



(10) **DE 10 2017 129 708 B4** 2022.05.12

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 129 708.1**  
(22) Anmeldetag: **13.12.2017**  
(43) Offenlegungstag: **13.06.2019**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **12.05.2022**

(51) Int Cl.: **F03D 1/06 (2006.01)**

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

(73) Patentinhaber:  
**cp.max Rotortechnik GmbH & Co. KG, 01099 Dresden, DE; Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., 01069 Dresden, DE; Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, DE; WINDnovation Engineering Solutions GmbH, 10243 Berlin, DE**

**Frank, Dipl.-Ing., 13187 Berlin, DE; Perez-Becker, Sebastian, 10247 Berlin, DE; Schulze, Daniel, 10557 Berlin, DE**

(74) Vertreter:  
**Gottfried, Hans-Peter, Dipl.- Ing., 01067 Dresden, DE**

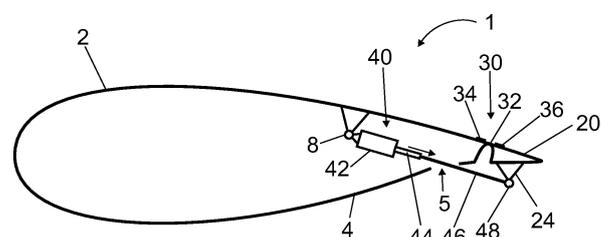
(56) Ermittelter Stand der Technik:

(72) Erfinder:  
**Friedel, Björn, 01069 Dresden, DE; Radermacher, Tobias, 01067 Dresden, DE; Rische, Thomas, Dr., 01326 Dresden, DE; Cerbe, Burkhard, 01109 Dresden, DE; Spickenheuer, Axel, Dr., 01307 Dresden, DE; Konze, Simon, 01127 Dresden, DE; Richter, Emanuel, 01099 Dresden, DE; Seewald,**

DE	10 2011 053 404	A1
DE	10 2012 104 317	A1
DE	10 2013 006 166	A1
GB	2 469 854	A
GB	2 475 694	A
GB	2 483 435	A
US	7 632 068	B2
US	2010 / 0 247 314	A1
US	2011 / 0 236 215	A1
EP	2 019 203	A2
EP	2 336 555	A1
WO	2004/ 088 130	A1
WO	2010/ 043 647	A2
WO	2012/ 103 891	A2

(54) Bezeichnung: **Hinterkantenklappe für ein Rotorblatt**

(57) Hauptanspruch: Hinterkantenklappe (20) für ein Rotorblatt (1) einer Windenergieanlage, umfassend eine Antriebseinrichtung (40), die mit der Hinterkantenklappe (20) verbunden und so ausgeführt ist, dass die Hinterkantenklappe (20) über die Antriebseinrichtung (40) um ein Gelenk, über das die Hinterkantenklappe (20) mit dem Rotorblatt (1) verbunden ist, aus einer Normalwinkelstellung ausgelenkt werden kann, dadurch gekennzeichnet, dass die Hinterkantenklappe (20) in sich torsionssteif, jedoch biegeweich ausgeführt ist, so dass sie bei übereinstimmenden Werten von Biegemoment und Torsionsmoment einer Torsion mehr Widerstand entgegensetzt als einer Biegung, wobei das Gelenk als wenigstens ein Filmgelenk (30) ausgeführt ist.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Hinterkantenklappe für ein Rotorblatt einer Windenergieanlage (WEA), umfassend eine Antriebseinrichtung, die mit der Hinterkantenklappe verbunden und so ausgeführt ist, dass die Hinterkantenklappe über die Antriebseinrichtung um ein Gelenk, über das die Hinterkantenklappe mit dem Rotorblatt verbunden ist, ausgelenkt werden kann.

**[0002]** Die Rotorblätter von Windenergieanlagen werden im Zuge der Weiterentwicklung der Windenergietechnik immer länger; hierdurch steigen die Masse und die Wirkung von aerodynamischen Lasten auf die Tragstruktur der Blätter. So haben Ermüdungslasten einen entscheidenden Einfluss bei der Dimensionierung. Bisherige Rotorblattverstellmechanismen, insbesondere die Pitchverstellung durch kollektive Drehung der Rotorblätter um ihre Längsachse und die damit einhergehende Verstellung des Anstellwinkels aller Rotorblätter, ermöglichen eine Reaktion auf die Änderung der Windbedingungen. Hier wird die Rotorblattstellung in der Regel aller 10 Minuten dem Mittel von Windgeschwindigkeit und -richtung angepasst. Bei der Einzelblattverstellung (individual pitch) durchlaufen alle Blätter den gleichen Pitchwinkel, aber um 120° phasenversetzt. Jedes Blatt kann im Betrieb unabhängig von den anderen verdreht werden.

**[0003]** Lokale aerodynamische Lasten wie Schwankungen in der Anströmung, etwa aufgrund von Böen, atmosphärischer Grenzschicht, Turmvorstau oder Nachläufen stromauf positionierter WEA, erfordern eine schnellere Anpassung der Umströmung. Bei Massen von über 40 t pro Rotorblatt in der neuesten Generation von WEA und den damit einhergehenden Trägheitsmomenten ist es auch mit individual pitch nicht wirtschaftlich möglich, dynamisch auftretende Lasten deutlich zu reduzieren.

**[0004]** Stand der Technik ist ansonsten die Veränderung der Umströmung mittels Schwenken einzelner (individual pitch) oder aller Rotorblätter gemeinsam (collective pitch). Lokale aerodynamische Lasten werden über die Dimensionierung der Blattstruktur abgefangen. Nachteilig ist dabei, dass die Rotorblätter stärker dimensioniert werden müssen und früher ermüden. Die Dimensionierung stößt im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Materialeinsatzes bei länger werdenden Blättern an ihre Grenzen.

**[0005]** Verstellbare Klappen an der Flügelhinterkante, wie aus dem Flugzeugbau bekannt, ermöglichen eine dynamische Beeinflussung der Umströmung der Rotorblätter und damit eine verringerte statische und dynamische Beanspruchung der Flügelstruktur.

**[0006]** Verstellbare Hinterkantenklappen besitzen, als Alternative zu einer aktiven Profilwölbung, das größte Potenzial Ermüdungslasten zu reduzieren. Die aktive Profilwölbung benötigt flexible Blattoberflächen, deren Einsatz in der Praxis kritisch betrachtet wird. Bewegliche Hinterkantenklappen hingegen wurden bezüglich ihrer aerodynamischen und aeroelastischen Wirkung vielfach untersucht. 3D-Simulationen legen nahe, dass durch bewegliche Hinterkantenklappen Lastspitzen des Blattwurzel- Biegemomentes um bis zu 36 % reduziert werden können. In aktuellen Forschungen untersuchte Klappenaktuatoren sind allerdings technologisch bedingt anfällig für Blitzeinschläge.

**[0007]** Die lokale Profiländerung durch Hinterkantenklappen als eine aus der Luftfahrt bekannte Technologie stieß bei der Einführung im Bereich der Windenergie bislang auf entscheidende Hindernisse. So werden die Hinterkantenklappen an WEA, verglichen mit der Tragfläche eines Flugzeugs, unter sehr verschiedenen Bedingungen eingesetzt. Die in der Luftfahrt eingesetzten Komponenten werden nach ca. 250 bis 650 Flugstunden (Betriebsstunden) inspiziert. Zudem sind diese Komponenten auf ein Versagen ausgelegt; Priorität hat hier die Masseersparnis.

**[0008]** Bei WEA besteht hingegen im Gegensatz hierzu die Forderung nach 17.520 Betriebsstunden (2 Jahre) ohne Wartungseingriff. Hinzu kommt, dass die wirkenden Belastungen in Form von Dauerschwingungen und Fliehkräften erheblich vom Anforderungsprofil in der Luftfahrt abweichen und die im Bereich der Luftfahrt eingesetzten Lösungen keinen Rückschluss auf das Verhalten unter den bei einer WEA geforderten Einsatzbedingungen zulassen. Eine Übertragung von Ergebnissen aus der Luftfahrt ist dem Fachmann daher, abgesehen von den physikalischen Grundlagen und der Beschreibung des an sich bekannten strömungstechnischen Effekts von Hinterkantenklappen, nur äußerst begrenzt möglich.

**[0009]** Weitere Besonderheiten bei WEA liegen neben dem Erfordernis eines sehr langlebigen wartungsarmen Betriebs auch in der zwingend notwendigen Widerstandsfähigkeit gegen Blitzeinschläge. Die Entwicklung und Umsetzung von Hinterkantenklappen in der Windkraft scheiterte somit bisher vor allem auch an den extremen Bedingungen, denen Rotorblätter im Betrieb ausgesetzt sind. Insbesondere Blitzschlag und die hohe Anzahl an servicefreien Betriebsstunden stellen hohe Anforderungen an die eingesetzte Technik. Gleichzeitig muss der aerodynamische Widerstand der Klappe minimal sein, um keine Minderung des Energieertrags in den Rotor hervorzurufen.

**[0010]** Die mechanischen Anforderungen an bewegliche Hinterkantenklappen für Windenergieanlagen hinsichtlich Geschwindigkeit und Anzahl der

Verstellbewegungen sind extrem hoch. In bisher bekannten Lösungen wurden bewegliche Hinterkantenklappen meist mit neuartigen Aktuatoren wie in der Blattoberfläche verbauten Piezoaktoren oder sogenannten „pneumatischen Muskeln“ realisiert. Die technische Umsetzung von beweglichen Hinterkantenklappen mit pneumatischen Muskeln aus Gummimaterial erscheint jedoch aus Sicht der Dauerhaftigkeit als nicht zielführend, weil das zum Einsatz verfügbare Material nicht hinreichend Erosions- und UV-stabil ist. Zudem kann eine ausreichend hohe Dynamik technisch schwer erreicht werden. Weder für diese, noch für die Technologie mit Piezoaktuatoren wurde im Stand der Technik die Praxistauglichkeit und ausreichende Lebensdauer durch einen Ermüdungstest nachgewiesen. Aus dem Stand der Technik sind verschiedene konkrete Lösungen bekannt.

**[0011]** Die Druckschrift US 2011 / 0 236 215 A1 mit dem Titel „Wind Turbine Control Surface Hinge“ beschreibt die Möglichkeit mehrteiliger Hinterkantenklappen, um die Belastungen zu reduzieren. Die Belastungen gehen zwangsläufig mit der Knickung um eine nichtlineare Gelenkachse einher, insbesondere bei Verformung des Rotorblatts im Betrieb.

**[0012]** Aus der Druckschrift WO 2004/ 088 130 A1 mit dem Titel „Control of Power, Loads and/or Stability of a horizontal axis wind turbine by use of variable blade Geometry control“ ist eine Möglichkeit der Vorflügel- wie Hinterkantenklappenaktuierung mit strukturvariablen Geometrien bekannt. Steife, stabile Klappenstrukturen werden jedoch nicht vorgeschlagen.

**[0013]** Die Druckschrift EP 2 019 203 A2 beschreibt eine Klappe aus flexiblen Material, in deren Mitte eine steife Platte durch balgartige Elemente mittels Druckluft ausgelenkt wird. Derartige „pneumatische Muskeln“ besitzen, wie nachfolgend nochmals erläutert, keine ausreichende dauerhafte Beständigkeit sowie eine nicht ausreichende Dynamik.

**[0014]** Nach der Druckschrift GB 2 469 854 A wird durch flexible Materialien unter Verzicht auf ein Gelenk ein kontinuierlicher Übergang zwischen dem Flügel und einer Klappe auf der Druck- und Saugseite geschaffen und deren Regelung beschrieben. Konkrete Antriebseinrichtungen für die Verstellung werden nicht näher betrachtet.

**[0015]** Die Druckschrift US 2010 / 0 247 314 A1 beschreibt einen Piezoaktor für die Klappenmechanik. Der Übergang von Klappe zu Blatt erfolgt durch eine flexible Oberfläche, jedoch liegt das eigentliche Drehgelenk im Inneren des Rotorblatts.

**[0016]** Eine Hinterkantenklappe gemäß Druckschrift WO 2012/ 103 891 A2 wird über einen Linearmotor

aktuert. Die Klappe besteht aus einer Honigwabenstruktur als Kernmaterial, einem Gummimaterial auf der Druckseite und faserverstärktem Kunststoff auf der Saugseite.

**[0017]** Die Druckschrift GB 2 475 694 A offenbart ein Rotorblatt, das einen Antrieb beherbergt und über eine Welle eine niederfrequente Aktuierung auf eine Klappe ausprägen kann. Gleichzeitig sollen die Klappenelemente durch Piezoelemente hochfrequent aktuier werden.

**[0018]** Aus der Druckschrift DE 10 2012 104 317 A1 kann eine Lösung für eine Hinterkantenklappe ausschließlich für den Rotorblattinnenbereich gefolgert werden. Sie ist geeignet, um in diesem Bereich die Strömungsablösung zu minimieren. Es sind jedoch keine Angaben zu einer tatsächlichen mechanischen Umsetzung offenbart.

**[0019]** In der Druckschrift US 7 632 068 B2 sind bewegliche Vorder- und Hinterkanten eines Rotorblatts beschrieben. Diese sind aus einem flexiblen Material ohne dezidierte Gelenke aufgebaut. Vorgeschlagen wird eine Änderung der Geometrie der Außenhaut. Beispielhaft werden pneumatische Muskeln oder hydraulische Aktoren genannt, wobei der Hebelarm innerhalb des Rotorblattes verläuft. Die Klappen bestehen aus einem gummiartigen Material mit jedoch unter praktischen Einsatzbedingungen begrenzter Haltbarkeit.

**[0020]** In der Druckschrift EP 2 336 555 A1 wird eine magnetisch aktuierte Klappe beschrieben, die entweder auf der Druck- oder auf der Saugseite sitzt. Zur Ausbildung der erforderlichen Gelenke und dem Blitzschutz ist nichts offenbart.

**[0021]** Aus der Druckschrift 10 2013 006 166 A1 ist die Verwendung eines Filmgelenks zur beweglichen Anbindung einer Hinterkantenklappe an ein Rotorblatt einer Windenergieanlage bekannt (vgl. Abs. [0003]). Zur Ausführung der Hinterkantenklappe, mit der das Filmscharnier zusammenwirken soll, und zur Ausführung des Filmscharniers an sich ist jedoch nichts offenbart.

**[0022]** Es ist angesichts des Stands der Technik und dessen Nachteilen Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein kompaktes Hinterkantenklappensystem für Rotorblätter anzubieten, das den praktischen Anforderungen an Robustheit, Langlebigkeit, Blitzschutzbeständigkeit, Wartbarkeit und Modularität gerecht wird. Die aus dem Stand der Technik vorbekannten Lösungen sind nicht geeignet, sämtlichen Anforderungen, die beim Betrieb einer WEA auftreten, gerecht zu werden.

**[0023]** Die Aufgabe wird gelöst durch eine Hinterkantenklappe für ein Rotorblatt einer Windenergiean-

lage, umfassend eine Antriebseinrichtung, die mit der Hinterkantenklappe verbunden und so ausgeführt ist, dass die Hinterkantenklappe über die Antriebseinrichtung um ein Gelenk, über das die Hinterkantenklappe mit dem Rotorblatt verbunden ist, ausgelenkt werden kann. Nach der Erfindung ist vorgesehen, dass die Hinterkantenklappe in sich torsionssteif, insbesondere durch ein geschlossenes Profil aus faserverstärktem Kunststoff mit Verstärkungsfasern, die in einem Winkel von  $\pm 45^\circ$  ausgerichtet sind, und mit einem geteilten Kern ausgeführt ist. Daneben ist die Hinterkantenklappe zugleich biegeweich ausgeführt. Als ein bevorzugtes Kernmaterial ist homogener und schubweicher vorgeformter Schaum vorgesehen. Bei dem Kern wird auf biegesteife Gurte oder Schubstege verzichtet. Das Verhältnis von Biegesteifigkeit und Torsionssteifigkeit ist so eingestellt, dass bei übereinstimmenden Werten von Biegemoment und Torsionsmoment einer Torsion mehr Widerstand entgegengesetzt als einer Biegung. Das Gelenk ist als Filmgelenk ausgeführt.

**[0024]** Weitere Vorteile der vorgeschlagenen Hinterkantenklappe liegen in der dynamischen Veränderung der lokalen Umströmung der Rotorblätter von Windenergieanlagen durch ein die Aerodynamik der Saugseite wenig beeinflussendes, modulares, wartungsarmes und blitzschlagresistentes Hinterkantenklappenkonzept mit hydraulischer Antriebseinrichtung. So werden eine Reduzierung der auf ein Rotorblatt wirkenden Ermüdungslasten, leichtere Rotorblätter, eine aerodynamisch vorteilhafte Struktur auf der Saugseite, langlebige Komponenten sowie einfach wartbare und austauschbare Komponenten erreicht. Zudem ist die eingesetzte Technik blitz- und wetterfest, da eine vorteilhafte Integration der Hydraulik in das Blitzschutzsystem erreicht wurde. Eine Fail-safe-Stellung ergibt sich durch die Verschaltung des Aktors automatisch.

**[0025]** Eine vorteilhafte Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung sieht vor, dass das Filmgelenk zur Anbindung an das Rotorblatt in ein Material mit homogener räumlicher Struktur, beispielsweise faserverstärkte, partikelverstärkte und/ oder unverstärkte Elastomere, Duromere, Thermoplaste und/ oder Duroplaste oder Werkstoffverbunde aus diesen Materialien eingebettet ist. Die vorgenannten Materialien weisen eine niedrige Steifigkeit mit einem E-Modul im Bereich von 1 bis 1000 MPa auf.

**[0026]** Die Vorteile eines Filmscharniers aus Faser-verbundmaterial bestehen gegenüber einer klassisch gestalteten beweglichen Lagerung mit Achsen und Kugellagern nach dem Stand der Technik weiterhin in einer deutlich geringeren Masse und der Möglichkeit einer haltbaren Konstruktion ohne elektrisch leitende Bauteile. Hinzu treten Verbesserungen der Lastsituation in Windenergieanlagen durch die Möglichkeit der aktiven dynamischen Strömungsbeein-

flussung und beim Materialaufwand im Vergleich mit einer klassischen Konstruktion und mit beweglicher Hinterkantengeometrie.

**[0027]** Als Resultat steht eine Erhöhung des Nutzungsgrades von Windenergieanlagen, insbesondere beim Vergleich der dynamischen Eigenschaften des Klappensystems mit herkömmlichen Pitchverfahren. Es wird außerdem dynamische Funktionalität bei der Strömungsbeeinflussung hinzugewonnen. Das erfindungsgemäße Rotorblatt weist, verglichen mit einem Rotorblatt nach dem Stand der Technik, eine geringere Masse oder bei gleicher Masse eine verlängerte Lebensdauer auf. Die erfindungsgemäße Lösung erschließt zudem auch weiteres Potenzial mit möglicher weiterer Vergrößerung von Rotordurchmessern, da durch Massereduktion bei unveränderter Peripherie größere Blätter eingesetzt werden können.

**[0028]** Die Ausgestaltung des Klappensystems ist bevorzugt so vorgesehen, dass die Klappentiefe ca. 10 % bis 20 % der Sehnenlänge beträgt. Der Winkelausschlag der Klappe beträgt bis zu etwa  $\pm 10^\circ$ . Die bevorzugte Länge des Klappenmoduls beträgt 3 m in Spannweitenrichtung. Das System ist auf eine Querbeschleunigung von bis zu 20 g ausgelegt. Das Klappensystem setzt der bei Rotorblättern üblichen Biegung in Schlag- und Schwenkrichtung keinen signifikanten Widerstand entgegen. Vielmehr ist das System darauf ausgelegt, sich entsprechend verformen zu können, ohne dass strukturelle Schäden entstehen.

**[0029]** Um die Wartung und den Tausch von Komponenten zu vereinfachen, wird das System bevorzugt in Differenzialbauweise ausgeführt. Das Klappensystem wird bei einer vorteilhaften Ausführungsform so konzipiert, dass es in einem Temperaturbereich von  $- 30^\circ\text{C}$  bis  $+50^\circ\text{C}$  funktioniert. Eingesetzte neuartige Materialien, vor allem im Gelenkbereich, wurden so ausgewählt, dass sie der Beeinträchtigung durch UV-Strahlung dauerhaft standhalten. Das Klappensystem wird in ein bestehendes Blitzschutzsystem im Rotorblatt integriert, wobei insbesondere die Hydraulikleitungen des Antriebs der erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe zugleich der Ableitung von Blitzströmen dienen.

**[0030]** Ein sinnvoller Montageort der Klappen befindet sich im äußeren Bereich des Rotorblattes, bevorzugt im äußeren Drittel. Die Beschränkung auf diesen Bereich geht mit einem reduzierten Aufwand einher und ist für eine effektive Lastreduzierung sinnvoll.

**[0031]** Erfindungsgemäß wird eine feste Klappe verwendet, elastische Strukturen sind nur für das Klappengelenk, angeordnet auf der Saugseite, geplant. Die Verwendung eines Gummimaterials als Hauptbestandteil der Klappenstruktur ist nicht vorgesehen,

denn es existieren wenige Erfahrungen in Bezug auf die Dauerfestigkeit dauerelastischer Strukturen. Die erfindungsgemäße Lösung verzichtet deshalb größtenteils auf biegeeweiche Elemente. Im Biegebereich des Gelenkes können jedoch Gummimaterialien ergänzend zur mechanischen Unterstützung der Faserverbundstruktur, vor allem als Abdeckung und zum Schutz vor Umwelteinflüssen, zum Einsatz kommen.

**[0032]** Die Auslegung der erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe erfolgt nach Maßgabe der notwendigen Steifigkeit und Dauerfestigkeit sowie unter Beachtung der Krafteinleitungsstellen und der Anbindung an das Gelenk. Hierbei ist ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst leichten Klappe, um die Zentrifugalkräfte gering zu halten, einer hinreichend hohen Steifigkeit, um Aero- und Strukturkräfte zu übertragen, und bei gleichzeitig ausreichender Flexibilität wegen der Biegung in Schwenk- und Schlagrichtung entsprechend aufzulösen und die Auslegung zu optimieren.

**[0033]** Bevorzugt ist das Filmgelenk der erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe als ein Faserverbundfilmgelenk, umfassend technische Fasern und ein sie umgebendes Matrixmaterial, ausgeführt. Zur Vorbereitung der Fertigung des Filmgelenks wird eine Materialoptimierung ausgeführt, bei der die Faserorientierungen der eingesetzten technischen Fasern den Lastverläufen im Bauteil angepasst werden.

**[0034]** Das Filmgelenk ist in der Weise ausgeführt, dass die Übertragung von Lasten, insbesondere einer Schubbeanspruchung, bei möglichst geringer Verschiebung der Hinterkantenklappe erfolgen kann. Weiterhin sind die Einstellung einer geeigneten Rückstellkraft und die Ausbildung einer gleichmäßigen Biegelinie im Gelenkbereich für eine hohe Reproduzierbarkeit der Klappenbewegungsform möglich. Dies wird erreicht durch das Erfüllen von den nachfolgend erläuterten beiden Anforderungen.

**[0035]** Anforderung 1: Die Einstellung einer geeigneten Rückstellkraft bedeutet einen Kompromiss, denn die Filmschicht im Gelenkbereich, bevorzugt gefertigt aus einem faserverstärkten Kunststoff, muss dünn genug sein, damit eine ausreichende Biegeflexibilität vorliegt. Sie muss jedoch dick genug sein, um den Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit gegenüber Schub, Zug und Druck gerecht zu werden. Dies ist besonders wichtig, um ein Ausknicken zu verhindern.

**[0036]** Anforderung 2: Auch die Ausbildung einer gleichmäßigen Biegelinie stellt einen Kompromiss dar, denn der gelenkige Bereich muss breit genug sein, um ausreichend flexibel zu sein, jedoch schmal genug, um bei einer Verformung des Rotorblatts unter einer im Betrieb auftretenden Last die Biegeli-

nie vom Rotorblatt möglichst genau auf die Klappe zu übertragen. Je schmaler (und dicker gemäß Anforderung 1) der Bereich ist, desto genauer erfolgt die Übertragung der Biegelinie, jedoch geht dies zulasten höherer Gelenkbeanspruchung und Rückstellkraft und einer geringeren Standzeit.

**[0037]** Nach einer vorteilhaften Weiterbildung ist das Filmgelenk so ausgeführt, dass es aus Sicht einer Gelenkachse beidseits eines flexibleren Bereichs je einen steiferen Bereich aufweist, die zur Anbindung an die Hinterkantenklappe einerseits und an das Rotorblatt andererseits vorgesehen sind, wobei der dazwischenliegende, flexiblere Bereich eine Klappenbewegung ermöglicht.

**[0038]** Die Verbindung zwischen Krafteinleitungsstelle und Klappe sowie die Anbindung der Klappe an die Blattstruktur sind so gestaltet, dass das Elastomer-Filmgelenk selbst der Verbindung von Klappe und Blattstruktur dient. Dies stellt eine Möglichkeit dar, ein Klappensystem als modulare Einheit in die Blattstruktur einzubinden. Als verwendete Materialien kommen Verstärkungsfasern in Form von textilen Halbzeugen (wie Geweben, Gelegen oder jeglichen sonstigen textilen Preformen), ein Kunststoff (duromer oder thermoplastisch) als Matrixmaterial und ein Elastomer als Deckschichten im gelenkigen Bereich in Betracht. Das Gelenk besitzt einen multi-axialen Aufbau und gliedert sich in drei Bereiche:

- a) eine steife, flächige Struktur zur Anbindung an Rotorblatt,
- b) einen elastischen Bereich und
- c) eine steife, flächige Struktur zur Anbindung an Klappe.

**[0039]** Der bevorzugte Aufbau des erfindungsgemäßen Gelenkbereichs sieht demnach einen Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) vor, der einseitig oder bevorzugt beidseitig von Elastomerschichten umschlossen ist. Die gesamte Verbundstruktur ist abschnittsweise mit abweichender Steifigkeit ausgeführt und weist die folgenden Bereiche auf:

- a) Anbindung Rotorblatt,
- b) gelenkiger Bereich,
- c) Anbindung Klappe,

wobei die genannte Abfolge der Bereiche quer zur Längsachse des Gelenks, um die die Gelenkbewegung erfolgt, angeordnet ist.

**[0040]** Die Gestaltung der Verbundstruktur sieht besonders bevorzugt eine unsymmetrisch ausgebildete, bereichsweise Gestaltung der Verbundstruktur sowie den Einsatz von Verstärkungsfasern vor. Als Verstärkungsfasermaterialien kommen Glasfasern

(beispielsweise E-Glas oder S-Glas), Carbonfasern und/ oder Aramidfasern in Betracht.

**[0041]** Als Matrixmaterial ist ein Duomer vorgesehen, das chemisch mit dem Elastomer, das eine Deckschicht ausbildet, vernetzt. Diese Materialien bieten zusammen die Möglichkeit einer stoffschlüssigen, hochfesten Anbindung. Weiterhin ist eine (Harz) konsolidierung durch Vakuuminfiltrationsprozesse vorgesehen und besonders bevorzugt. Als Elastomerkomponenten sind solche Elastomere vorgesehen, die während des Härteprozesses des Epoxidharzes mit diesem vernetzen und daher eine hochfeste Anbindung erreichen.

**[0042]** Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn das Filmgelenk in der Weise mit dem Rotorblatt verbunden ist, dass es auf einer ersten Seite des Rotorblattes, die im Betrieb als Saugseite dient, eine geschlossene Oberfläche bildet. Die Klappe ist demzufolge auf der Druckseite nicht kontinuierlich. Dies ist bei der vorliegenden Erfindung jedoch auch nicht erforderlich, da die treibende Kraft des Rotors auf der Saugseite generiert wird.

**[0043]** Besonders bevorzugt besteht die Hinterkantenklappe aus mehreren, gesondert antreibbaren Klappensegmenten. Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass sich das Filmgelenk über die gesamte Länge der Hinterkantenklappe oder des Klappensegments erstreckt und einteilig oder alternativ hierzu mehrteilig ausgeführt ist, wobei die mehrteilige Ausführung trennende Spalte im Bereich von wenigen Millimetern zwischen den Teilen aufweist.

**[0044]** Eine vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass als Antriebseinrichtung eine Getriebe-Aktor-Kombination, umfassend einen linearen Antrieb als Aktor und ein Getriebe, vorgesehen ist. Das Getriebe ist so ausgeführt, dass es die Linearbewegung des Antriebs in einen Winkelantrieb für einen Stellwinkel der Hinterkantenklappe wandeln kann. Teile der Antriebseinrichtung können aus der Geometrie des Rotorblatts herausgeführt werden, so dass sie die Oberfläche des Rotorblatts überragen. Es wird bevorzugt ein hydraulischer Aktor eingesetzt, dessen Hebelarm außerhalb der Druckseite an der Klappe angreift. Die Hebelführung außerhalb der Klappe hat strömungstechnisch geringen Einfluss. Sie vergrößert jedoch in vorteilhafter Weise den angreifenden Hebel mit der Folge, dass die notwendigen Kräfte verringert werden.

**[0045]** Der verwendete Aktor führt eine vorzugsweise lineare Bewegung aus, die über ein Getriebe in die Drehbewegung der Klappe übersetzt wird. Der Aktor wird an die tragende Struktur des Rotorblattes mit den für die Bewegung des Getriebes notwendigen Freiheitsgraden metallisch leitend montiert. Die

Anbindung der Antriebseinrichtung an die Hinterkantenklappe erfolgt zwischen einem Hydraulikzylinder und einer Krafteinleitungsstelle. An die Anbindung werden verschiedene Anforderungen gestellt.

**[0046]** Die erste Anforderung besteht darin, dass das Verbindungselement bzw. -bauteil im Wesentlichen die Positionierung der Lager und eine hohe Struktursteifigkeit bei Aktorbewegung gewährleisten muss. Hierzu ist ein FKV- Leichtbaulasteinleitungselement zur Anbindung von Aktor und Klappensegment vorgesehen. Insbesondere ist eine feste Verbindung mit der Klappe und über eine Bolzenverbindung mit rotatorischem Freiheitsgrad mit der Aktorkomponente vorgesehen. Die eingesetzten Faser-verbundbauteile weisen bevorzugt eine variabelaxiale Faserauslegung auf, somit ist eine Ausführung als variabelaxiales Faserdesign bevorzugt. Alternativ hierzu ist ein multiaxialer Aufbau vorgesehen.

**[0047]** Das Lasteinleitungselement ist fest mit der Hinterkantenklappe und über eine Glasfaser-Bolzenverbindung mit rotatorischem Freiheitsgrad mit der Aktorkomponente verbunden. Zwei Kugellager sind in das Lasteinleitungselement eingebettet. Eine T-Stoß-FKV-Verbindungsstange (bevorzugt auf Basis von Glasfaser) überträgt die Kräfte und die Bewegung des Aktors über die klappenseitig am Lasteinleitungselement befindlichen Kugellager.

**[0048]** Eine zweite Anforderung betrifft die Anbringung an die Klappe. Diese muss aus Blitzschutzgründen elektrisch nichtleitend ausgeführt werden. Hierzu erfolgen bevorzugt die Verwendung von Keramikugellagern, der ausschließliche Einsatz von Klebeverbindungen sowie die Verwendung von nichtleitenden Verstärkungsfasern. Dies sind nach der Erfindung bevorzugt Glasfasern, da diese im Windenergiesektor nahezu ausschließlich zum Einsatz kommen und auch wegen ihrer hohen Bruchdehnung präferiert werden. Als ein alternatives Material kommt Aramid in Betracht.

**[0049]** Eine entsprechende Aufnahme des Aktors ermöglicht den seilgestützten Wechsel am Blatt, was zu einer vereinfachten Wartung beiträgt. Die Anbindung an die bewegliche Klappe bzw. das Getriebe erfolgt über eine spielfreie nichtmetallische Verbindung.

**[0050]** Es hat sich als günstig erwiesen, wenn die Komponenten der hydraulisch- mechanischen Einheit so ausgeführt sind, dass sie als ein Teil eines integrierten Blitzschutzsystems des Rotorblatts fungieren und Leitungen eines Hydraulikbetriebsmediums als Blitzableiter dienen. Aus der Erfahrung mit Blitzeinschlagschäden wird ein Einsatz von Piezoaktorik ausgeschlossen, da die Einschlagwahrscheinlichkeit durch die Verwendung von leitenden oder metallischen Werkstoffen stark erhöht wird. In

der Folge würde der Wartungsaufwand ansteigen und das Hinterkantenklappensystem unwirtschaftlich.

**[0051]** Die Integration des hydraulischen Systems in das Blitzschutzkonzept der Windenergieanlage umfasst allgemein verschiedene Maßnahmen, darunter Kapselung oder Einrichtung eines Faraday'schen Käfigs. Das hydraulische System ist insoweit in das Blitzschutzkonzept der Anlage integriert, da eine Kapselung aufgrund des Platzbedarfes im Rotorblatt nicht möglich ist. Alle metallischen Teile werden mit dem in der WEA vorhandenen Überspannungsableiter verbunden. Die metallischen Hydraulikrohre werden in ihrem Querschnitt so ausgelegt, dass sie den Blitzstrom tragen können. Die Verbindung der sich gegeneinander bewegenden Teile sollte zusätzlich auf einem widerstandsarmen blitzstromtragfähigen Weg erfolgen.

**[0052]** Die sichere Fail-save-Stellung, bei der der Aktor automatisch ausfährt, wird durch den Einsatz eines Differentialzylinders in den meisten Fehlerfällen automatisch erreicht.

**[0053]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft die Verwendung eines Filmgelenks zur beweglichen Anbindung einer Hinterkantenklappe an ein Rotorblatt einer Windenergieanlage.

**[0054]** Weiterhin ist ein Steuerungskonzept bzw. ein Regelungsverfahren vorgesehen, das eine Integration der notwendigen Steuerungsaspekte in bekannte Steuerungstopologien umfasst. Hierzu gehören beispielsweise Echtzeitfähigkeit, Auflösung, Signalgüte, Verzugszeiten und Störimpfindlichkeit sowie weiterhin Trajektorien (Bewegungsprofilvorgaben). Das Steuerungskonzept muss eine ausreichende Auflösung für die verwendete Energieflusssteuerung (z. B. durch ein Hydraulikventil) aufweisen. Verzugszeiten von bis zu 20 ms sind bei Bewegungszyklen von 1,5 Hz und einer erreichten Genauigkeit der Hinterkantenklappe von  $0,1^\circ$  akzeptabel. Das Rauschen ist entsprechend dieser Vorgaben zu reduzieren. Die elektrischen und elektronischen Schnittstellen sind entsprechend den Anforderungen der Steuerung zu wählen. Eine drahtlose Übertragung von Sensor- und Aktorsignalen ist zu bevorzugen, um vor allem in Hinblick auf den Blitzschutz die Anzahl der leitfähigen Bauteile im Rotorblatt zu reduzieren.

**[0055]** Das Ventil-Aktuator-System umfasst bevorzugt einen Positionssensor im Zylinder sowie einen ventilgesteuerten Zylinderantrieb. Weiterhin umfasst sind der Zylinder, das Ventil, Verbindungselemente, Sensorik und Versorgungselektronik, ggf. auch ein Tank und eine Pumpe sowie ein Leitungssystem. Eine Einbindung von Zentralversorgungen unabhängiger oder teilweise unabhängiger verdrängerge-

steuerter Aktoren ist ebenso möglich. Möglichkeiten zur Detektion aerodynamischer Lasten bestehen in einer Einbindung von Drucksensoren in das hydraulische System. Ebenso ist die Implementierung eines Modells für wirkende Reibkräfte vorgesehen, die die Detektionsgenauigkeit verbessern helfen.

**[0056]** Anhand der Beschreibung von Ausführungsbeispielen und ihrer Darstellung in den zugehörigen Zeichnungen wird die Erfindung nachfolgend näher erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1:** schematisch eine geschnittene Seitenansicht eines Rotorblatts mit einer erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe;

**Fig. 2:** schematisch eine perspektivische Ansicht eines Filmgelenks einer erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe; und

**Fig. 3:** schematisch eine perspektivische Ansicht eines Teils eines Rotorblatts mit einer erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe.

**[0057]** Fig. 1 zeigt schematisch eine geschnittene Seitenansicht eines Rotorblatts 1 mit einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe 20. Die Hinterkantenklappe 20 ist über ein Scharnier, gemäß der Erfindung ein Filmgelenk 30, auf der Saugseite 2 (auch als suction side bezeichnet), die gegenüber der Druckseite 4 mit einer Ausnehmung 5 liegt, an das Rotorblatt 1 angebunden. Für die Anbindung wurde die Saugseite 2 gewählt, um die treibende Strömung möglichst wenig zu stören.

**[0058]** Dargestellt ist das Filmgelenk 30, das einen flexiblen Bereich 32, der beidseits von steifen Bereichen 34, 36 begrenzt wird, aufweist. Der steife Bereich 34 ist zur Anbindung an das Rotorblatt 1 vorgesehen, dem steifen Bereich 36 ist die entsprechende Funktion zur Anbindung an die Hinterkantenklappe 20 zugeordnet.

**[0059]** Weiterhin ist eine Antriebseinrichtung 40 vorgesehen, die dazu dient, die Hinterkantenklappe 20 bewegen zu können. Die Hinterkantenklappe 20 ist über eine Klappenhebelstütze 24, ein elektrisch nichtleitendes Verbindungselement, eine durch die Ausnehmung 5 hindurchgeführte Schubstange 46, an einen als linearer Antrieb ausführbaren, im Inneren des Profils des Rotorblatts 1 liegenden Aktor, hier im Ausführungsbeispiel eines Hydraulikzylinders 42, angebunden. Der Hydraulikzylinder 42 kann durch jeden anderen Linearantrieb ersetzt werden, ebenso durch rotatorische Antriebe, die um eine lineare Umsetzung, beispielsweise einen Kurbeltrieb, ergänzt wurden.

**[0060]** Der Hydraulikzylinder 42 ist wiederum mittels eines Gelenks 8, welches die für die Funktion notwendigen Freiheitsgrade aufweist, mit der Innenseite

des Rotorblatts 1 verbunden. Durch die Anordnung im Wesentlichen im Blattinneren ist die Antriebseinrichtung 40 gut geschützt und beeinträchtigt die Strömungen um die Blattoberfläche nur wenig.

**[0061]** Ein parallel zur Kolbenstange 44 verlaufender Pfeil zeigt eine erste Bewegungsrichtung der Schubstange 46, um die Hinterkantenklappe 20 um das Gelenk 30 zu kippen. Eine zweite, gegenläufige Bewegungsrichtung kippt die Hinterkantenklappe 20 um das Gelenk 30 zurück. An der Hinterkantenklappe 20 ist die das Schubgelenk 48 aufweisende Klappenhebelstütze 24 angeordnet. Ebenfalls mit dem Schubgelenk 48 ist die Schubstange 46 verbunden, die von der Kolbenstange 44 des Hydraulikzylinders 42 angetrieben wird.

**[0062]** Bei einem beispielhaften 44-m-Referenzblatt sind drei einzeln ansteuerbare Elemente der Hinterkantenklappe 20 mit jeweils einer Länge von 3 m in Längsrichtung des Rotorblatts 1 betrachtet hintereinander vorgesehen. Die Aufteilung in mehrere Elemente führt zu einer signifikanten Reduktion des maßgebenden Blattwurzelbiegemomentes.

**[0063]** Fig. 2 zeigt schematisch eine perspektivische Ansicht eines Filmgelenks 30 einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe. Das Filmgelenk 30 besitzt einen multiaxialen Aufbau und gliedert sich in drei Bereiche: a) den steifen Bereich 34 als steife, flächige Struktur zur Anbindung an das Rotorblatt, b) den flexiblen, elastischen Bereich 32 und c) den steifen, flächigen Bereich 36 zur Anbindung an die Hinterkantenklappe 20 (vgl. Fig. 1). Die Laminatdicken der Anbindungsflächen, der steifen Bereiche 34, 36, können in einem Bereich von 0,5 mm bis 5 mm liegen, besonders bevorzugt bei 4 mm.

**[0064]** Im bevorzugten Ausführungsbeispiel ist für die steifen Bereiche 34, 36 ein multiaxialer Aufbau vorgesehen, der sich durch folgende Kenngrößen auszeichnet:

$$\left[ (0/90)_{4,GF1} / \pm 45_{GF2} / (0/90)_{GF2} \right]_S$$

GF1: 580 g/m<sup>2</sup> Glasfasergewebe;

GF2: 100 g/m<sup>2</sup> Glasfasergewebe

**[0065]** Die Anzahl der Lagen von Fasern 37 und Matrixmaterial 38 ist vor allem abhängig vom Flächengewicht eines Gewebes, das durch die Fasern 37 gebildet wird.

**[0066]** Für den flexiblen Bereich 32 ist für das dargestellte bevorzugte Ausführungsbeispiel ebenfalls ein multiaxialer Aufbau vorgesehen, jedoch mit den Werkstoffkenngrößen:

$$\left[ 2 \text{ mm Elastomer} / \pm 45_{GF2} / (0/90)_{GF2} \right]_S$$

**[0067]** Die steifen Bereiche 34, 36 sind zur besseren Anbindung an das Rotorblatt bzw. die Hinterkantenklappe um ein winkelförmig anschließendes Element ergänzt.

**[0068]** Fig. 3 zeigt schematisch eine perspektivische Ansicht eines Teils eines Rotorblatts 1 mit einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Hinterkantenklappe 20 mit der Klappenhebelstütze 24. Die Hinterkantenklappe 20 besteht in der bevorzugten Ausführungsform aus zwei Halbschalen mit  $\pm 45^\circ$  Lagenaufbau ( $45^\circ$ -Winkel der Fasern 37 in Bezug zur Längsachse der Hinterkantenklappe 20) eines Fasergeleges, z. B. eines GFK-Geleges, die wie ein Rotorblatt 1 an der Vorder- und Hinterkante verklebt werden. In der Hinterkantenklappe 20 befindet sich ein geteilter Kern, der die Halbschalen stützt und mit diesen verklebt wird. Somit wiegt die bevorzugte Hinterkantenklappe 20 ohne Gelenke beispielsweise nur 4,45 kg bei 3 m Länge. An den freien Eckpunkten der Hinterkantenklappe 20 entsteht bei der bevorzugten Ausführungsform eine Torsionswinkeländerung aufgrund der Nennlasten von weniger als  $1^\circ$  bei 1,5 m Torsionslänge.

**[0069]** Im Bereich einer Ausnehmung 5 für die Schubstange 46 der Antriebseinrichtung 40 (vgl. auch Fig. 1) muss die Blattoberfläche geöffnet sein. Der Ausbruch zur Herstellung der Ausnehmung 5 erfolgt vorzugsweise trapezförmig und mit abgerundeten Ecken. Die lange Seite kann sowohl zur Hinterkante als auch zur Vorderkante zeigen. Der Aufbau des Gelenks 30 entspricht der Darstellung in Fig. 2.

**[0070]** Im Bereich der Ausnehmung 5 werden die Hinterkantenbänder oder -gurte, die Teil der Tragstruktur des Rotorblattes 1 sind und dessen Schwenksteifigkeit und Schwenkstabilität gewährleisten, unterbrochen, beendet oder um den Ausbruch herumgeführt.

Bezugszeichenliste

1	Rotorblatt
2	Saugseite
4	Druckseite
5	Ausnehmung
8	Gelenk
20	Hinterkantenklappe
24	Klappenhebelstütze
30	Filmgelenk
32	flexibler Bereich
34	steifer Bereich

36	steifer Bereich
37	Fasern
38	Matrixmaterial
40	Antriebseinrichtung
42	Hydraulikzylinder
44	Kolbenstange
46	Schubstange
48	Schubgelenk
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
WEA	Windenergieanlage

### Patentansprüche

1. Hinterkantenklappe (20) für ein Rotorblatt (1) einer Windenergieanlage, umfassend eine Antriebseinrichtung (40), die mit der Hinterkantenklappe (20) verbunden und so ausgeführt ist, dass die Hinterkantenklappe (20) über die Antriebseinrichtung (40) um ein Gelenk, über das die Hinterkantenklappe (20) mit dem Rotorblatt (1) verbunden ist, aus einer Normalwinkelstellung ausgelenkt werden kann, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Hinterkantenklappe (20) in sich torsionssteif, jedoch biegeweich ausgeführt ist, so dass sie bei übereinstimmenden Werten von Biegemoment und Torsionsmoment einer Torsion mehr Widerstand entgegengesetzt als einer Biegung, wobei das Gelenk als wenigstens ein Filmgelenk (30) ausgeführt ist.

2. Hinterkantenklappe nach Anspruch 1, wobei das Filmgelenk (30) in der Weise mit dem Rotorblatt (1) verbunden ist, dass es auf einer ersten Seite des Rotorblatts (1), die im Betrieb als Saugseite (2) dient, zusammen mit der Oberfläche des Rotorblatts (1) eine geschlossene, gleichmäßige Oberfläche bildet.

3. Hinterkantenklappe nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Filmgelenk (30) als ein Faserverbundfilmgelenk, umfassend technische Fasern (37) und ein sie umgebendes Matrixmaterial (38), ausgeführt ist.

4. Hinterkantenklappe nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das Filmgelenk (30) zur Anbindung an das Rotorblatt (1) einen steifen Bereich (34) aufweist und mit diesem an ein Material mit homogener räumlicher Struktur und niedriger Steifigkeit mit einem E-Modul im Bereich von 1 bis 1000 MPa angebunden ist.

5. Hinterkantenklappe nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das Filmgelenk (30) so ausgeführt ist, dass es aus Sicht einer Gelenkachse beidseits eines flexibleren Bereichs (32) je einen

steiferen Bereich (34, 36) aufweist, die zur Anbindung an die Hinterkantenklappe (20) einerseits und an das Rotorblatt (1) andererseits vorgesehen sind, wobei der dazwischenliegende, flexiblere Bereich (32) eine Klappenbewegung ermöglicht.

6. Hinterkantenklappe nach einem der vorherigen Ansprüche, die aus mehreren, gesondert antreibbaren Klappensegmenten besteht und/ oder im äußeren Drittel des Rotorblatts (1) angeordnet ist.

7. Hinterkantenklappe nach Anspruch 6, wobei sich das Filmgelenk (30) über die gesamte Länge der Hinterkantenklappe (20) oder des Klappensegments erstreckt und ein- oder mehrteilig ausgeführt ist, wobei die mehrteilige Ausführung trennende Spalte zwischen den Teilen aufweist.

8. Hinterkantenklappe nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei als Antriebseinrichtung (40) eine Getriebe-Aktor-Kombination, umfassend einen linearen Antrieb als Aktor und ein Getriebe, vorgesehen ist, wobei das Getriebe zur Wandlung der Linearbewegung des linearen Antriebs in einen Winkelabtrieb für das Erreichen eines Stellwinkels der Hinterkantenklappe (20) ausgeführt ist.

9. Hinterkantenklappe nach Anspruch 8, wobei der Aktor als ein mit einer hydraulischmechanischen Einheit verbundener Hydraulikzylinder (42) ausgeführt ist.

10. Hinterkantenklappe nach Anspruch 8 oder 9, wobei die Komponenten der hydraulischmechanischen Einheit so ausgeführt sind, dass sie als ein Teil eines integrierten Blitzschutzsystems des Rotorblatts (1) fungieren und Leitungen eines Hydraulikbetriebsmediums als Blitzableiter dienen.

11. Verwendung eines Filmgelenks (30) zur beweglichen Anbindung einer Hinterkantenklappe (20) an ein Rotorblatt (1) einer Windenergieanlage, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Hinterkantenklappe (20) in sich torsionssteif, jedoch biegeweich ausgeführt ist, so dass sie bei übereinstimmenden Werten von Biegemoment und Torsionsmoment einer Torsion mehr Widerstand entgegengesetzt als einer Biegung, und wobei das Filmgelenk (30) als ein Faserverbundfilmgelenk, umfassend technische Fasern (37) und ein sie umgebendes Matrixmaterial (38), ausgeführt ist.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

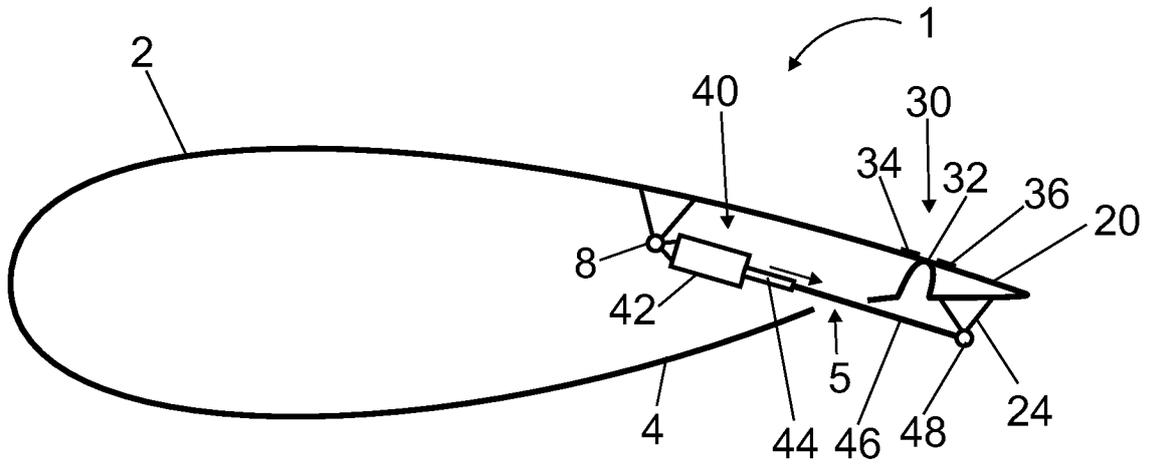


Fig. 1

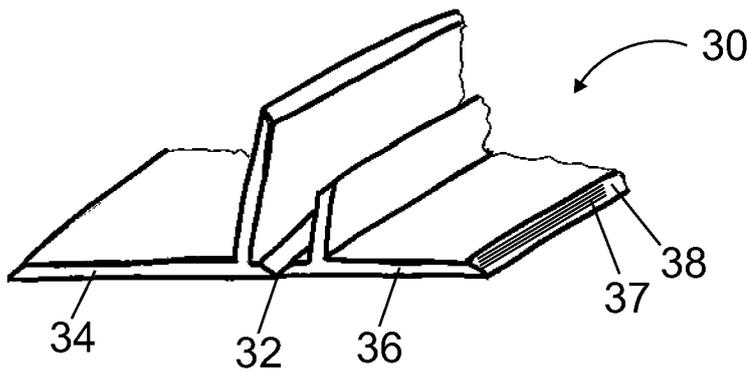


Fig. 2

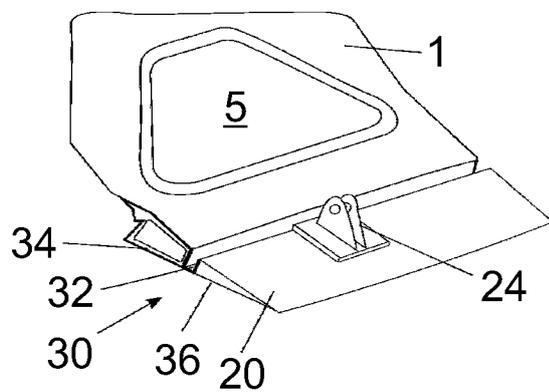


Fig. 3