

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
10. Dezember 2009 (10.12.2009)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2009/146810 A2**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
F03D 1/06 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/003712
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
26. Mai 2009 (26.05.2009)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2008 026 474.1 3. Juni 2008 (03.06.2008) DE
- (71) Anmelder und  
(72) Erfinder: MICKELER, Siegfried [DE/DE]; Itzweg 18,  
97422 Schweinfurt (DE).
- (74) Anwalt: MÖLL, BITTERICH & DR. KELLER;  
Westring 17, 76829 Landau (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ,

EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

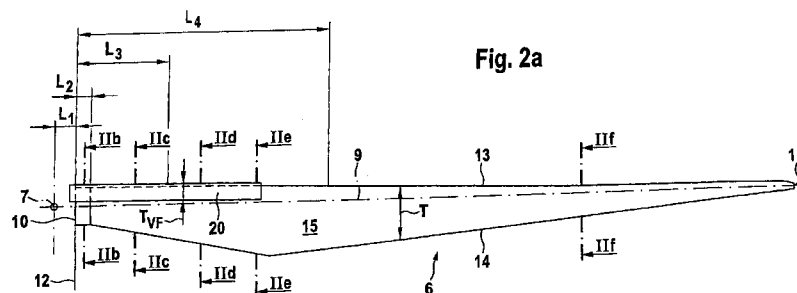
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,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

Veröffentlicht:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) Title: ROTOR BLADE FOR A WIND POWER PLANT AND WIND POWER PLANT

(54) Bezeichnung: ROTORBLATT FÜR EINE WINDKRAFTANLAGE SOWIE WINDKRAFTANLAGE



(57) Abstract: The invention relates to a rotor blade for a wind power plant, particularly for a horizontal axis wind turbine having an aerodynamic profile comprising a pressure side (16) and a suction side (15). The depth (T) of the aerodynamic profile is determined by the distance from the front blade edge (13) to the rear blade edge (14), and the thickness (D) thereof is defined by the distance from the suction side (15) to the pressure side (16). The rotor blade extends, starting from the blade connection (10), along a longitudinal extension direction to the blade tip (11). According to the invention, a fore flap (20) is disposed in the region of the front edge (13) on the suction side (15) of the rotor blade (6), maintaining a gap to the suction side (15), said flap extending approximately from the blade connection (10) over a maximum of one-third of the length of the rotor blade (6). Using the fore flap (20), the power deficiencies due to the aerodynamically imperfect profile in the indicated region are at least partially compensated for, thus increasing the power potential of a rotor blade according to the invention.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Rotorblatt für eine Windkraftanlage, insbesondere

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2009/146810 A2



---

für eine Horizontalachsenwindturbine mit einem aerodynamischen Profil, das eine Druckseite (16) und eine Saugseite (15) aufweist. Die Tiefe (T) des aerodynamischen Profils wird durch den Abstand der Blattvorderkante (13) zur Blatthinterkante (14) bestimmt, und dessen Dicke (D) ist durch den Abstand der Saugseite (15) zur Druckseite (16) definiert. Das Rotorblatt erstreckt sich ausgehend vom Blattanschluss (10) entlang einer Längserstreckungsrichtung zur Blattspitze (11). Gemäß der Erfindung ist auf der Saugseite (15) des Rotorblatts (6) im Bereich der Vorderkante (13) unter Einhaltung eines Spalts zur Saugseite (15) ein Vorflügel (20) angeordnet, der sich etwa vom Blattanschluss (10) über maximal ein Drittel der Länge des Rotorblatts (6) erstreckt. Mit Hilfe des Vorflügels (20) werden die Leistungsdefizite aufgrund aerodynamisch unvollkommener Profile im angegebenen Bereich wenigstens teilweise kompensiert und dadurch das Leistungspotential eines erfindungsgemäßen Rotorblatts erhöht.

5 Beschreibung:

Rotorblatt für eine Windkraftanlage sowie Windkraftanlage

Technisches Gebiet:

10

Die Erfindung betrifft ein Rotorblatt für eine Windkraftanlage gemäß den Oberbegriffen der Patentansprüche 1 und 2 sowie eine Windkraftanlage mit einem erfindungsgemäßen Rotorblatt gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 23.

15 Stand der Technik:

Angesichts eines in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich steigenden Energiebedarfs, der zur Deckung dieses Energiebedarfs immer knapper werdenden Primärrohstoffe sowie eines gesteigerten Bewusstseins für eine umweltverträgliche Energieerzeugung rücken regenerative Energiequellen immer mehr ins Interesse der Öffentlichkeit. Neben der Nutzung der Wasserkraft und Sonnenenergie bestehen erhebliche Anstrengungen darin, die Windkraft zur Erzeugung von Energie zu nutzen.

Zu diesem Zweck bekannte Windkraftanlagen bestehen aus einem Turm, an dessen Ende ein Rotor mit radial ausgerichteten Rotorblättern drehbar gelagert ist. Der auf die Rotorblätter auftreffende Wind versetzt den Rotor in eine Rotationsbewegung, die einen mit dem Rotor gekoppelten Generator zur Stromerzeugung antreibt. Durch ein entsprechend aerodynamisches Design der Rotorblätter ist man dabei bestrebt, einen möglichst großen Wirkungsgrad zu erzielen, d.h. die dem Wind innewohnende kinetische Energie mit möglichst geringen Verlusten in elektrische Energie umzuwandeln. Ein Beispiel für eine solche Windkraftanlage ist in der DE 103 00 284 A1 beschrieben.

Dabei stellt sich als allgemein problematisch heraus, dass Windkraftanlagen mehreren Bedingungen gleichzeitig genügen müssen, die sich teilweise gegenseitig ausschließen und die teilweise in Abhängigkeit weiterer Parameter veränderlich sind. Die Gründe hierfür sind zum Teil konstruktionsbedingt, nämlich dass infolge der Rotation eines Rotorblatts in einer Ebene senkrecht zur Rotationsachse über die Länge des Rotorblattes in Abhängigkeit des jeweiligen radialen Abstandes zur Rotationsachse unterschiedliche

5 Umfangsgeschwindigkeiten auftreten. Überlagert werden diese unterschiedlichen  
Umfangsgeschwindigkeiten von in der Natur schwankend vorherrschenden  
Windverhältnissen, so dass ein Rotorblatt im Betrieb sowohl stark schwankenden  
Anströmgeschwindigkeiten als auch veränderlichen Anströmwinkeln gegenübersteht.  
Weitere Rahmenbedingungen sind durch Grenzwerte bei Lärmemissionen sowie durch  
10 maximale Abmessungen zur Bewerkstelligung des Transports vorgegeben. Beim Design  
eines Rotorblattes besteht die Kunst daher darin, den unterschiedlichen  
Ausgangsbedingungen und Anforderungen in einem Design gerecht zu werden. Das  
Design eines Rotorblattes ist daher immer ein bestmöglicher Kompromiss, um allen  
Erfordernissen so weit wie möglich gerecht zu werden.

15

Die aerodynamische Optimierung von Rotorblättern in ihrem Außenbereich ist bereits weit  
fortgeschritten. Hingegen ist der Innenbereich eines Rotorblatts einer weiteren  
Zwangsbedingung unterworfen, die dessen Optimierung erheblich erschwert. Infolge der  
auf die Rotorblätter auftreffenden Windlast ergibt sich in Richtung des Anschlussbereichs  
20 des Rotorblatts an die Rotornabe eine exponential steigende Momentenbeanspruchung.  
Beim Design eines Rotorblatts muss dieser Beanspruchung in konstruktiver Hinsicht  
Rechnung getragen werden, was in der Praxis zu einer erheblichen Verdickung der  
aerodynamischen Profile im Bereich der Blattwurzel führt. Ab einem bestimmten Dicken-  
Tiefen-Verhältnis sind diese Profile aerodynamisch nur noch bedingt wirksam, wenn nicht  
25 sogar unwirksam und tragen daher nur in geringem Umfang oder gar nicht zur  
Leistungsausbeute der Windkraftanlage bei. Hinzu kommt, dass die Hinterkante  
konventioneller Rotorblätter im Blattwurzelbereich oft abgeschnitten ist, was die  
aerodynamische Leistungsfähigkeit des Rotorblatts prinzipiell beeinträchtigt und in der  
Folge der aerodynamisch wirksame Nabenradius radial nach außen verlagert wird.

30

Um auch den Blattwurzelbereich für die Energiegewinnung besser zu nutzen, wird gemäß  
der DE 103 19 246 A1 vorgeschlagen, ein Rotorblatt im Wurzelbereich mit extrem großen  
Blatttiefen auszustatten. Auf diese Weise wird das Blattprofil aerodynamisch verbessert,  
so dass die Häufigkeit von Strömungsabrissen abnimmt und damit Verluste minimiert  
35 werden. Zudem wird mit der großen Blatttiefe im Bereich der Blattwurzel eine zusätzliche  
Ertragsfläche zur besseren Ausnutzung der Windenergie bereitgestellt. Auch entspricht  
eine große Blatttiefe im Blattwurzelbereich besser der optimalen  
Blattzirkulationsverteilung mit der Folge einer geringeren induzierten Verlustleistung.

5

Der Nachteil eines solchen Rotorblatts wird vor allem bei Windkraftanlagen mit großem Rotordurchmesser deutlich. So werden bei Rotorblättern mit einer Länge von 50 m bis 70 m Blatttiefen im Wurzelbereich mit bis zu 8 m erreicht. Solche Rotorblätter sind für einen Transport auf der Straße nicht mehr geeignet. Es ist daher notwendig, derartige Rotorblätter mehrteilig zu konstruieren mit dem damit verbundenen zusätzlichen Aufwand bei der Blattherstellung und den Gefahren einer aerodynamisch problematischen Stoßstelle.

Schließlich ist auch schon durch Benutzung einer Windkraftanlage mit einem einflügeligen Rotor bekannt. Das einzige Rotorblatt der Anlage ist über ein Schlaggelenk an der Rotorwelle befestigt. Das über seine Länge verwindungsfreie Rotorblatt weist einen konstanten Querschnitt auf und besitzt somit über seine gesamte Länge konstante aerodynamische Eigenschaften. Um die Anlage stets im stabilen Bereich betreiben zu können, ist eine Bremseinrichtung zur Begrenzung der Rotordrehzahl vorgesehen. Die Bremseinrichtung sieht einen Vorflügel entlang der Vorderkante des Rotorblatts vor, der bei Überschreiten einer Grenzdrehzahl fliehkraftbetätigt um seine Längsachse schwenkt und das bis zum Nennlastbereich aerodynamisch qualifizierte Profil derart verändert, dass sich die Luftströmung auf der Profiloberseite plötzlich ablöst und damit Bremsleistung erzeugt. Um die Bremsleistung überhaupt erzeugen zu können beträgt die Länge des Vorflügels etwa 75 % der Länge des Rotorblatts. Bei kürzeren Vorflügeln überwiegt der im Außenbereich des Rotorblatts erzeugte Vortrieb die dem entgegenwirkende Bremsleistung im Innenbereich, so dass nur ungenügend Bremsleistung zur Verfügung gestellt wird. Dem Vorflügel dieser Windkraftanlagen kommt somit ausschließlich die Funktion einer Überlastsicherung zu.

30

#### Darstellung der Erfindung:

Vor diesem Hintergrund besteht die Aufgabe der Erfindung darin, Windkraftanlagen in ihrer Leistung zu steigern, insbesondere ein Rotorblatt für eine Windkraftanlage anzugeben, das über seinen gesamten Innenbereich einen verbesserten Wirkungsgrad aufweist, ohne die vorgenannten Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

35

5 Diese Aufgabe wird durch ein Rotorblatt mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 oder 2 sowie eine daraus hergestellte Windkraftanlage gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 23 gelöst.

Vorteilhafte Ausführungsformen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

10

Die Erfindung löst sich von der im Stand der Technik allgegenwärtigen Vorstellung, eine Windkraftanlage aerodynamisch zu optimieren, indem das Profil des Rotorblatts im Blattwurzelbereich modifiziert wird. Stattdessen beschreitet die Erfindung einen gänzlich anderen Weg, indem Verluste infolge aerodynamisch unvollkommener oder gänzlich  
15 unwirksamer Blattwurzelprofile durch die Anordnung eines Vorflügels in dem entsprechenden Bereich ausgeglichen werden.

Die Anordnung eines Vorflügels erzeugt gewöhnlicherweise, also bei einem Profil mit Druck- und Saugseite, eine Luftströmung mit hoher Geschwindigkeit von der Druckseite  
20 des Rotorblatts hin zu dessen Saugseite und führt so der Saugseite kinetische Energie zu. Angereichert mit dieser kinetischen Energie kann die Grenzschicht der Strömung den Druckanstieg im hinteren Bereich der Saugseite weit besser aushalten ohne abzulösen. Ganz besonders geeignet ist der Vorflügel bei Profiltiefen von relativen Dicken  $D/T$  von 40 % und mehr, das heißt also für sogenannte Strakprofile, die durch den Strak von einem  
25 letzten aerodynamisch gesicherten Profil von zum Beispiel 40 % relativer Dicke  $D/T$  auf das Kreisprofil des unmittelbaren Blattanschlussbereichs entstehen. Selbst im Extremfall eines Kreisprofils, wie es zum Beispiel im Blattanschlussbereich vorhanden ist, wirkt sich der Vorflügel leistungssteigernd aus. Bei diesem per se neutralen Profil (kein Auftrieb, nur Widerstand) erzeugt der Vorflügel eine Unsymmetrie der Umströmung und dadurch eine  
30 Saug- und eine Druckseite und somit einen nutzbaren Auftrieb bei nur geringer Widerstandserhöhung. Durch den Vorflügel wird also zum einen der aerodynamisch wirksame Blattbeginn wesentlich in Richtung der Rotorachse verlagert und somit das Rotorblatt über seine Länge besser genutzt.

35 Zum anderen lässt sich die optimale Zirkulationsverteilung  $\Gamma$  über die Spannweite des Rotorblatts besser realisieren und somit die induzierte Verlustleistung des Rotors verringern.

5 Mit der Zirkulationsgleichung

$$\Gamma(r) = \frac{1}{2} \cdot w_{\text{eff}} \cdot t \cdot c_a$$

(wobei  $w_{\text{eff}}$  der effektiven lokalen Anströmgeschwindigkeit des betreffenden Profilschnitts  
10 entspricht)

zeigt sich, dass die optimale Zirkulation im Blattwurzelbereich sowohl mit vergrößerter  
Blatttiefe  $t$  (wie bei DE 103 19 246 A1) als auch mit vergrößertem Auftriebsbeiwert  $c_a$   
realisiert werden kann. Die vorliegende Erfindung zielt auf eine Vergrößerung des  $c_a$ -  
15 Wertes mit Hilfe eines Vorflügels ab.

Diese beiden genannten Vorteile, die der Vorflügel am Innenflügel bewirkt, nämlich  
bessere Ausnutzung des Rotorblatts und geringere induzierte Verlustleistung durch  
bessere Anpassung an die optimale radiale Zirkulationsverteilung, addieren sich nicht nur,  
20 sondern verstärken sich gegenseitig mit dem Effekt einer überproportionalen  
Leistungssteigerung der Windturbine.

Als besonders vorteilhaft erweist es sich dabei, dass die Leistungssteigerung dank der  
Erfindung ohne Änderungen am Blattprofil selbst erreicht werden kann. Es ist also  
25 möglich, weiterhin Rotorblätter mit verhältnismäßig geringen Tiefen im Blattwurzelbereich  
herzustellen und zu nutzen mit dem Vorzug einer einfachen und kostengünstigen  
Herstellung sowie eines einfachen Transports, ohne Einbußen beim Wirkungsgrad einer  
Windkraftanlage hinnehmen zu müssen.

30 Da der erfindungsgemäße Vorflügel nicht zwangsläufig Modifikationen am Blattprofil  
voraussetzt, ist es ferner möglich, bestehende Windkraftanlagen in erfindungsgemäßer  
Weise nachzurüsten, um auch bei bestehenden Anlagen in den Genuss einer erhöhten  
Leistungsausbeute zu kommen.

35 Kurze Beschreibung der Zeichnungen:

Die Erfindung wird nachstehend anhand in den Zeichnungen dargestellter  
Ausführungsbeispiele näher erläutert. Dabei werden zur Erleichterung des Verständnisses

5 für gleiche oder gleichwirkende Elemente der Erfindung bei allen Figuren gleiche Bezugszeichen verwendet.

Es zeigt

- 10 Fig. 1 eine Ansicht auf die Luvseite einer erfindungsgemäße Windkraftanlage,
- Fig. 2a eine Draufsicht auf die Saugseite eines erfindungsgemäßen Rotorblatts der in Fig. 1 dargestellten Windkraftanlage,
- 15 Fig. 2b-f Profilschnitte des in Fig. 2a dargestellten Rotorblatts in unterschiedlichen Querschnittsebenen,
- Fig. 3 eine Teilansicht von schräg hinten auf den Innenbereich des in den Figuren 1 und 2a bis f dargestellten Rotorblatts,
- 20 Fig. 4-5 zwei Teilansichten weiterer Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Rotorblatts im Bereich des Innenflügels,
- Fig. 6-9 jeweils einen Querschnitt weiterer Ausführungsformen durch ein erfindungsgemäßes Rotorblatt im Bereich des Vorflügels,
- 25 Fig. 10-12 jeweils eine Schrägansicht auf weitere Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Rotorblatts im Bereich des Innenflügels,
- 30 Fig. 13-16 jeweils eine Schrägansicht auf weitere Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Rotorblatts im Anschlussbereich an die Rotornabe,
- Fig. 17 eine Schrägansicht auf eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Rotorblatts im Bereich des Innenflügels,
- 35 Fig. 18 einen Querschnitt durch das in Figur 17 dargestellte Rotorblatt entlang der dortigen Linie XVIII – XVIII,

5 Fig. 19 einen Teilquerschnitt durch den Anschlussbereich eines erfindungsgemäßen Rotorblatts mit der Anordnung einer Gurney-Flap und

Fig. 20 einen Teilquerschnitt durch ein erfindungsgemäßes Rotorblatt mit einer Gurney-Flap im Bereich der Hinterkante.

10

Ausführliche Darstellung der Ausführungsbeispiele:

Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Windkraftanlage 1, die sich zusammensetzt aus einem Turm 2, der mit seinem Fußbereich fest im Untergrund 3 verankert ist. Im  
15 Kopfbereich des Turms 2 sieht man einen Rotor 4, der um eine senkrecht zur Darstellungsebene verlaufende Rotationsachse 7 in Richtung eines Pfeils 8 rotiert. Der Rotor 4 setzt sich im Wesentlichen zusammen aus einer Nabe 5, die am Kopf des Turms 2 drehbar gelagert und mit einem Generator zur Stromerzeugung gekoppelt ist. Im Bereich der Nabe 5 sind die Rotorblätter 6 an den Rotor 4 angeschlossen.

20

In den Figuren 2a bis f ist ein Rotorblatt 6 des Rotors 4 in größerem Maßstab dargestellt. Während Figur 2a eine Draufsicht auf die Saugseite eines erfindungsgemäßen Rotorblatts 6 zeigt, stellen die Figuren 2b bis f Querschnitte desselben in den entsprechend benannten Lotebenen zur Blattlängsachse dar.

25

In Fig. 2a ist mit dem Bezugszeichen 9 die Längserstreckungsrichtung des Rotorblatts 6 bezeichnet. In Längserstreckungsrichtung 9 erstreckt sich das Rotorblatt 6 vom nabenseitigen Blattanschluss 10 bis zum freien Ende des Rotorblatts 6, das als Blattspitze 11 bezeichnet ist.

30

Aus Fig. 2a ist zudem eine Längsgliederung des Rotorblatts 6 ersichtlich, auf die im weiteren Teil der Beschreibung Bezug genommen wird. Die Bezugsebene für ein erfindungsgemäßes Rotorblatt 6 ist die Blattanschlussebene 12, die den Übergang des Rotorblatts 6 zur Nabe 5 definiert. Der Abstand der Blattanschlussebene 12 zur  
35 Rotationsachse 7 ist in Fig. 2a mit  $L_1$  bezeichnet und entspricht dem Nabenradius. Der kreiszylindrische Teil des Rotorblatts mit der Länge  $L_2$  stellt den Abstand von der Blattanschlussebene 12 zum Beginn der Strakprofile des Rotorblatts 6 dar und wird im Weiteren als Blattanschlussbereich bezeichnet. Mit  $L_3$  ist der Blattwurzelbereich

5 gekennzeichnet, der dem Abstand der Blattanschlussebene 12 zum aerodynamisch wirksamen Blattbeginn entspricht. Der aerodynamisch wirksame Blattbeginn liegt in der Lotebene zur Längserstreckungsrichtung 9, in der aufgrund eines ausreichend aerodynamisch qualifizierten Profils erstmals ein Beitrag zur Leistungsausbeute der Windkraftanlage 1 erwirtschaftet wird. Der aerodynamisch wirksame Blattbeginn wird  
10 auch aerodynamischer Nabenradius genannt.  $L_4$  beschreibt schließlich den Abstand der Blattanschlussebene 12 zum ersten Drittelpunkt des Rotorblatts 6, der im weiteren auch als Innenbereich oder Innenflügel bezeichnet ist.

In Fig. 2a ist ferner die Blattvorderkante 13 des Rotorblatts 6 erkennbar, die bei Rotation  
15 des Rotors 4 die Anströmkante darstellt. Ihr in Blattebene gegenüberliegend verläuft die Blatthinterkante 14. Der Abstand zwischen Vorderkante 13 und Hinterkante 14 ergibt die Tiefe  $T$ , die ausgehend vom Blattanschlussbereich  $L_2$  zunimmt bis zu einem Punkt innerhalb des Innenflügels, von wo sie sich zur Blattspitze 11 hin kontinuierlich verringert. Die in Fig. 2a dargestellte Oberseite des Rotorblatts entspricht der Saugseite 15, die  
20 darunter liegende Unterseite der Druckseite 16.

Die Figuren 2b – 2f geben die unterschiedlichen Profilquerschnitte in den angegebenen Abständen zur Blattanschlussebene 12 wieder. In der Blattanschlussebene 12 besitzt demnach das Rotorblatt 6 einen Kreisquerschnitt, mit dem es an die Nabe 5 anschließt.  
25 Der Kreisquerschnitt wird in der Regel über den gesamten Blattanschlussbereich  $L_2$  beibehalten. Da ein Kreisprofil ohne zusätzliche Maßnahmen keinen Auftrieb liefert, würde in diesem Bereich kein Beitrag zur Energiegewinnung erzeugt werden. Das gilt auch weitgehend für die ersten Strakprofile der Strecken  $L_3$  und insbesondere  $L_2$ . Figur 2c zeigt einen solchen Profilschnitt, der ohne weitere Maßnahmen praktisch nichts zur Leistung  
30 des Rotors beitragen kann.

Erst außerhalb von  $L_3$  würden die Strakprofile ohne weitere Maßnahme in der Lage sein, Auftrieb zu erzeugen, wenn auch nur in geringem Maße. Hinzu kommt, dass die  
Hinterkante 14 bekannter Rotorblätter meist abgeschnitten ist, um große Blatttiefen zu  
35 vermeiden (vgl. Figur 2d). Durch den Hinterkantenabschnitt erhält man aber große relative Profildicken  $D/T$  von z.B. 70 %, womit der Auftrieb sowie der wirksame Anstellwinkelbereich sinken und der Widerstand steigt. Diese Probleme lassen sich auch nicht dadurch beheben, dass man ein solches Profil einfach an der Hinterkante zuspitzt,

5 Profildicke und –tiefe aber beibehält. Man würde durch diese Zuspitzung in Richtung der Hinterkante einen Druckanstieg verlangen, den die Grenzschicht nicht darstellen kann. Die Strömung löst auf der Ober- und eventuell auch auf der Unterseite ab und zwar mit schlechterem Ergebnis als bei einem Profil mit gut gewählter endlicher Hinterkantendicke. Mit zunehmender radialer Position erhält man eine immer besser werdende Annäherung  
10 an ein aerodynamisch qualifiziertes Profil. Die Profiltiefe nimmt zu, Profildicke und Hinterkantendicke nehmen ab (siehe Fig. 2e).

Um die Leistungsausbeute eines erfindungsgemäßen Rotorblatts 6 im Bereich aerodynamisch ungünstiger Profilquerschnitte zu erhöhen, ist gemäß der Erfindung ein  
15 Vorflügel 20 vorgesehen, der, wie Figur 2a zeigt, sich auf der Saugseite 15 in Längserstreckungsrichtung 9 mindestens über die ganze Strecke L3 erstreckt. Nach innen hin kann der Vorflügel 20, soweit es die Nabengeometrie erlaubt, über den Blattanschluss 12 überstehen und die Nabe 5 überlappen, wie Fig. 2a zeigt. Nach außen hin wird man den Vorflügel 20 soweit fortsetzen, bis er Profilschnitte genügender aerodynamischer  
20 Qualifikation erreicht. In der Regel werden das Profilschnitte mit einer relativen Dicke von ungefähr 40 % sein, entsprechend einer relativen radialen Position  $r/R$  ( $R$  ist der Blattradius) von durchschnittlich 20 % bis 25 %, je nach Blattdesign. Wesentliche Verlängerungen des Vorflügels über diese radiale Position hinaus, also bis zu Profilschnitten deutlich unter 40 % relativer Dicke  $D/T$ , können sich als schädlich  
25 erweisen, da hier der Vorflügel zuviel zum Auftrieb beiträgt und damit die optimale Zirkulationsverteilung nicht erfüllen hilft wie weiter innen, sondern diese verletzt mit dem Ergebnis einer unnötig hohen induzierten Verlustleistung.

Die Vorderkante des Vorflügels 20 verläuft etwa parallel zur Vorderkante 13 des  
30 Rotorblatts 6. Wie aus den Fig. 2a bis 2e ersichtlich, liegt der Vorflügel 20 unter Einhaltung eines Spalts zur Saugseite 15 hin mit seiner Vorderkante in etwa auf Höhe der Vorderkante 13 des Rotorblatts 6 und endet etwa im Bereich der größten Dicke  $D$  des Rotorblatts 6.

35 Fig. 3 zeigt den Innenflügel des in Fig. 2a bis f dargestellten Rotorblatts 6 aus einer anderen Perspektive, nämlich von schräg oben auf die Hinterkante 14. Die in gestrichelter Darstellung erkennbaren Profilquerschnitte werden zum Blattanschlussbereich  $L_2$  hin immer dicker und verlangen daher nach großen Tiefen um aerodynamisch effektiver zu

5 sein. Da sich große Blatttiefen bei der Herstellung und dem Transport von Rotorblättern 6 nachteilig auswirken, ist die Hinterkante 14 in diesem Bereich abgeschnitten, wobei in Kauf genommen wird, dass die dadurch entstehenden Profile nur bedingt Vortrieb entwickeln. Zur Leistungssteigerung dieses Bereichs ist im Abstand zur Saugseite 15 entlang der Vorderkante 13 des Rotorblatts 6 ein Vorflügel 20 angeordnet. Da der  
10 Vorflügel 20 auch dem Kreiszyylinder einen Auftrieb verleiht, kann der Vorflügel 20 sogar auch den zylindrischen Blattanschlussbereich  $L_2$  überdecken und überlappt dabei nach innen gegebenenfalls die Nabe 5 des Rotors 4 soweit wie möglich.

Während der in den Fig. 2a bis f dargestellte Vorflügel 20 in der Draufsicht einen  
15 rechteckförmigen Grundriss besitzt, d. h. also mit einer konstanten Tiefe  $T_{VF}$  ausgestattet ist, besitzt die in den Fig. 4 und 5 dargestellte Ausführungsform des Vorflügels 20 eine vom Blattwurzelbereich in Richtung der Blattspitze 11 abnehmende Tiefe, d. h. der Vorflügel 20 ist nach außen hin verjüngt. Die Verjüngung kann dabei sowohl einen linearen als auch gekrümmten Verlauf aufweisen. Mit einer solchen Ausbildung des  
20 Vorflügels 20 wird berücksichtigt, dass das Profil des Rotorblatts 6 zur Blattspitze 11 hin aerodynamisch leistungsfähiger wird, so dass ein Ausgleich der profilbedingten Leistungsdefizite mit Hilfe des Vorflügels 20 nicht mehr in dem Maße notwendig ist.

Aus den Fig. 4 und 5 ist ferner ersichtlich, dass das innere Ende 31 des Vorflügels 20  
25 sowie dessen äußeres Ende 32 jeweils einen elliptisch geformten Randbogen 21 und 22 aufweisen, um die induzierte Verlustleistung möglichst gering zu halten.

Die Fig. 6, 7, 8 und 9 zeigen Querschnitte durch ein erfindungsgemäßes Rotorblatt 6 im Bereich des Vorflügels 20. Demnach besitzt der Vorflügel 20 ein aerodynamisches Profil,  
30 d. h. bei einer Luftumströmung wird am Vorflügel 20 ein Zusatzauftrieb erzeugt, der zusätzlich zum Auftrieb des Rotorblatts 6 wirksam ist und zur Leistungssteigerung insgesamt beiträgt.

Geeignete Profile für einen Vorflügel 20 besitzen eine konvexe Saugseite 23 und eine  
35 konkave Druckseite 24, wobei letztere unter Einhaltung eines sich verjüngenden Spalts 25 der Saugseite 15 des Rotorblatts 6 folgt. Mit seiner Vorderkante, die etwa parallel zur Vorderkante 13 des Rotorblatts 6 verläuft, bildet der Vorflügel 20 einen Lufteintritt 26 aus. In diesem Bereich weist der Spalt 25 seine größte Höhe auf und wird in Richtung des

5 stromabwärts liegenden Luftaustritts 27 enger. Auf diese Weise findet eine Beschleunigung der Luftströmung im Spalt 25 statt, die die Neigung zur Strömungsablösung auf der Saugseite 15 des Rotorblatts 6 reduziert.

10 Während der in den Fig. 6, 7 und 8 dargestellte Querschnitt des Vorflügels 20 einen über seine Tiefe  $T_{VF}$  veränderlichen Dickenverlauf besitzt, ist die in Fig. 9 gezeigte Ausführungsform des Vorflügels 20 durchgehend aus einem Blech gedrückt, das im Bereich der Anströmkante umgebördelt ist. Die auf diese Weise sehr einfach herzustellende Verdickung im Bereich der Vorderkante des Vorflügels 20 ergibt eine Annäherung an ein aerodynamisch qualifiziertes Profil und erhöht somit die Leistung des  
15 Vorflügels 20 im Vergleich zu einem Flügel aus einem einfachen Blech.

Wie aus den Figuren 6, 7 und 9 hervorgeht, können zur Befestigung des Vorflügels 20 am Rotorblatt 6 Abstandhalter 28 vorgesehen sein. Die Abstandhalter 28 können selbst ein in Anströmrichtung aerodynamisches Profil aufweisen und sind zwischen der Saugseite 15  
20 des Rotorblatts 6 und der Druckseite 24 des Vorflügels 20 zwischengeschoben, um die Geometrie des Spalts 25 sicher zu stellen. Mittels Schrauben 29, die sich durch den Vorflügel 20 und die Abstandhalter 28 bis in das Rotorblatt 6 erstrecken, wird der Vorflügel 20 in seiner bestimmungsgemäßen Lage fixiert.

25 Eine hierzu alternative Ausführungsform ist in Fig. 8 dargestellt. Dort wird der Flügel mittels Rippen 30, die in regelmäßigen Abständen über die Länge des Vorflügels 20 angeordnet sind, am Rotorblatt 6 befestigt. Die Rippen 30 sind präzise in den Spalt 25 eingepasst, so dass sich für den Vorflügel 20 eine größere Auflagefläche ergibt mit dem Vorteil, dass die exakte relative Lage des Vorflügels 20 gegenüber dem Rotorblatt 6  
30 besser eingehalten werden kann.

Im Hinblick auf die Minimierung der induzierten Verlustleistung und damit Erhöhung der Rotorleistung kommt dem Anschluss der Enden 31 und 32 des Vorflügels 20 an das Rotorblatt 6 bzw. an die Nabe 5 eine besondere Bedeutung zu. Gemäß einer ersten in  
35 Fig. 10 gezeigten Ausführungsform der Erfindung ruht der Vorflügel 20 auf in regelmäßigen axialen Abständen angeordneten Abstandhaltern 28 oder Rippen 30, wobei das innere Ende 31 und das äußere Ende 32 frei fahrend ausgebildet sind, d. h. diese Enden kragen mit einem Teil ihrer Länge über die äußeren Befestigungspunkte aus. Wie

5 bereits unter den Fig. 4 und 5 erwähnt, erweist es sich als vorteilhaft, bei einer solchen Ausführungsform die Enden 31 und 32 als elliptische Randbögen auszubilden.

Bei der in Fig. 11 dargestellten Ausführungsform der Erfindung schließt der Vorflügel 20 im Bereich seiner Enden 31 und 32 durch die Anordnung von bündig mit dem Vorflügel 20  
10 abschließenden Endrippen 33 an das Rotorblatt 6 an. Auf diese Weise wird die induzierte Verlustleistung minimiert.

Fig. 12 zeigt eine weitere Möglichkeit des Anschlusses der Enden 31 und 32 des Vorflügels 20 an das Rotorblatt 6. Dort sind die Enden 31 und 32 zweifach in  
15 entgegengesetzter Richtung gekröpft und mit dem auf diese Weise entstehenden, zum Rotorblatt 6 parallelen Endabschnitt mittels Befestigungsschrauben angeschraubt.

Die in den Fig. 10 bis 12 beschriebenen Varianten zum Anschluss des Vorflügels 20 an ein Rotorblatt 6 stellen eine nicht abschließende Aufzählung von Beispielen dar, so dass  
20 die Erfindung nicht darauf beschränkt ist. Es liegt ebenso im Rahmen der Erfindung, den Anschluss des inneren Endes 31 des Vorflügels 20 anders zu gestalten als den Anschluss des äußeren Endes 32. Auch können die in den Fig. 10 bis 12 aufgezeigten Varianten miteinander kombiniert werden.

25 Die Fig. 13 bis 16 betreffen die relative Lage des inneren Endes 31 des Vorflügels 20 zur Nabe 5. Bei Windkraftanlagen mit Pitch-Verstellung der Rotorblätter 6 ist es notwendig, eine Relativbewegung zwischen Rotorblatt 6 und Nabe 5 zu ermöglichen. Um dennoch einen aerodynamisch optimal arbeitenden Vorflügel 20 zu erhalten, ist bei der in Fig. 13 dargestellten Ausführungsform eines Rotors 4 vorgesehen, den in Längserstreckungs-  
30 richtung 9 ankommenden Vorflügel 20 im Blattanschlussbereich  $L_2$  beispielsweise mittels eines Abstandhalters 28 oder einer Rippe 30 zu halten und im weiteren Verlauf unter Überlappung der Nabe 5 frei auskragen zu lassen. Dadurch wird ein kleinst möglicher aerodynamisch wirksamer Blattbeginn erreicht und somit die nutzbare Rotorfläche vergrößert und die induzierte Verlustleistung reduziert.

35

In weiterer vorteilhafter Ausgestaltung dieser Ausführungsform wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, an der Nabe 5 im Bereich des inneren Endes 31 des Vorflügels 20 eine zusätzliche Rippe 35 vorzusehen. Dabei erstreckt sich der Vorflügel 20 unter Einhaltung

5 eines geringen Luftspaltes bis zur Rippe 35, so dass die induzierte Verlustleistung zusätzlich reduziert wird (Figur 14).

Ein ähnlicher Effekt lässt sich mit der in Fig. 15 dargestellten Ausführungsform der Erfindung zeigen. Dort ist das in den Bereich der Nabe 5 auskragende innere Ende 31  
10 des Vorflügels 20 zur Nabe 5 hin abgekröpft. Ein dabei eingehaltener geringer Spalt ermöglicht Relativbewegungen des Rotorblatts 6 und damit auch des Vorflügels 20 gegenüber dem Kreisquerschnitt der Nabe 5.

Die in Fig. 16 dargestellte Ausführungsform der Erfindung zeigt den Anschluss eines  
15 Vorflügels 20 an die Nabe 5 bei einem Rotor 4 mit starrer Befestigung der Rotorblätter 6, wie es bei Windkraftanlagen mit Stallregelung üblich ist. Ähnlich wie bereits unter Fig. 11 beschrieben, ist das innere Ende 31 des Vorflügels 20 zweimal wechselseitig gekröpft und mit seinem Endabschnitt an die Nabe 5 geschraubt.

20 Die Fig. 17 und 18 zeigen eine weitere Möglichkeit zur Ausbildung eines Vorflügels 20 an einem Rotorblatt 6. Die Besonderheit dieser Ausführungsform liegt darin, dass der Vorflügel 20 integraler Bestandteil des Rotorblatts 6 ist, d. h. Vorflügel 20 und Rotorblatt 6 bilden eine monolithische Einheit, die durch Herausformen des Vorflügels 20 und gegebenenfalls auch der Rippen aus einem Ganzen entstanden ist. Auf diese Weise ist  
25 ein aerodynamisch hochqualifiziertes Profil erhältlich.

Fig. 19 und 20 zeigen schließlich die Kombination einer Gurney-Flap 36 in Verbindung mit einem erfindungsgemäßen Rotorblatt 6 mit Vorflügel 20. Die Gurney-Flap 36 ist auf der  
30 Druckseite 16 des Rotorblatts 6 entlang der Hinterkante 14 über einen der Länge des Vorflügels 20 entsprechenden eventuell auch kürzeren oder auch längeren Längsabschnitt angebracht. Deren von der Druckseite 16 des Rotorblatts 6 abstehender Schenkel bewirkt eine Auftriebserhöhung des Rotorblatts 6 und trägt auf diese Weise zusätzlich zur Leistungssteigerung der Windkraftanlage 1 bei.

35 Es versteht sich, dass die Erfindung nicht auf die in den einzelnen Figuren dargestellten und mit den Patentansprüchen beanspruchten Ausführungsformen beschränkt ist. Vielmehr liegen auch Merkmalskombinationen unterschiedlicher Ausführungsformen im Rahmen der Erfindung, soweit sie an den Sinn und Zweck der Erfindung anschließen.

5

Patentansprüche:

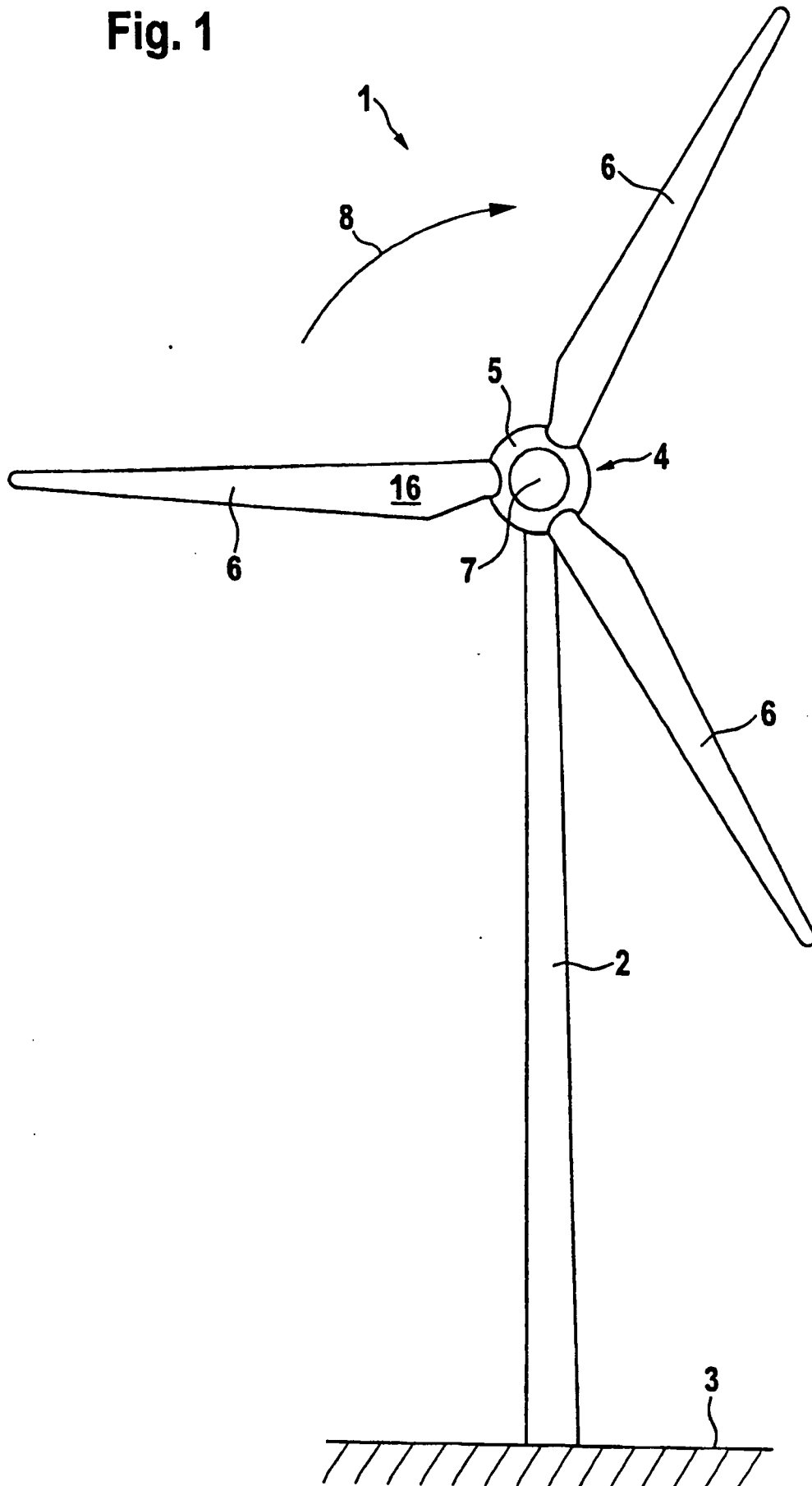
1. Rotorblatt für eine Windkraftanlage (1), insbesondere für eine  
Horizontalachsenwindturbine mit einem eine Druckseite (16) und eine Saugseite  
10 (15) aufweisenden aerodynamischen Profil, dessen Tiefe (T) durch den Abstand  
der Blattvorderkante (13) zur Blatthinterkante (14) und dessen Dicke (D) durch den  
Abstand der Saugseite (15) zur Druckseite (16) definiert ist und das sich  
ausgehend vom Blattanschluss (10) entlang einer Längserstreckungsrichtung zur  
Blattspitze (11) erstreckt, **dadurch gekennzeichnet, dass** auf der Saugseite (15)  
15 des Rotorblatts (6) im Bereich der Blattvorderkante (13) und unter Einhaltung  
eines Spalts zur Saugseite (15) ein Vorflügel (20) angeordnet ist, der sich etwa  
vom Blattanschluss (10) über maximal ein Drittel der Länge des Rotorblatts (6)  
erstreckt.
- 20 2. Rotorblatt für eine Windkraftanlage (1), insbesondere für eine  
Horizontalachsenwindturbine mit einem eine Druckseite (16) und eine Saugseite  
(15) aufweisenden aerodynamischen Profil, dessen Tiefe (T) durch den Abstand  
der Blattvorderkante (13) zur Blatthinterkante (14) und dessen Dicke (D) durch den  
Abstand der Saugseite (15) zur Druckseite (16) definiert ist und das sich  
25 ausgehend vom Blattanschluss (10) entlang einer Längserstreckungsrichtung zur  
Blattspitze (11) erstreckt, **dadurch gekennzeichnet, dass** auf der Saugseite (15)  
des Rotorblatts (6) im Bereich der Blattvorderkante (13) und unter Einhaltung  
eines Spalts zur Saugseite (15) ein Vorflügel (20) angeordnet ist, der sich über  
einen Längsabschnitt des Rotorblatts (6) erstreckt, in dem das Blattprofil eine  
30 relative Dicke von  $D/T \geq 40\%$  besitzt, vorzugsweise eine relative Dicke  $D/T$   
zwischen 60 % und 100 %.
3. Rotorblatt nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass sich der  
35 Vorflügel (20) über maximal 25 % der Länge des Rotorblatts (6) erstreckt.

- 5           4. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) starr gegenüber dem Rotorblatt (6) angeordnet ist.
5. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass sich der Vorflügel (20) ausgehend vom Blattanschluss (10) bis maximal zum Bereich
- 10           der größten Profiltiefe (T) erstreckt.
6. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass sich der Vorflügel (20) ausgehend vom Blattanschluss (10) bis maximal zum aerodynamisch wirksamen Nabenradius erstreckt.
- 15           7. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) über seine Länge einen konstanten Querschnitt besitzt, vorzugsweise aus einem strangpressgezogenen Profil besteht.
- 20           8. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) über seine Länge einen variablen Tiefen-, Wölbungs-, Spalt- oder Dickenverlauf aufweist.
9. Rotorblatt nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Tiefe und/oder
- 25           Dicke des Vorflügels (20) in Richtung der Blattspitze (11) verjüngt sind.
10. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Tiefe des Vorflügels (20) etwa 10 % bis 14 % der Tiefe des Rotorblatts (6) entspricht, vorzugsweise 12 %.
- 30           11. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) ein aerodynamisches Profil besitzt.
12. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 11 dadurch gekennzeichnet, dass das
- 35           innere Ende (31) und/oder das äußere Ende (32) des Vorflügels (20) frei fahrend sind.

- 5 13. Rotorblatt nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) an seinem inneren und/oder äußeren Ende (31, 32) mit einem elliptischen Randbogen (21, 22) abschließt.
- 10 14. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) an seinem inneren Ende (31) und/oder äußeren Ende (32) mit einer Rippe (33) abschließt, die mit dem Rotorblatt (6) verbunden ist.
- 15 15. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) an seinem inneren Ende (31) und/oder äußeren Ende (32) in Richtung des Rotorblatts (6) abgekröpft und an dieses angeschlossen ist.
- 20 16. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) mit Abstandhalter (28) oder Rippen (30) am Rotorblatt (6) befestigt ist.
17. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) aus einem Blech gedrückt ist.
- 25 18. Rotorblatt nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass das Blech an der die Vorderkante des Vorflügels (20) bildende Kante zu einer Nase umgebördelt ist.
19. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel aus einem strangpressgezogenen Profil besteht.
- 30 20. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorflügel (20) monolithisch aus dem Rotorblatt (6) herausgeformt ist.
- 35 21. Rotorblatt nach einem der Ansprüche 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb des Längsabschnitts des Rotorblatts (6), an dem ein Vorflügel (20) angeordnet ist, auf der Druckseite (16) in der Nähe der Hinterkante (14) des Rotorblatts (6) eine Gurney-Flap (36) angeordnet ist.

- 5 22. Rotorblatt nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Gurney-Flap (36)  
auf dem Kreisprofil des Blattanschlussbereichs ( $L_2$ ) des Rotorblatts (6) so  
abgeordnet ist, dass die Gurney-Flap (36) etwa diametral zum Vorflügel (20) zu  
liegen kommt und die Lage des freien Randes der Gurney-Flap (36) dabei eine  
10 Position von etwa  $120^\circ$  gegenüber der lokalen effektiven Anströmgeschwindigkeit  
aufweist.
23. Windkraftanlage mit einem Rotor, dadurch gekennzeichnet, dass der Rotor (4)  
mindestens ein, vorzugsweise drei Rotorblätter (6) nach einem der Ansprüche 1  
bis 22 besitzt.
- 15 24. Windkraftanlage nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass der Rotor (4)  
einen Nabenkörper (5) besitzt und der Vorflügel (20) unter Einhaltung eines  
geringen Spalts oder mittels einer Dichtung an den Nabenkörper (5) anschließt.
- 20 25. Windkraftanlage nach Anspruch 23 oder 24, dadurch gekennzeichnet, dass das  
innere Ende des Vorflügels (20) den Blattanschluss (10) und teilweise den  
Nabenkörper (5) überdeckt.
- 25 26. Windkraftanlage nach einem der Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet,  
dass das innere Ende des Vorflügels (20) gerade verläuft oder abgekröpft ist.
27. Windkraftanlage nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass das Rotorblatt  
starr an die Nabe anschließt und der Vorflügel mit seinem inneren Ende starr an  
den Nabenkörper anschließt.

Fig. 1



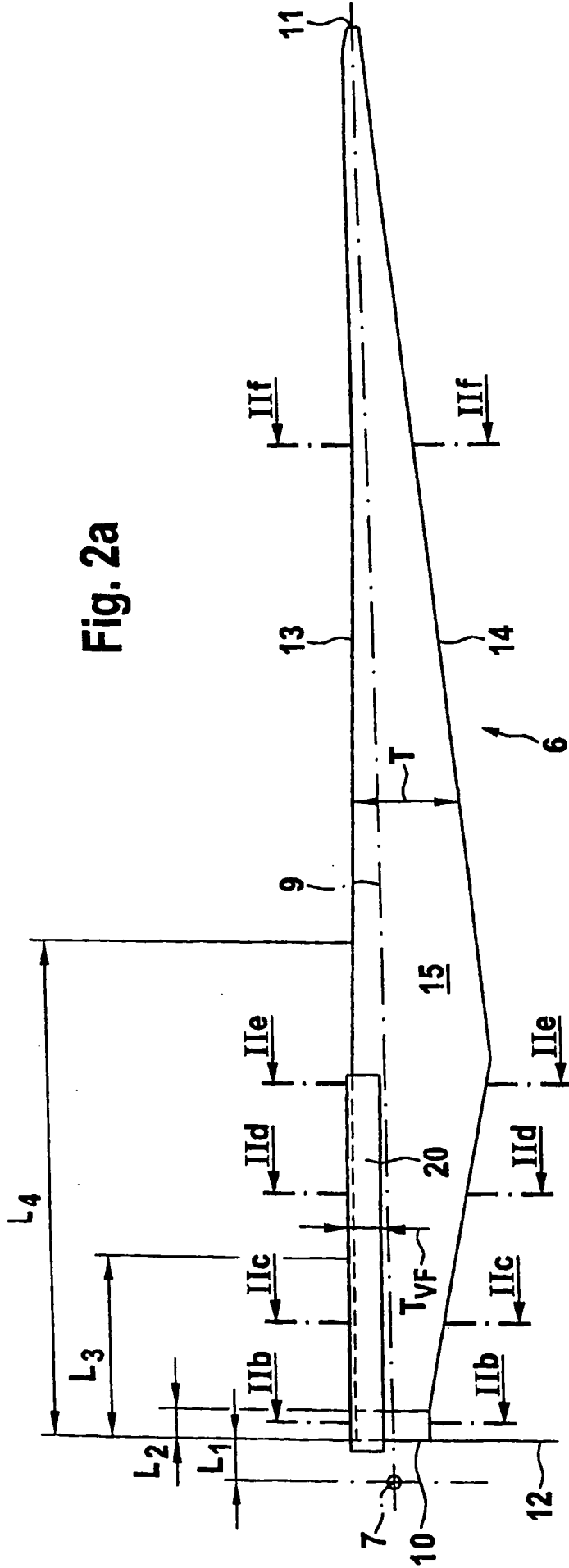


Fig. 2a

Fig. 2f

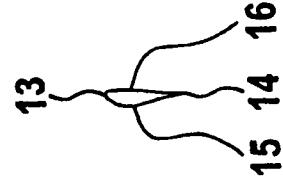


Fig. 2e

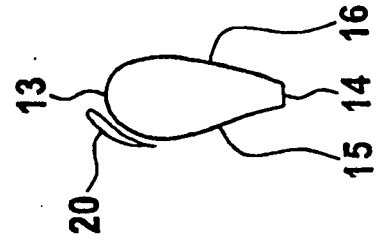


Fig. 2d

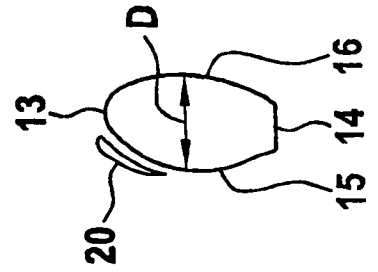
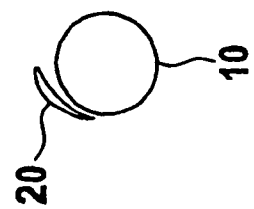
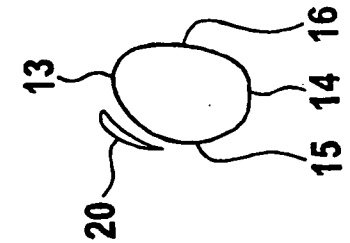


Fig. 2c



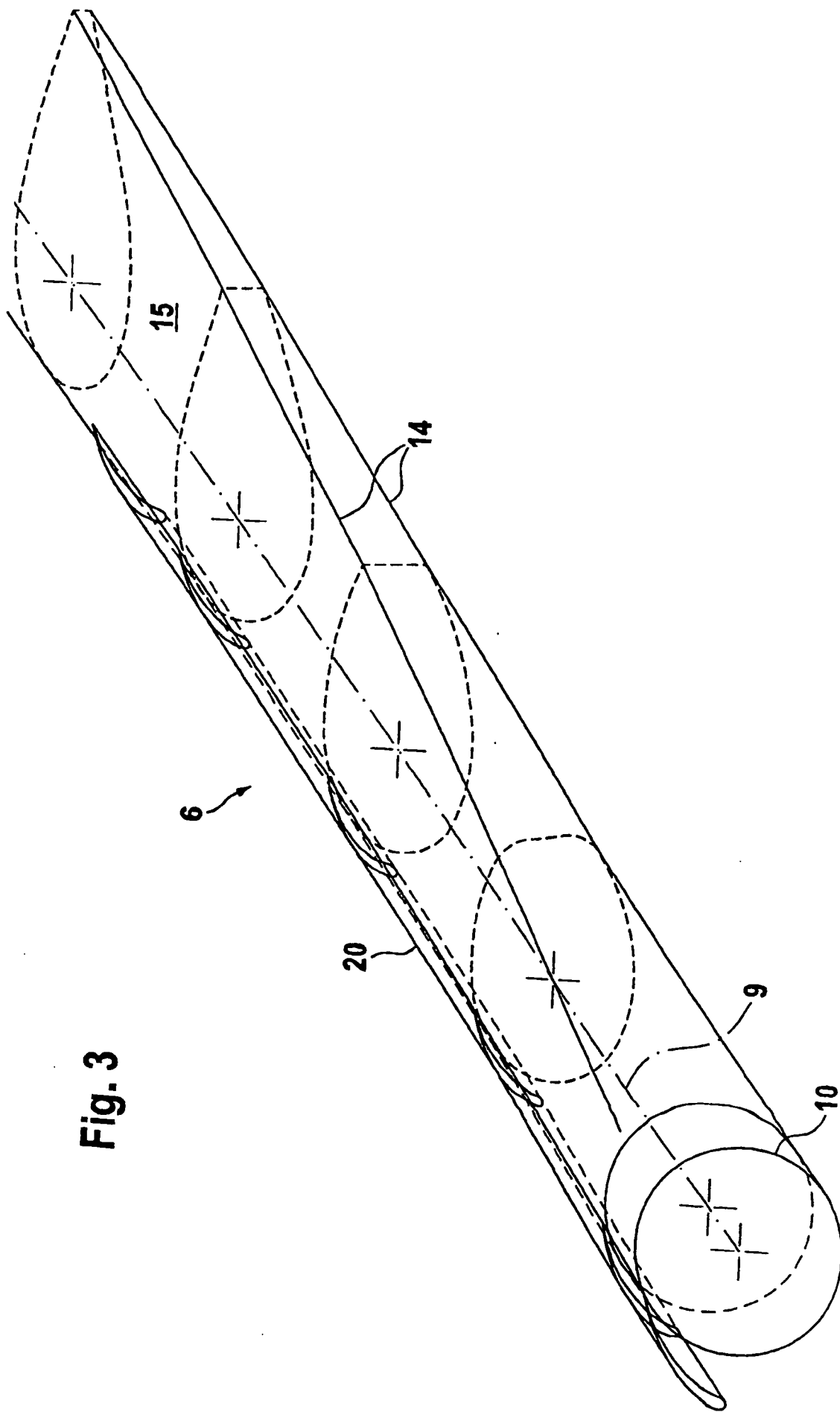
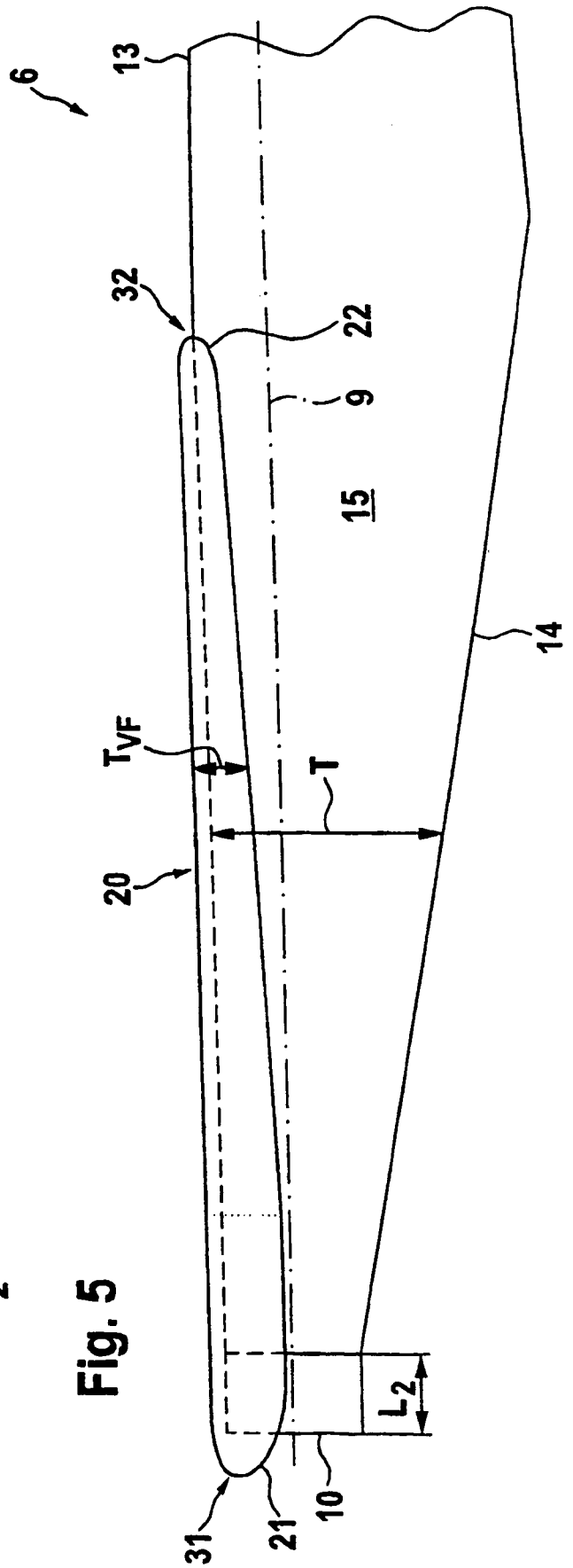
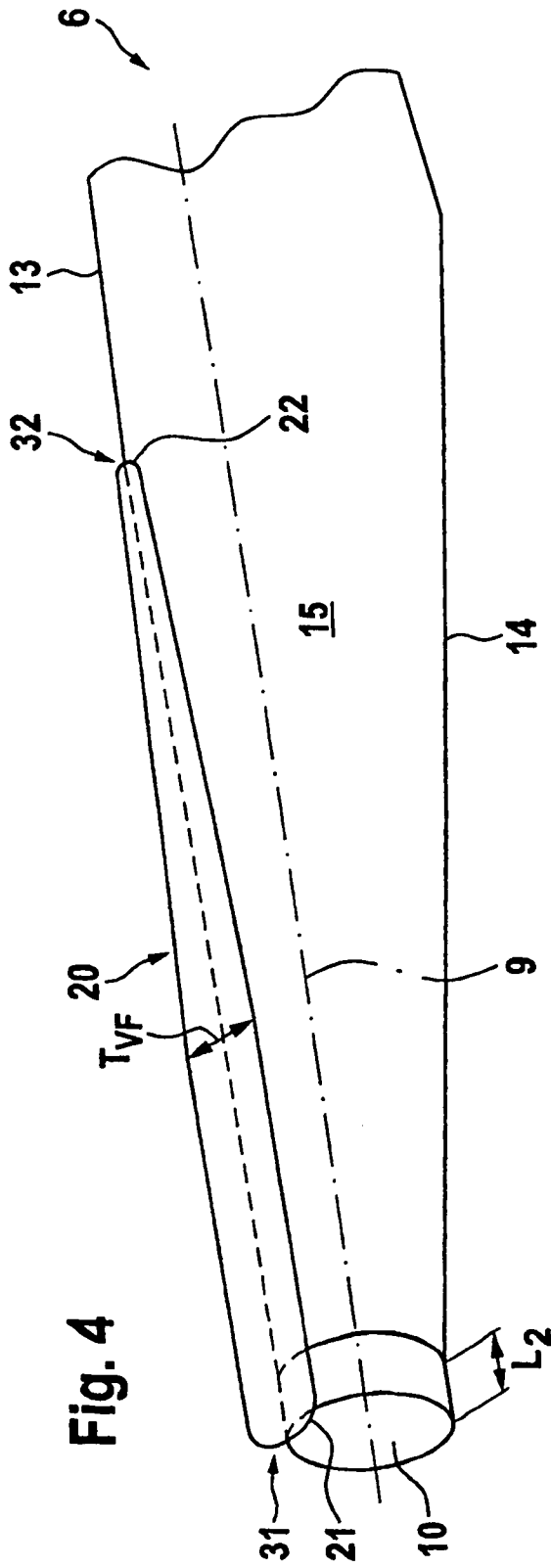
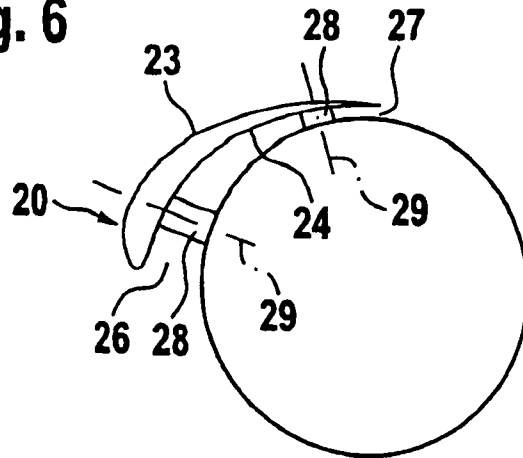


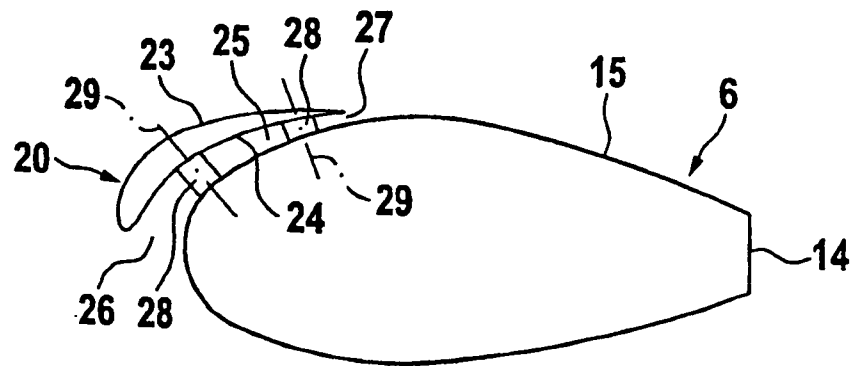
Fig. 3



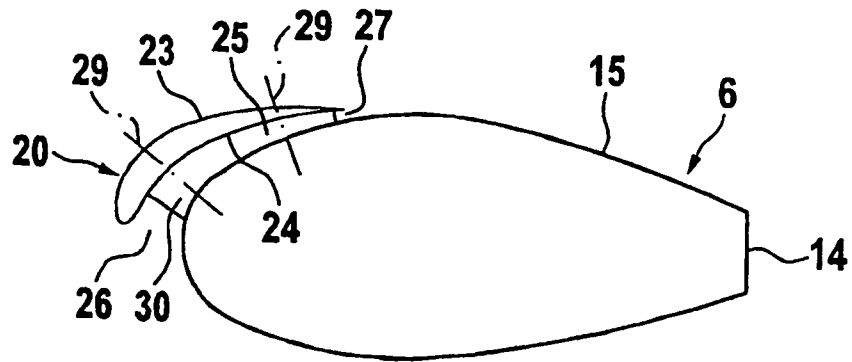
**Fig. 6**



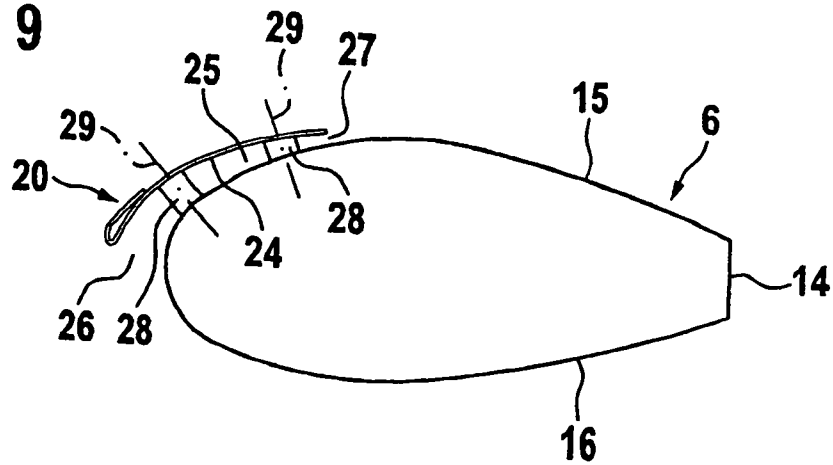
**Fig. 7**



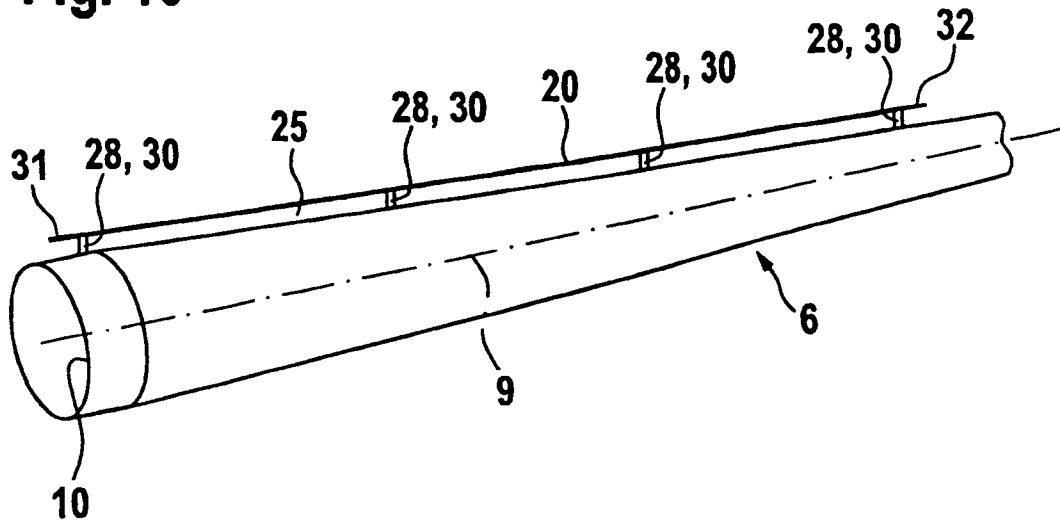
**Fig. 8**



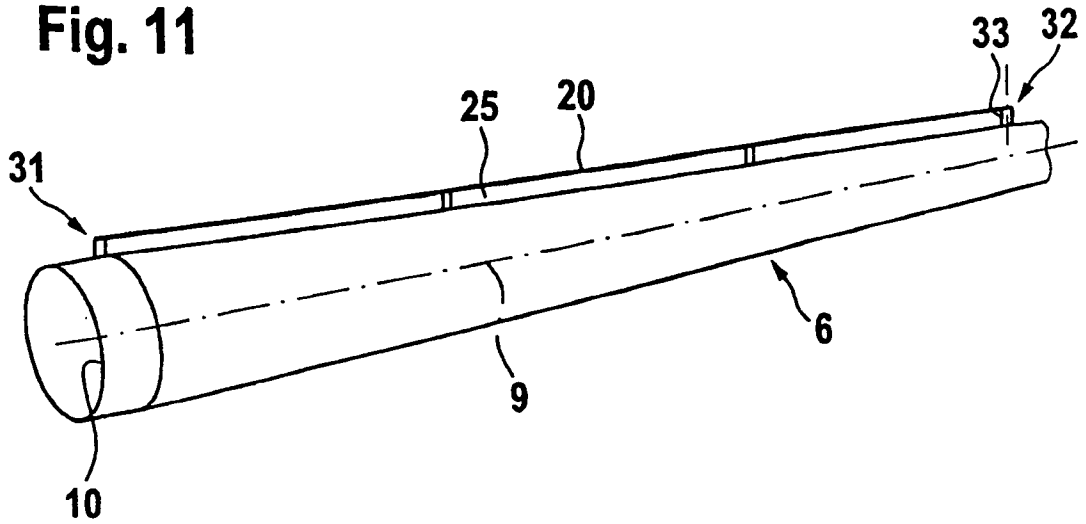
**Fig. 9**



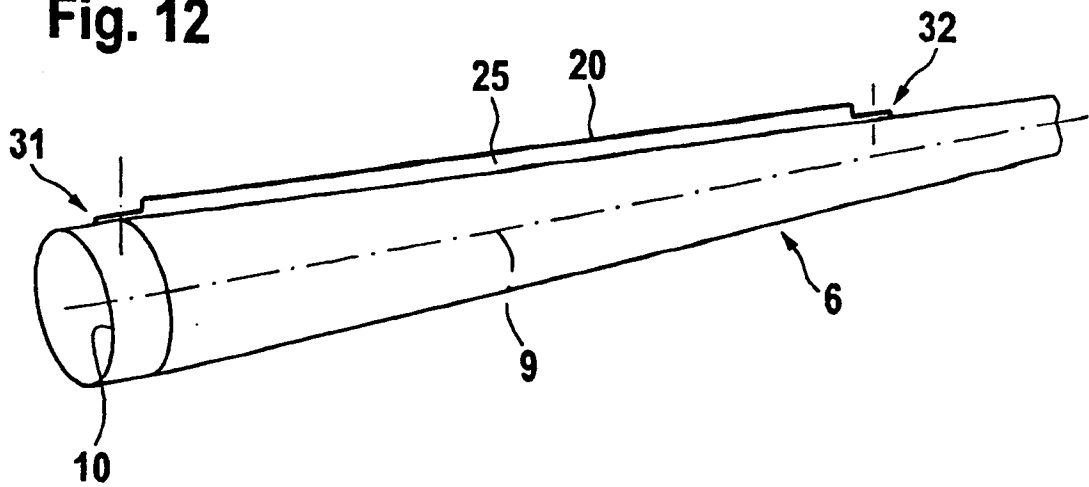
**Fig. 10**



**Fig. 11**



**Fig. 12**



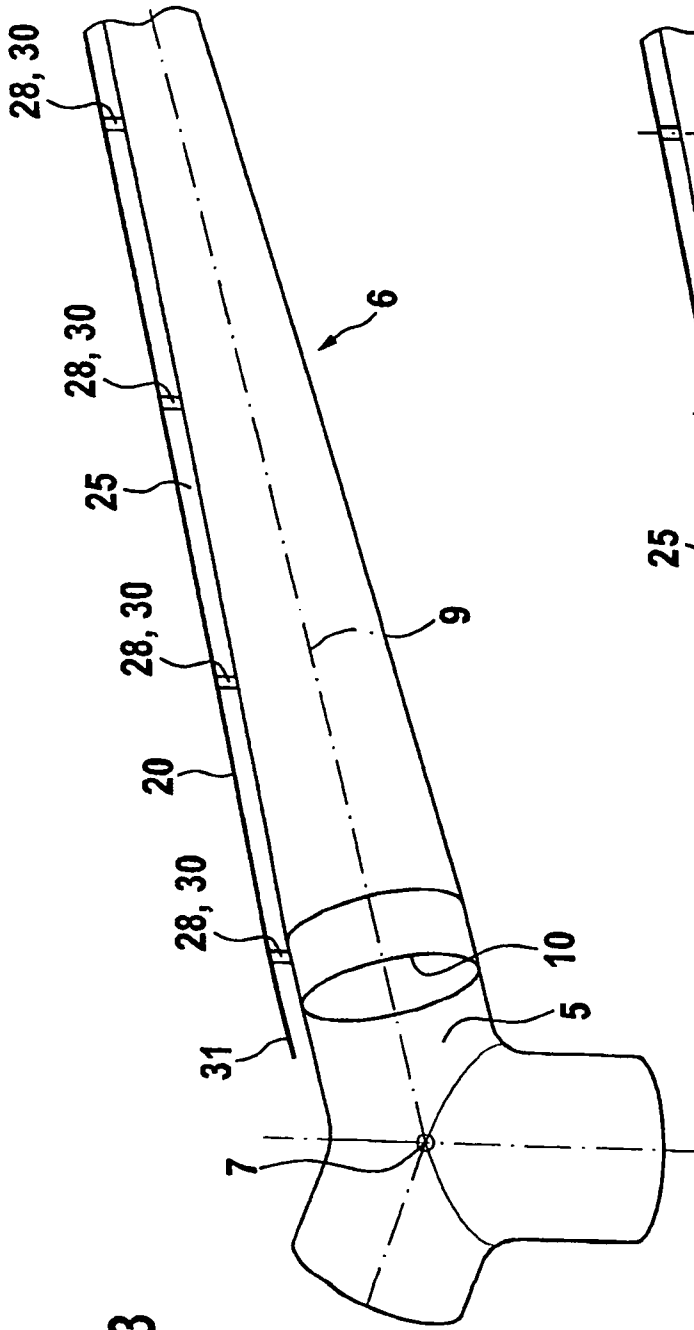


Fig. 13

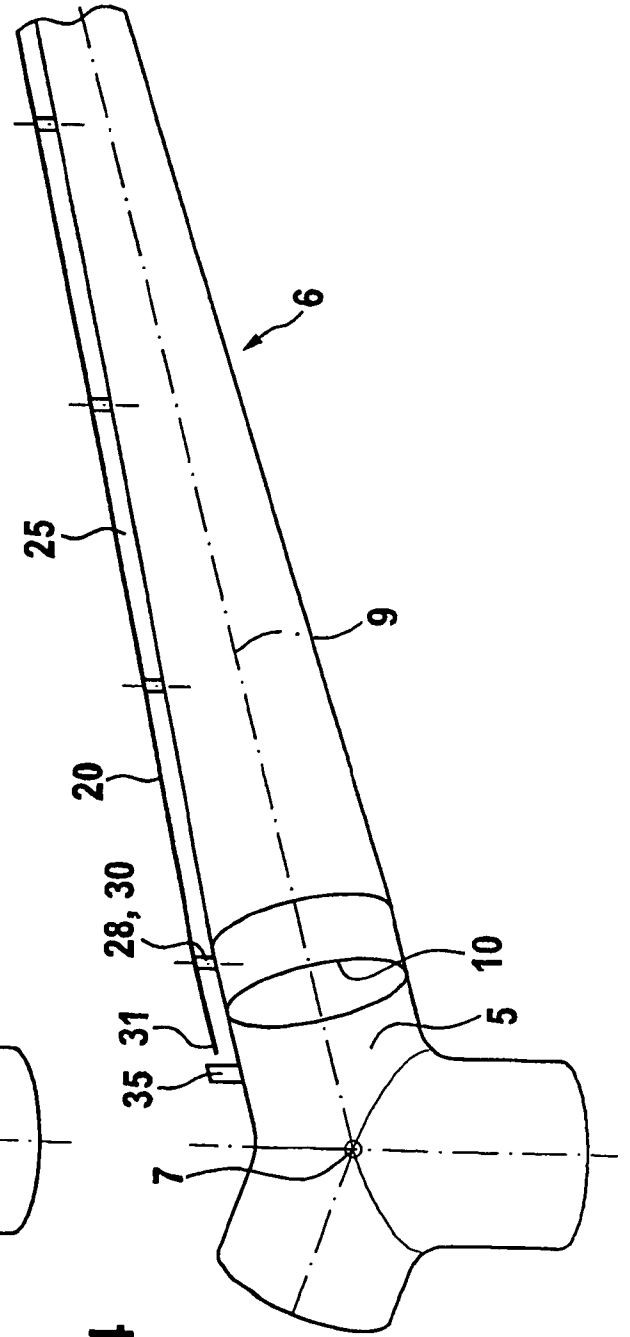


Fig. 14

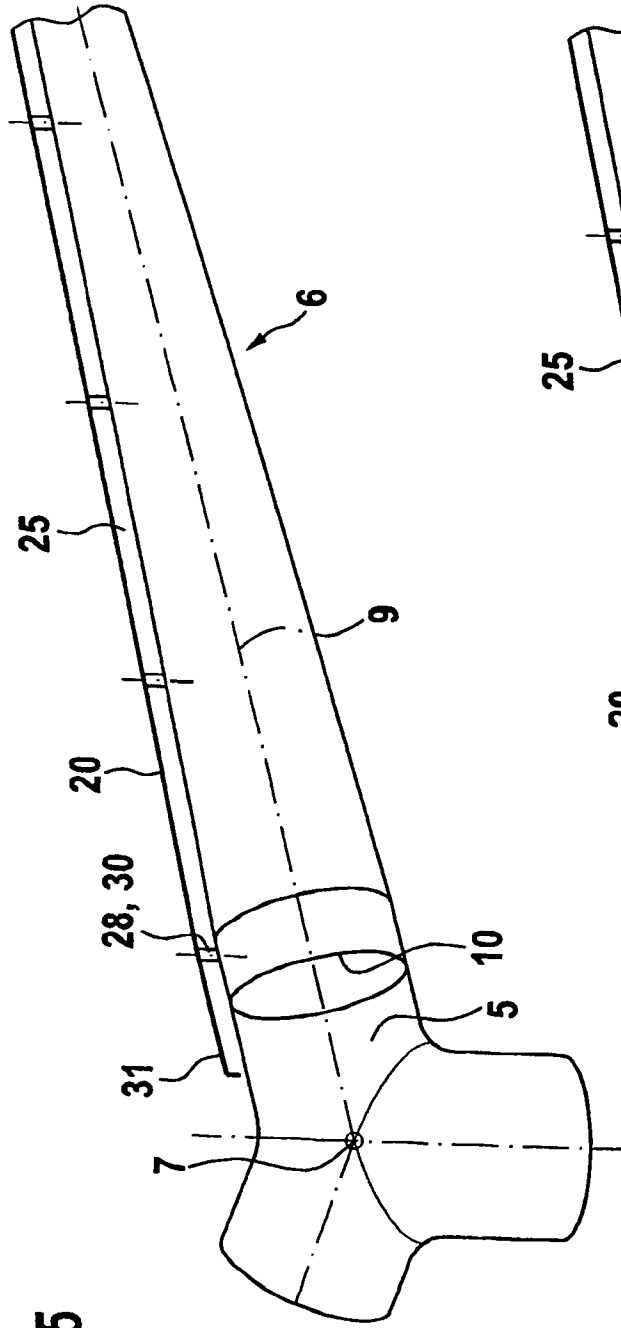


Fig. 15

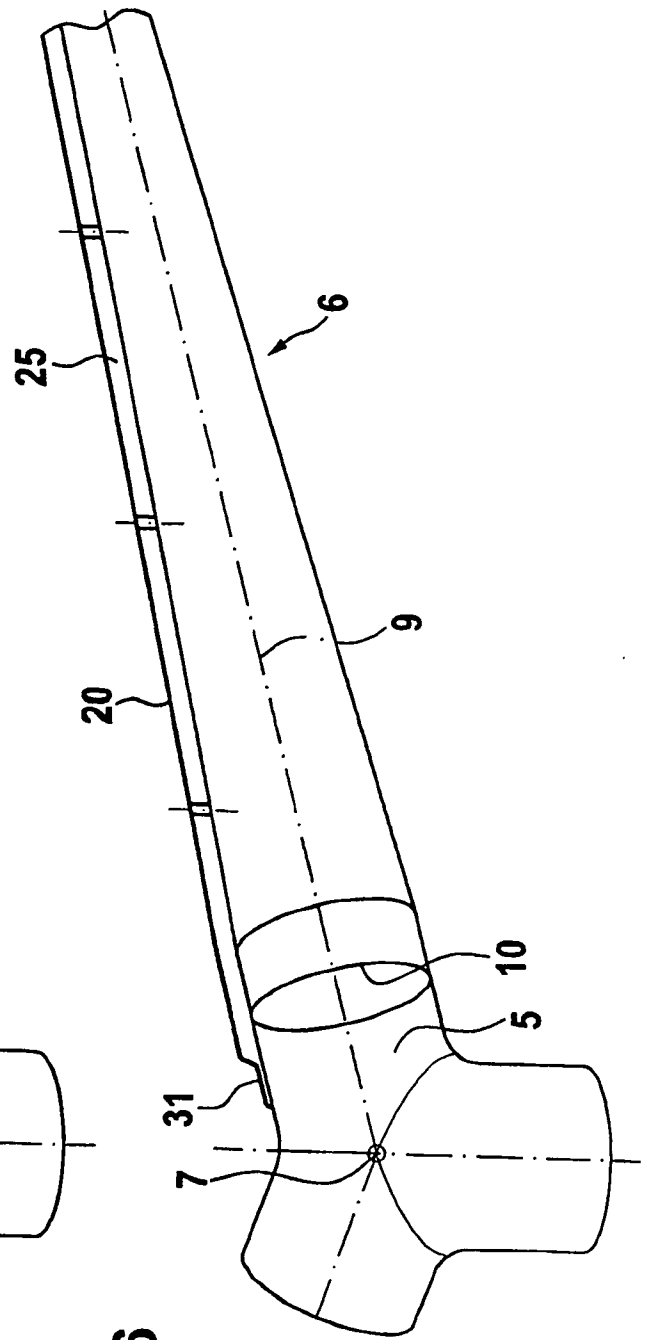


Fig. 16

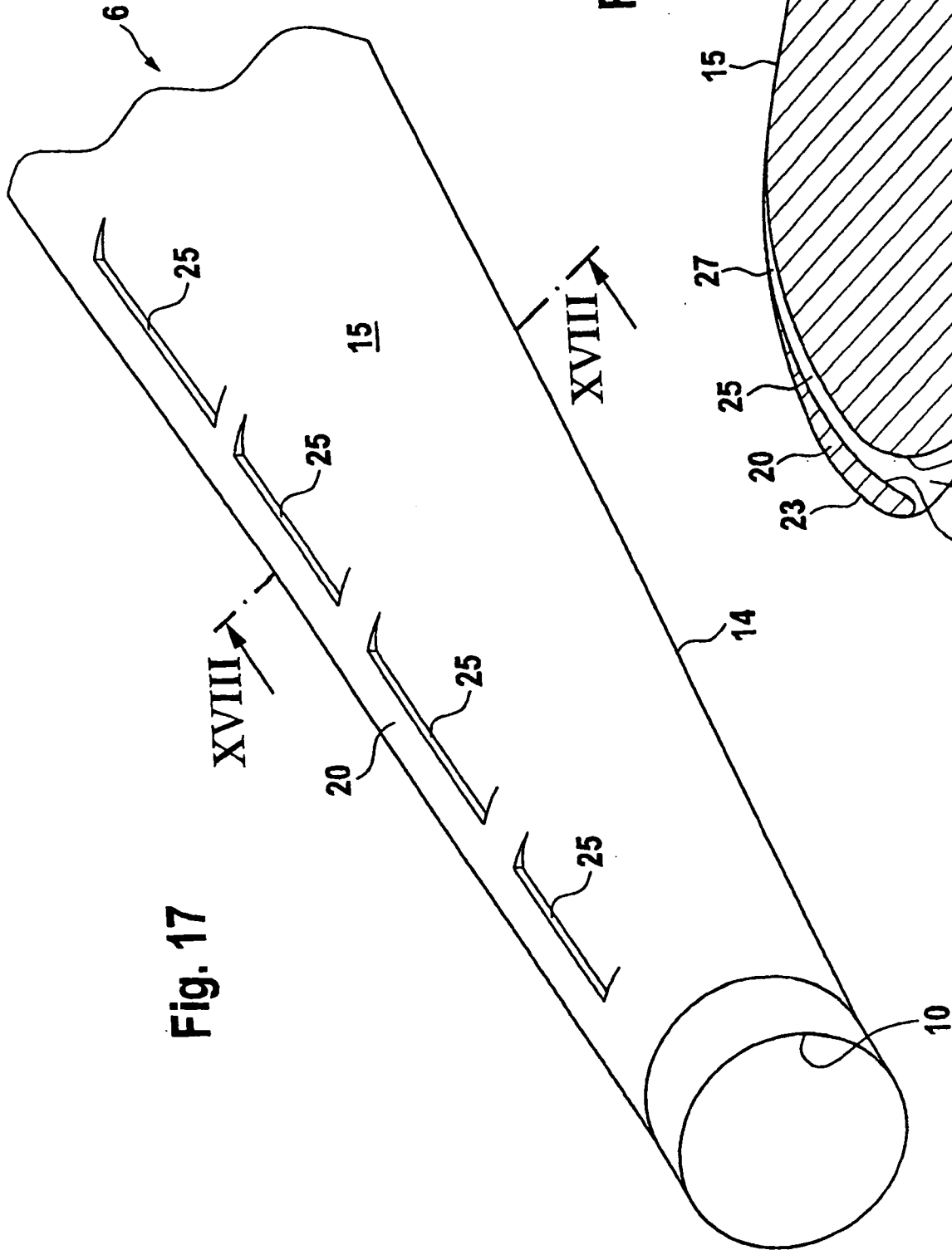


Fig. 17

Fig. 18

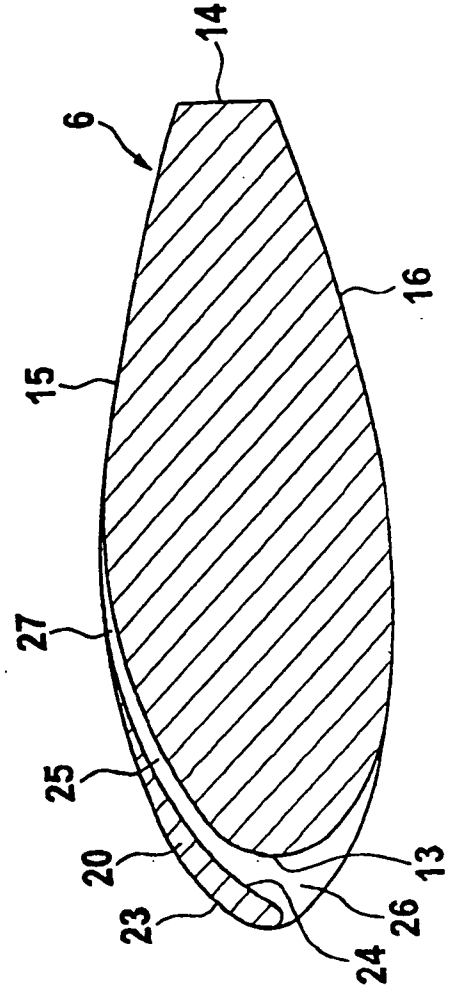


Fig. 18

Fig. 19

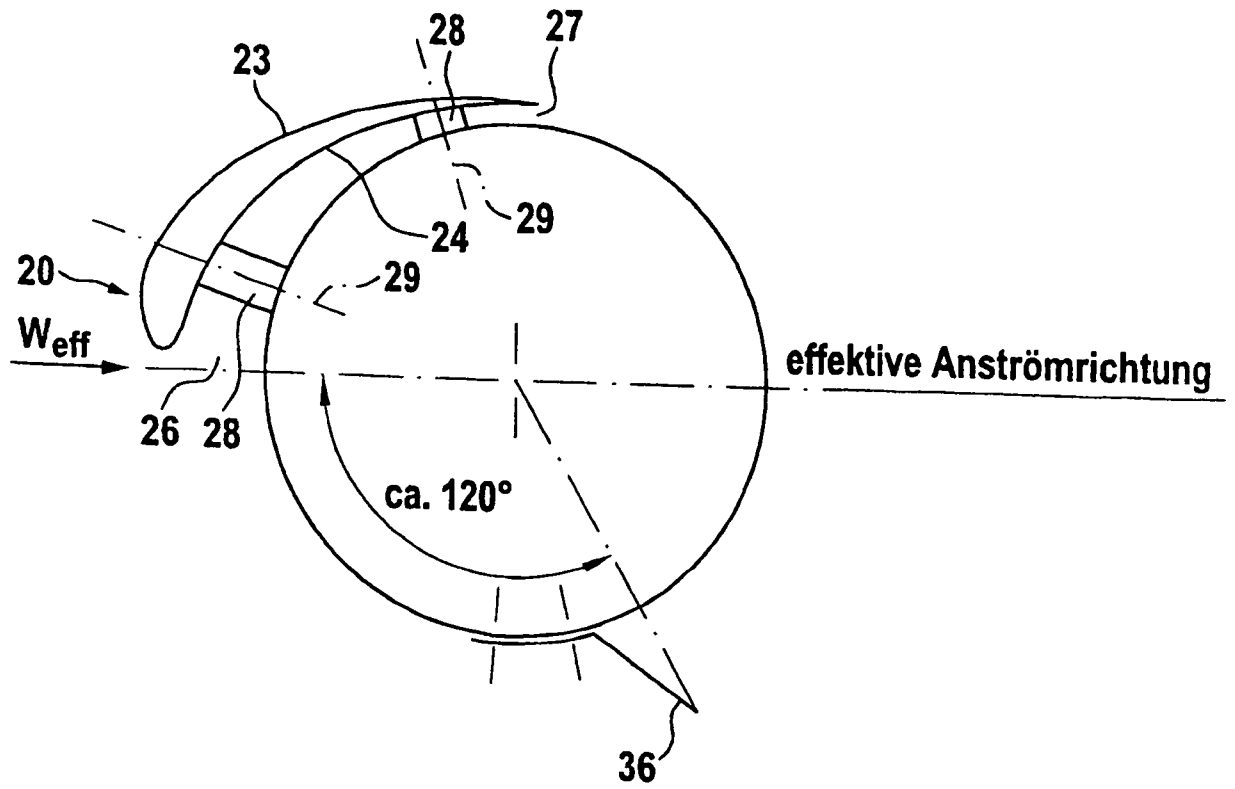


Fig. 20

