bedeuten eine im Vergleich zur Auslegungsdauer erhöhte Restlebensdauer der Windkraftanlage.

Zone IV repräsentiert einen Niederlast-Hochzyklus-Bereich. Auch Messpunkte, welche vorwiegend in diesem Bereich liegen, deuten auf eine im Vergleich zur Auslegungsdauer erhöhte Restlebensdauer der Windkraftanlage hin.

Diagramm a) aus Fig. 6 zeigt ein Beispiel, bei dem die Messpunkte vorwiegend in den Zonen III und IV vorliegen, sodass die betroffene Windkraftanlage eine höhere Lebensrestdauer als die Auslegungslebensdauer aufweist.

Diagramm b) aus Fig. 6 zeigt ein Beispiel, bei dem die Messpunkte vorwiegend in den Zonen I und II vorliegen, sodass die betroffene Windkraftanlage eine niedrigere Lebensrestdauer als die Auslegungslebensdauer aufweist.

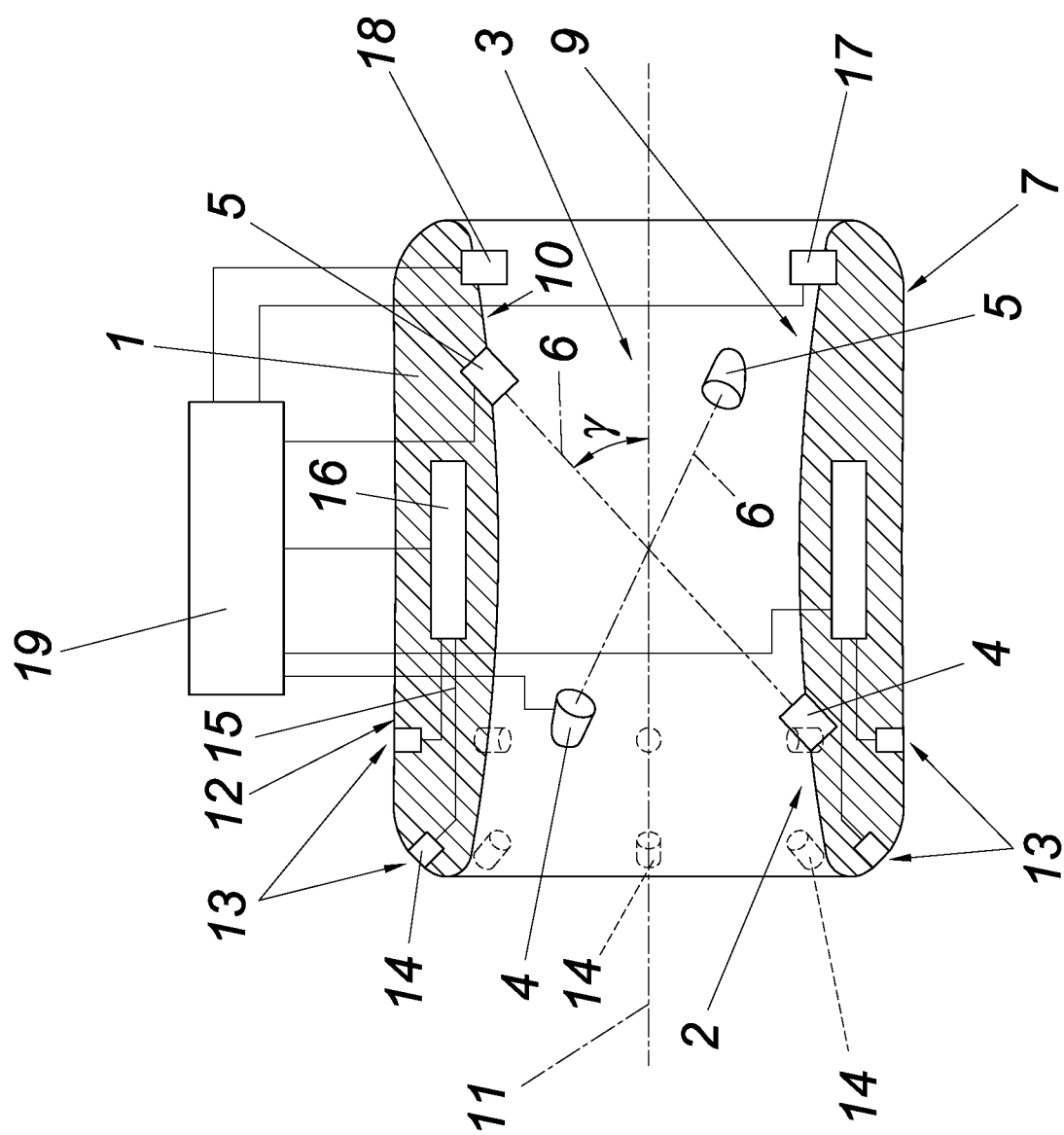
Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfkörpers (8) in rauen Einsatzgebieten umfassend ein Ultraschallanemometer (3) mit wenigstens einem Ultraschallsender (4) und einem Ultraschallempfänger (5), die gemeinsam eine Messstrecke (6) ausbilden, dadurch gekennzeichnet, dass das Ultraschallanemometer (3) in einem einen Einlaufkonus (2) aufweisenden Gehäuserohr (1) angeordnet ist und dass das Gehäuserohr (1) einen Montageabschnitt (7) zum Einführen in einen Prüfkörper (8) aufweist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Ultraschallsender (4) und Ultraschallempfänger (5) an sich gegenüberliegenden Seiten an der Innenfläche (10) des Gehäuserohrs (1) angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere je ein Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paar ausbildende Ultraschallsender (4) und Ultraschallempfänger (5) vorgesehen sind, wobei wenigstens zwei Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paare in Umfangsrichtung des Gehäuserohrs (1) zueinander versetzt sind.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Messstrecke (6) in einem Winkel (μ) von 25°-75° zur Gehäuserohrlängsachse (11) verläuft.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass am Gehäuserohraußenmantel (12) über den Mantelumfang verteilt angeordnete Staudrucksensoren (13) vorgesehen sind.

6. Prüfkörper (8) mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Prüfkörpers (8) angeordnet ist, wobei vorzugsweise das Gehäuserohr (1) aus der Anströmkante (20) hervorragt.
7. Rotorblatt eines Windkrafttrades mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Rotorblattes angeordnet ist, wobei vorzugsweise das Gehäuserohr (1) aus der Anströmkante (20) hervorragt.
8. Verfahren zur Bestimmung des Lastzustandes eines Windkrafttrades mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Rotorblattes angeordnet ist und dass mittels der Vorrichtung eine Anströmgeschwindigkeit (u_{Ans}) des Windes im Bereich der Anströmkante (20) gemessen wird, wonach in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit (u_{Ans}) eine auf das Rotorblatt einwirkende Einwirkkraft (F) bestimmt wird, welche gegen Lastzyklen (C) des Windkrafttrades aufgetragen wird.
9. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit (u_{Ans}), der translationsbedingten Kräfte und/oder der rotationsbedingten Kräfte auf das Rotorblatt einwirkende generalisierte Einwirkkräfte bestimmt werden, welche gegen Lastzyklen (C) des Windkrafttrades aufgetragen werden.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Einwirkkraft (F) bzw. die generalisierten Einwirkkräfte von einer Filtereinheit in einen gleitenden Mittelwert und einen Fluktuationswert aufgeteilt werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass in Längsrichtung der Anströmkante (20) des Rotorblattes mehrere Vorrichtungen nach einem der Ansprüche 1 bis 5 vorgesehen sind, mittels denen die Anströmgeschwindigkeit des Windes in unterschiedlichen Bereichen der Anströmkante (20) gemessen wird.

12. Verfahren zur Optimierung der Anströmverhältnisse eines Rotorblattes eines Windkrafttrades mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Rotorblattes angeordnet ist, dass die Vorrichtung mit einem Pitch-Regler des Windkrafttrades kommunikationsverbunden ist und dass die mithilfe der Vorrichtung ermittelten Windanströmungsbedingungen zur Wirkungsgraderhöhung der Rotorblattstellung herangezogen werden.

FIG.1



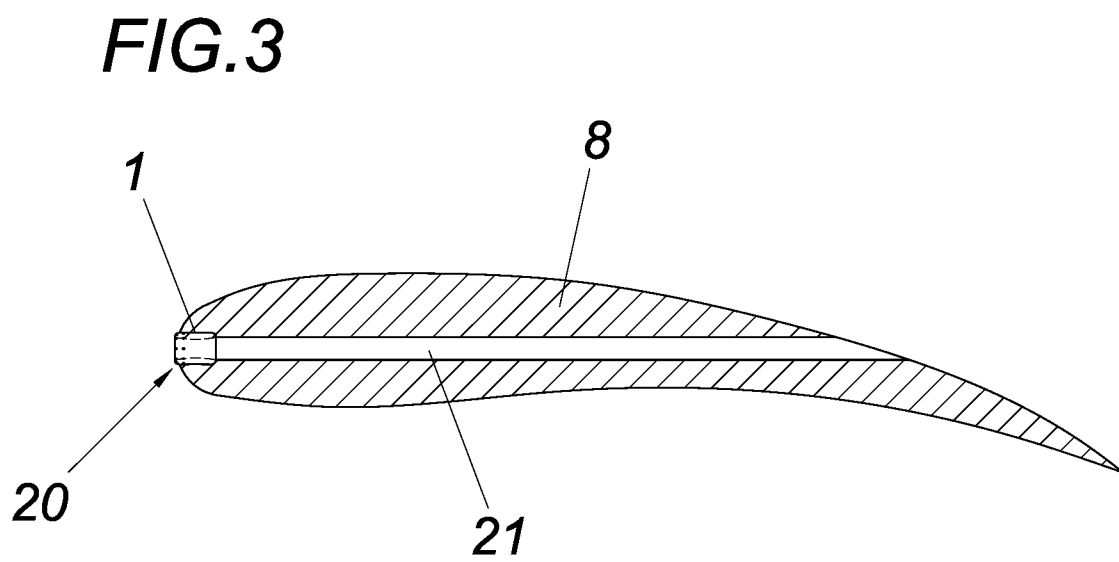
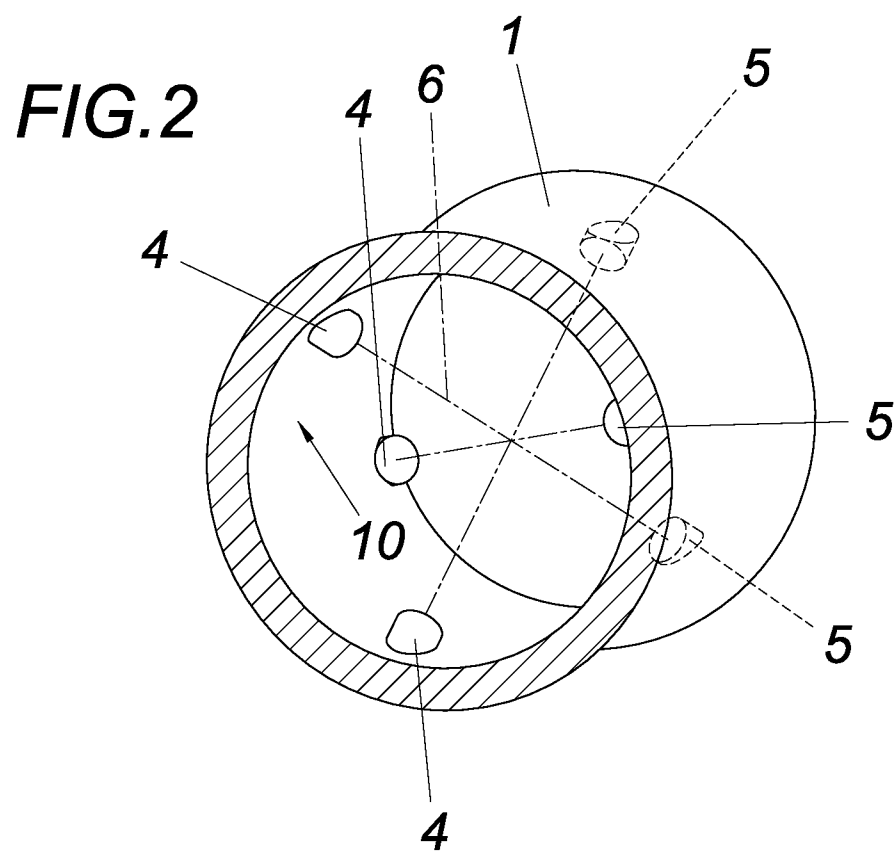


FIG.4

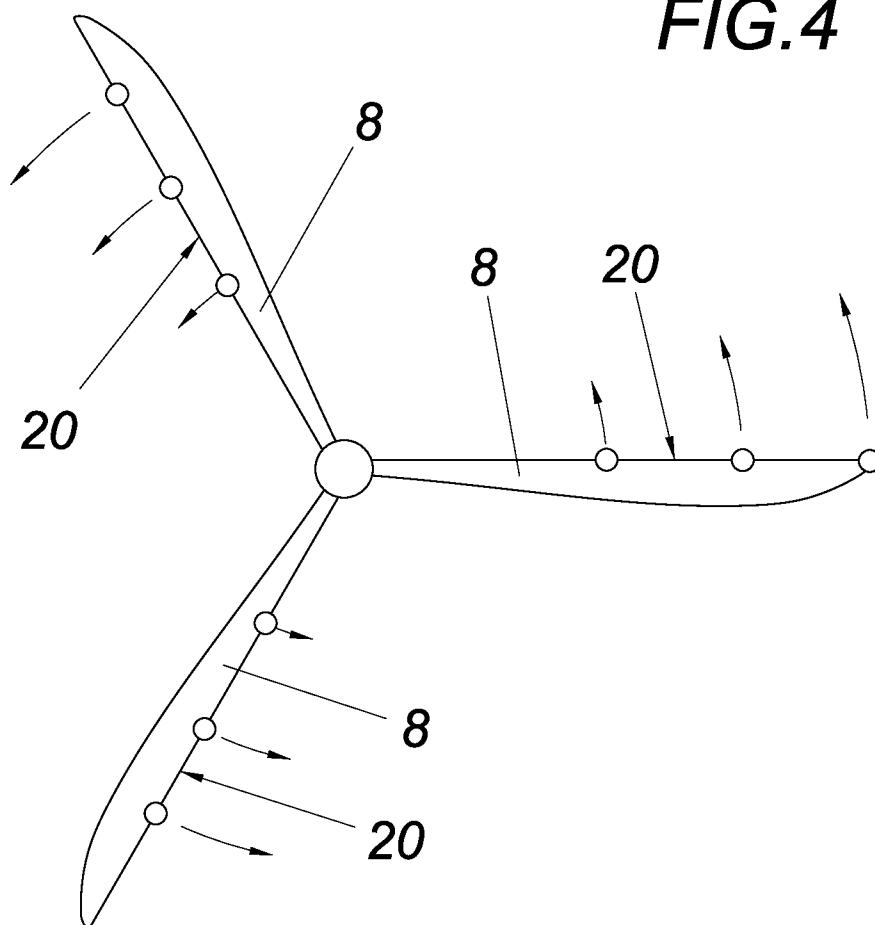


FIG.5

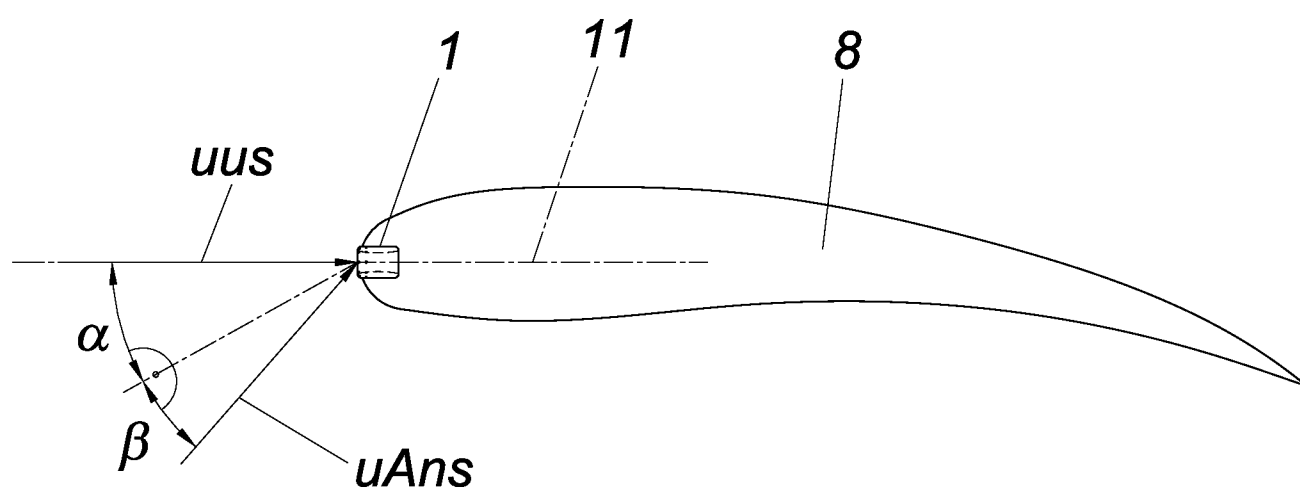
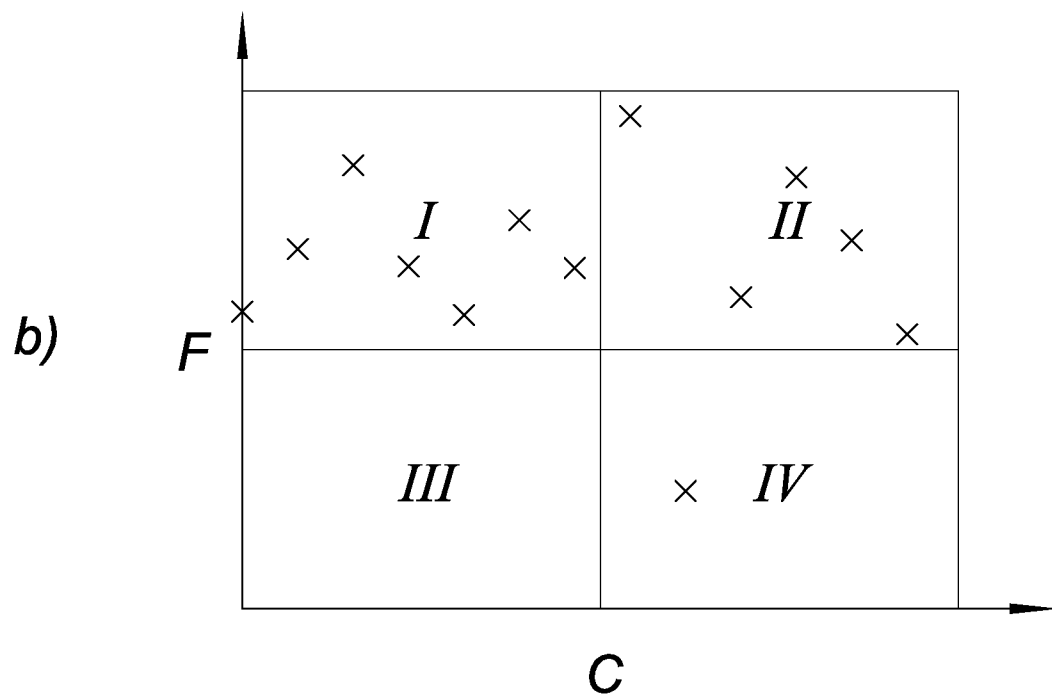
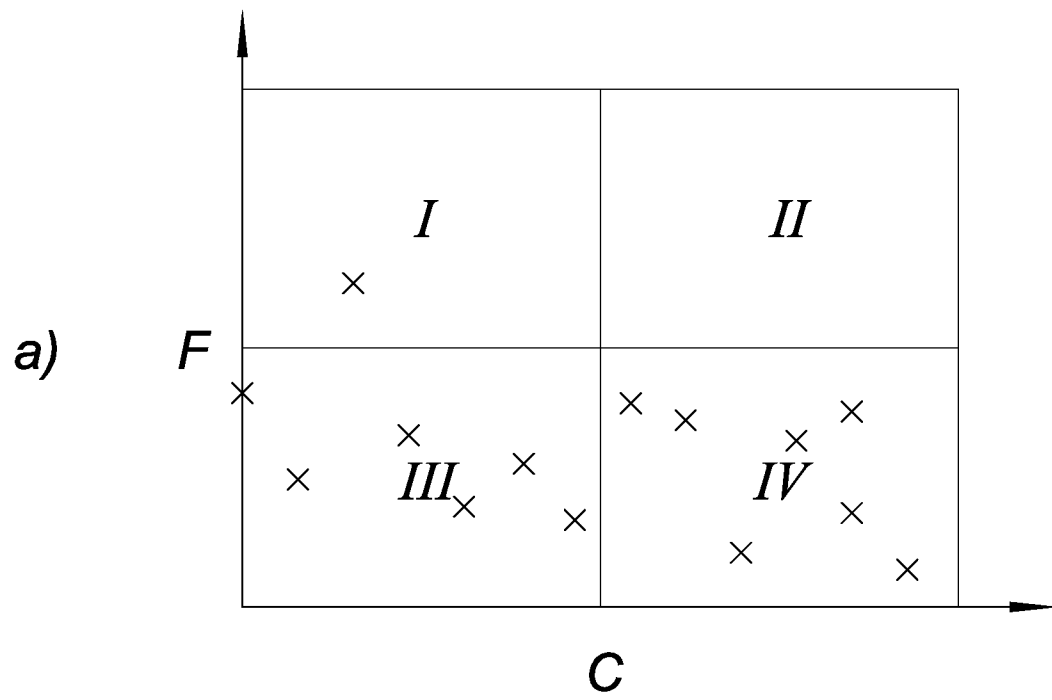


FIG.6



Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:

G01P 5/24 (2006.01); **F03D 7/02** (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:

G01P 5/245 (2013.01); **F03D 7/0204** (2023.08); **F05B 2270/321** (2013.01); **F05B 2270/328** (2023.08); **Y02E 10/72** (2013.01)

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):

G01P, F03D, F05B, Y02E

Konsultierte Online-Datenbank:

EPOQUE Volltext, WPI

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 15.02.2023 eingereichten Ansprüchen 1 - 12 erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
Y	EP 2 017 468 A1 (SIEMENS AG) 21. Januar 2009 (21.01.2009) Absatz [0013] - [0016], [0026] - [0039], [0049]; fig. 1 - 4	1, 5 - 8
Y	AT 523 396 B1 (FEICHTINGER) 15. August 2021 (15.08.2021) Abs. [0013] - [0016]; [0031] - [0032]; fig. 1	1, 5 - 8
A	EP 2 273 106 A2 (GEN ELECTRIC) 12. Januar 2011 (12.01.2011) Abs. [0014], [0015]; fig. 1, 2	1 - 12
A	EP 2 048 507 A2 (GEN ELECTRIC) 15. April 2009 (15.04.2009) Abs. [0027], [0028], [0036]; fig. 9	1 - 12
A	DE 30 00 678 A1 (ERNO RAUMFAHRTTECHNIK GMBH) 16. Juli 1981 (16.07.1981) Seite 5, letzter Absatz - Seite 6, letzter Absatz; fig. 1	1 - 12
A	EP 2 148 088 A1 (SIEMENS AG) 27. Januar 2010 (27.01.2010)	1 - 12
Datum der Beendigung der Recherche: 30.08.2023		
Seite 1 von 1		Prüfer(in): BAUER Heinrich

^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente:

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung: der Anmeldungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.

Y Veröffentlichung von Bedeutung: der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist.

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert.

P Dokument, das von Bedeutung ist (Kategorien X oder Y), jedoch nach dem Prioritätstag der Anmeldung veröffentlicht wurde.

E Dokument, das von besonderer Bedeutung ist (Kategorie X), aus dem ein „älteres Recht“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen).

& Veröffentlichung, die Mitglied der selben Patentfamilie ist.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Messen von Windanströmungsbedingungen eines bewegten Prüfkörpers (8) in rauen Einsatzgebieten umfassend ein Ultraschallanemometer (3) mit wenigstens einem Ultraschallsender (4) und einem Ultraschallempfänger (5), die gemeinsam eine Messstrecke (6) ausbilden, dadurch gekennzeichnet, dass das Ultraschallanemometer (3) in einem einen Einlaufkonus (2) aufweisenden Gehäuserohr (1) angeordnet ist und dass das Gehäuserohr (1) einen Montageabschnitt (7) zum Einführen in einen Prüfkörper (8) aufweist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Ultraschallsender (4) und Ultraschallempfänger (5) an sich gegenüberliegenden Seiten an der Innenfläche (10) des Gehäuserohrs (1) angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere je ein Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paar ausbildende Ultraschallsender (4) und Ultraschallempfänger (5) vorgesehen sind, wobei wenigstens zwei Ultraschallsender-Ultraschallempfänger-Paare in Umfangsrichtung des Gehäuserohrs (1) zueinander versetzt sind.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Messstrecke (6) in einem Winkel (μ) von 25°-75° zur Gehäuserohrlängsachse (11) verläuft.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass am Gehäuserohraußenmantel (12) über den Mantelumfang verteilt angeordnete Staudrucksensoren (13) vorgesehen sind.

6. Prüfkörper (8) mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Prüfkörpers (8) angeordnet ist, wobei vorzugsweise das Gehäuserohr (1) aus der Anströmkante (20) hervorragt.
7. Rotorblatt eines Windkrafttrades mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Rotorblattes angeordnet ist, wobei vorzugsweise das Gehäuserohr (1) aus der Anströmkante (20) hervorragt.
8. Verfahren zur Bestimmung des Lastzustandes eines Windkrafttrades mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Rotorblattes angeordnet ist und dass mittels der Vorrichtung eine Anströmgeschwindigkeit (u_{Ans}) des Windes im Bereich der Anströmkante (20) gemessen wird, wonach in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit (u_{Ans}) eine auf das Rotorblatt einwirkende Einwirkkraft (F) bestimmt wird, welche gegen Lastzyklen (C) des Windkrafttrades aufgetragen wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit (u_{Ans}), der translationsbedingten Kräfte und/oder der rotationsbedingten Kräfte auf das Rotorblatt einwirkende generalisierte Einwirkkräfte bestimmt werden, welche gegen Lastzyklen (C) des Windkrafttrades aufgetragen werden.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Einwirkkraft (F) bzw. die generalisierten Einwirkkräfte von einer Filtereinheit in einen gleitenden Mittelwert und einen Fluktuationswert aufgeteilt werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass in Längsrichtung der Anströmkante (20) des Rotorblattes mehrere Vorrichtungen nach einem der Ansprüche 1 bis 5 vorgesehen sind, mittels denen die Anströmgeschwindigkeit des Windes in unterschiedlichen Bereichen der Anströmkante (20) gemessen wird.

12. Verfahren zur Optimierung der Anströmverhältnisse eines Rotorblattes eines Windkrafttrades mit einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung im Bereich einer Anströmkante (20) des Rotorblattes angeordnet ist, dass die Vorrichtung mit einem Pitch-Regler des Windkrafttrades kommunikationsverbunden ist und dass die mithilfe der Vorrichtung ermittelten Windanströmungsbedingungen zur Wirkungsgraderhöhung der Rotorblattstellung herangezogen werden.