



(10) **DE 10 2009 040 648 B4** 2013.02.28

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 040 648.4**
(22) Anmeldetag: **09.09.2009**
(43) Offenlegungstag: **10.03.2011**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **28.02.2013**

(51) Int Cl.: **F03D 11/04 (2006.01)**

Innerhalb von drei 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:
Ebrecht, Wilhelm, 31234, Edemissen, DE

(74) Vertreter:
**GRAMM, LINS & PARTNER GbR, 38122,
Braunschweig, DE**

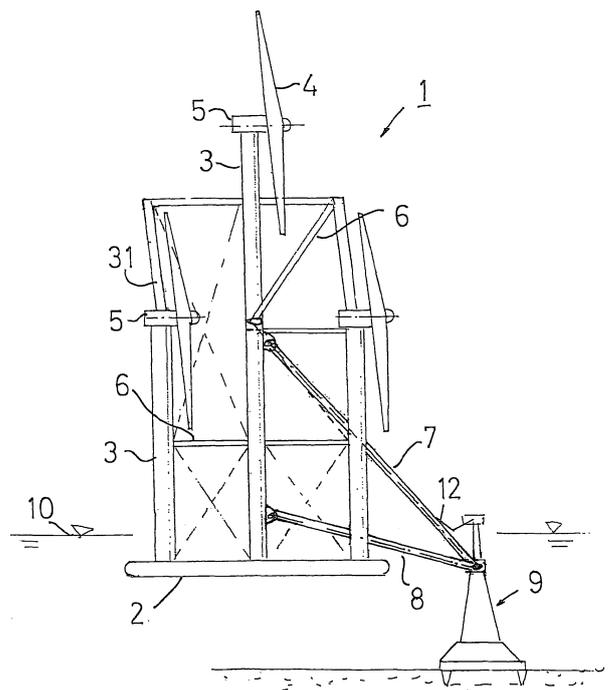
(72) Erfinder:
gleich Patentinhaber

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	102 12 467	A1
DE	102 19 062	A1
DE	197 27 330	A1
DE	198 51 735	A1
DE	10 2004 049 506	A1
DE	29 908 897	U1
DE	602 21 802	T2
EP	1 106 825	A2

(54) Bezeichnung: **Schwimmfähige Offshore-Windkraftanlage**

(57) Hauptanspruch: Schwimmfähige Offshore-Windkraftanlage mit einem Schwimmkörper (2) und einem daran angeordneten Aufbau mit Masten (3) mit einer tropfenförmigen Querschnittskontur, an denen zumindest ein Rotor (4) drehbar gelagert ist, der einen Generator (5) antreibt, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwimmkörper (2) an einem Fundament (9) über mehrere Lenker (7, 8) befestigt ist, um eine Ausrichtung des Schwimmkörpers und des Aufbaus gegenüber dem Fundament (9) zu ermöglichen, von denen zumindest einer in Vertikalrichtung verfahrbar an dem Aufbau (3, 4, 5, 6) gelagert ist, wobei zumindest zwei Lenker (7, 8) in unterschiedlichen Höhen an dem Aufbau (3, 4, 5, 6) befestigt sind und einen Drucklenker (8) und einen Zuglenker (7) ausbilden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine schwimmfähige Offshore-Windkraftanlage mit einem Schwimmkörper und zumindest einem daran angeordneten Masten, an dem zumindest ein Rotor drehbar gelagert ist, der einen Generator antreibt.

[0002] Auf dem Meeresboden gegründete Offshore-Windkraftanlagen sind außerordentlich aufwendig in der Konstruktion, Fertigung und Wartung. Es wird gegenwärtig davon ausgegangen, dass eine Kilowattstunde von auf Offshore-Anlagen erzeugter Energie um 25% teurer als die von auf Land stationierten Windkraftanlagen ist. Offshore-Windkraftanlagen haben jedoch den Vorteil, dass auf See günstigere Windverhältnisse herrschen. Zudem sind noch ausreichend Standorte mit guten Windverhältnissen verfügbar.

[0003] Die DE 197 27 330 A1 beschreibt eine schwimmfähige Offshore-Windenergieanlage mit einer schwimmfähigen Trägerplattform, auf der mehrere Rotoren angeordnet sind. Die Trägerplattform ist an einem Ankerpunkt festgelegt. Über Auftriebskörper kann durch ein gesteuertes Fluten die Plattform so in eine Höhe über Wasser gebracht werden, dass nur die Stützen, die die Plattform mit den Auftriebskörpern verbinden, dem Wellenschlag oder Eisgang ausgesetzt werden.

[0004] Die DE 602 21 802 T2 beschriebene schwimmende Offshore-Windkraftanlage weist einen Schwimmkörper auf, der halb untertauchbar ist. Der Schwimmkörper ist an einem Einpunkt-Verankerungssystem verankert, das im Offshore-Bereich schwimmt und am Meeresboden verankert ist. Der Schwimmkörper wird über ein Joch und gegebenenfalls einen Verstärkungsarm mit dem Verankerungssystem verbunden.

[0005] Die DE 299 08 897 U1 beschreibt eine schwimmende Windenergieanlage zur Gewinnung, Speicherung und zum Verbrauch elektrischer Energie. Die Windenergieanlage ist auf einem abgesenkten, vorzugsweise zylindrischen Auftriebskörper angeordnet und mit einer künstlichen oder natürlichen Insel mit Hilfe eines über der Wasseroberfläche angeordneten Schwenk- und Drehlagers verbunden.

[0006] Die DE 198 51 735 A1 beschreibt ein schwimmfähiges Windkraftwerk mit Rotorblättern, die durch strömungsgünstig geformte Zugstränge verstärkt sind. Rotorwellen sind vor und hinter den Rotorblättern gelagert.

[0007] Die DE 102 19 062 A1 beschreibt eine Offshore-Windenergieanlage mit einem im Meer positionierten Turm und einer darauf aufsitzenden, drehbaren Gondel. Die Drehachse des Rotors ist weitge-

hend waagrecht. Der Rotor ist auf einem Schwimmkörper angeordnet, der mit anderen Schwimmkörpern und Rotoren zu einem Verband zusammengefügt werden können. Der Verband ist am Meeresboden über Ankerseile verankert.

[0008] Die DE 10 2004 049 506 A1 beschreibt eine Windkraftanlage, die mittels Pontons auf dem Wasser schwimmt. Mehrflügelige Rotoren sind in einem regelmäßigen Raster angeordnet, das auf einer luvseitig konkav gekrümmten Fläche angeordnet ist.

[0009] Die EP 1 106 825 A1 beschreibt eine Windkraftanlage mit einem Schwimmkörper und einer Vielzahl an Masten, die auf dem Schwimmkörper angeordnet sind. Die Masten und die Rotoren sind so angeordnet, dass die Zentren der Rotoren in einem Abstand voneinander angeordnet sind, der kleiner als der Vierfache Rotordurchmesser ist.

[0010] Die DE 102 12 467 A1 beschreibt eine Windkraftanlage mit einem unteren Mastabschnitt und einem oberen Mastabschnitt, bei dem der obere Mastabschnitt einen im Wesentlichen linsenförmigen Querschnitt aufweist. Anstelle eines linsenförmigen Querschnittes können auch andere strömungsgünstige Querschnittsformen gewählt werden, beispielsweise tropfenförmige Querschnittsformen.

[0011] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine schwimmfähige Offshore-Windkraftanlage bereitzustellen, die kostengünstig zu fertigen und zu betreiben ist.

[0012] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch eine schwimmfähige Offshore-Windkraftanlage mit den Merkmalen des Hauptanspruchs gelöst. Vorteilhaftere Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen aufgeführt.

[0013] Die schwimmfähige Offshore-Windkraftanlage mit einem Schwimmkörper und zumindest einem daran angeordneten Aufbau mit Masten, an denen zumindest ein Rotor drehbar gelagert ist, der einen Generator antreibt, sieht vor, dass die Masten eine tropfenförmige Querschnittskontur aufweisen. Durch die tropfenförmige Querschnittskontur ergibt sich eine Art Tragflächenprofil der Masten, das eine erhöhte Stabilität gegenüber auftretenden Biegekräften bereitstellt. Da der Winddruck, der auf die Rotorblätter wirkt, nicht vollständig in eine Drehbewegung umgewandelt werden kann, ergeben sich beachtliche Biegebelastungen, die durch die Konstruktion der Masten aufgefangen werden müssen. Durch die tropfenförmige Querschnittskontur, wobei der Querschnitt senkrecht zur Längserstreckung der Masten angelegt wird, ist es nicht nur möglich, eine belastungsoptimierte Gestaltung der Masten zu erreichen, sondern auch die auf die Masten wirkenden Kräfte zu reduzieren. Eine tropfenförmige Querschnittskontur

verringert den auf den Mast wirkenden Winddruck, was es ermöglicht, entweder die Konstruktion dünner und leichter zu gestalten oder größere Rotoren und Generatoren zu verwenden. Um die Windkraftanlage verankern zu können, ist ein Fundament vorgesehen, an dem der Schwimmkörper über mehrere Lenker befestigt ist. Zumindest einer der Lenker ist in Vertikalrichtung verfahrbar an dem Aufbau gelagert, also entweder an einem Masten oder einer Strebe, um eine Ausrichtung des Schwimmkörpers und des Aufbaus gegenüber dem Fundament zu ermöglichen. Dieser Lenker wird überwiegend auf Zug belastet und ist möglichst weit oben an den Masten oder Streben befestigt, wodurch sich die Biegespannungen in den Masten und/oder Streben wesentlich verringern. Weiterhin sind zumindest zwei Lenker in unterschiedlichen Höhen an dem Aufbau befestigt, die als Druck- und Zuglenker ausgebildet sind.

[0014] Weiterhin führt die tropfenförmige Querschnittsgestaltung dazu, dass bei einer sich ändernden Windrichtung der Schwimmkörper leichter und schneller in den Wind gedreht wird, so dass die Rotoren stets optimal zur Windrichtung ausgerichtet sind, ohne dass eine aufwendige, zusätzliche Verstellung notwendig ist.

[0015] Bevorzugt ist der Querschnitt der Masten klappsymmetrisch ausgebildet, wobei die Klappachse parallel zu der Drehachse des Rotors verläuft bzw. die Achsen einander überdecken. Liegt die Drehachse des Rotors in Deckung mit der Klappachse der Masten, ergibt sich eine sehr gute Festigkeit des Mastes, da entlang der Klappachse aufgrund des großen Abstandes der vorderen und hinteren Mastwandung voneinander der Mast die größte Biegesteifigkeit aufweist. Zudem findet kein Torsionsmoment um die Längserstreckung des Mastes statt, was zu einer leichteren Konstruktion der Masten und damit der gesamten Windkraftanlage führt.

[0016] Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass der Schwimmkörper ein Zentralrohr aufweist, das von einer elliptischen oder tropfenförmigen Hülle unter Ausbildung eines Zwischenraumes umgeben ist. Ähnlich wie bei den Masten wird durch die Hülle eine strömungstechnisch günstige Kontur geschaffen, die an eine Tragflächenkonstruktion erinnert. Die elliptische Hülle bzw. eine angenäherte tropfenförmige Hülle umgibt dabei das für die Statik relevante Zentralrohr. Der Zwischenraum kann mit einem Schaumwerkstoff gefüllt sein, insbesondere einem geschlossen-porigen oder einem formstabilen Schaumstoff, der eine ausreichende Druckstabilität der Hülle bereitstellt.

[0017] Das Zentralrohr ist bevorzugt flutbar ausgebildet, so dass das Schwimmniveau der Windkraftanlage an die jeweiligen Bedingungen anpassbar ist. Die Dimensionierungen des Zentralrohrs und des

Schwimmkörpers sind dabei so gewählt, dass die gesamte Windkraftanlage schwimmend an den gewünschten Einsatzort geschleppt werden kann. An dem Einsatzort wird die Windkraftanlage verankert und gegebenenfalls abgesenkt, um eine erhöhte Stabilität der Windkraftanlage zu erreichen. Die bevorzugte Absenktiefe beträgt dabei 5 bis 10 Meter unter die Wasseroberfläche. Darüber hinaus wird dadurch der Einfluss des Wellenganges und der Oberflächenströmungen verringert. Das Zentralrohr ist umgekehrt auch wieder entleerbar, um das Niveau der Windkraftanlage anzuheben, beispielsweise um sie zu Wartungszwecken in einen Hafen zu schleppen.

[0018] Bevorzugt ist der Schwimmkörper pfeilartig oder winkelig ausgebildet und weist zwei Schenkel auf, die winklig zueinander angeordnet sind. An den Schenkeln oder auf den Schenkeln sind die Masten mit den Rotoren angeordnet, wobei der Winkel der Schenkel zueinander so gewählt wird, dass sowohl in der Tiefe als auch in der Breite die Rotoren einander möglichst wenig stören. Je spitzer der Winkel, desto tiefer stehen die Rotoren hintereinander, wobei Ziel ist, dass bei einer frontalen Draufsicht die Rotorenumfänge einander nicht überschneiden. Dazu ist es vorgesehen, dass die Rotoren räumlich versetzt angeordnet sind, also dass sie entlang der Schenkel angeordnet und in einer Vertikalerstreckung versetzt ausgebildet sind. Bevorzugt sind drei Rotoren auf einem gemeinsamen Vertikalniveau angeordnet, während zwei weitere Rotoren oberhalb und unterhalb zwischen zwei benachbarten Rotoren angeordnet sind. Die Verbindung der Rotorachsen bildet in frontaler Draufsicht angenähert ein gleichschenkeliges Trapez aus, damit zum Beispiel die Verbände zum Verstärken der Masten nicht zu groß werden.

[0019] Um die Windkraftanlage gegenüber den auftretenden Kräften zu versteifen, ist vorgesehen, dass Masten miteinander durch Streben verbunden sind. Daraus ergibt sich eine fachwerkartige Struktur aus Masten und Streben, wobei die Streben ein räumliches Fachwerk zusammen mit den im Wesentlichen vertikal orientierten Masten ergeben. Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Streben ebenfalls eine tropfenförmige Querschnittskontur aufweisen, um den Winddruck zu reduzieren, also dass die Belastung auf die Streben selbst, die Masten und den Schwimmkörper minimiert wird. In Verbindung mit einem winkligen Aufbau der Schwimmkörper ist bevorzugt vorgesehen, dass im Verbindungsbereich der beiden Schenkel ein Masten angeordnet ist und entlang der Schenkel sich wesentlichen gleichmäßig beabstandet weitere Masten und Rotoren befinden. Die winklige Anordnung der Schenkel des Schwimmkörpers führt zu einer Stabilisierung in der Strömung sowie einer Abstützung gegenüber einem auftretenden Biegemoment durch die Windlasten. Die tropfenförmige Kontur der Masten und der Streben ist dabei so ausgerichtet, dass der geringste Luftwiderstand be-

reitgestellt wird. Das spitz auslaufende Ende ist somit der Wind abgewandten Seite zugeordnet.

[0020] Um einen Wankausgleich ausführen zu können, beispielsweise bei einem sich verändernden Wasserpegel aufgrund eines Tidehubs, sind an dem Aufbau Verstelleinrichtungen für die Lenker angeordnet, die mit Sensoren an der Windkraftanlage gekoppelt sind. Die Sensoren sind beispielsweise Winkelsensoren, die die Ausrichtung der Masten zu der Vertikalen ermitteln. Über eine Steuerung kann dann ein automatischer Wankausgleich durchgeführt werden, indem der vertikale Anlenkpunkt des Lenkers an dem Masten oder der Strebe variiert wird. Die Streben weisen bevorzugt einen strömungstechnisch optimierten Querschnitt auf, z. B. einen tropfenförmigen Querschnitt mit der Ausrichtung der Längsachse in Windrichtung, also im Wesentlichen horizontal.

[0021] Die Lenker sind bevorzugt über einen Drehkranz an dem Fundament befestigt, um eine ungehinderte Drehbewegung des Schwimmkörpers um das Fundament zu ermöglichen, damit sich verändernden Windrichtungen angepasst werden kann. Die Drehbewegung des Schwimmkörpers erfolgt dabei bevorzugt ohne zusätzlichen Antrieb. Die Anlage dreht sich selbsttätig in den Wind, da der Drehpunkt an dem Fundament außerhalb des Schwimmkörpers angeordnet ist. Ein Zusatzantrieb kann jedoch vorgesehen sein, um die optimale und schnelle Ausrichtung des Schwimmkörpers und der Rotoren zu unterstützen.

[0022] Zumindest zwei der Lenker sind in unterschiedlichen Höhen an dem Aufbau befestigt, um einmal einen Drucklenker und einmal einen Zuglenker ausbilden zu können. Dadurch ist es möglich, die Ausrichtung der Windkraftanlage, insbesondere in Vertikalorientierung zu verändern. Die Lenker können als starre Rohre ausgebildet sein, um bei sich verändernden Bedingungen in der Lage zu sein, sowohl Druckkräfte als auch Zugkräfte aufnehmen und an das Fundament übertragen zu können. Die Lenker können schwimmfähig ausgebildet sein, was den Transport erleichtert, da die Lenker, bevorzugt gemeinsam mit dem Fundament, an den vorgesehenen Standort geschleppt werden können, ohne an Bord geladen werden zu müssen. Vorteilhaft ist, wenn auch die Lenker eine tropfenförmige Querschnittskontur aufweisen, wobei der gerundete Abschnitt mit dem großen Radius nach oben gerichtet ist. Die Tropfenform ermöglicht einen insgesamt leichteren Aufbau, da ein geringerer Winddruck auf den Lenkern lastet. Ebenfalls wird ein im Vergleich zu einem runden Querschnitt größeres Trägheitsmoment bereitgestellt, so dass die Lenker sich nicht so stark durchbiegen.

[0023] Bevorzugt ist das Fundament schwimmfähig und flutbar ausgebildet, so dass die gesamte Windkraftanlage schwimmend transportiert werden

kann. Ein vorgefertigtes Modul aus Schwimmkörper mit Masten, Rotoren und Generatoren kann in einer Werft zusammengebaut und mit einem Schiff an den gewünschten Ort geschleppt werden. Ebenfalls können die Lenker mit dem schwimmfähigen Fundament an den Standort geschleppt werden. Das Fundament wird dann geflutet und die an dem Fundament befestigten oberen Zuglenker werden über eine an dem Mast angeordnete Winde in die gewünschte Höhe gezogen und dort über Bolzen verriegelt. Die unteren, an dem Fundament befestigten Lenker werden ebenfalls entsprechend angehoben und an den Lagerpunkten an den Masten verriegelt. Das Fundament hält dann den Schwimmkörper an Ort und Stelle, abgesehen von der zulässigen Drehbewegung. Nach einer Justierung der Schwimmkörper, z. B. durch eine Variation des oberen Lenkers oder des unteren Lenkers und einer Kopplung der Generatoren an ein Seekabel kann die Anlage in Betrieb genommen werden. Zur Durchführung von Wartungsarbeiten wird das Fundament leer gepumpt und kann nach der Trennung von dem Seekabel wieder an Land geschleppt werden. Der Schwimmkörper kann auch getrennt von dem Fundament gewartet werden, ggf. im Austausch mit einem bereits gewarteten Schwimmkörper mit Aufbau. Dadurch verringern sich die Herstell- und Wartungskosten.

[0024] Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand der beigegefügtigen Figuren näher erläutert. Es zeigen:

[0025] [Fig. 1](#) – eine Seitenansicht einer installierten Windkraftanlage;

[0026] [Fig. 2](#) – eine Draufsicht;

[0027] [Fig. 3](#) – eine Frontalansicht,

[0028] [Fig. 4](#) – eine Detailansicht des Fundamentes;

[0029] [Fig. 5](#) – eine Detailansicht des Schwimmkörpers in Schnittdarstellung;

[0030] [Fig. 6](#) – einen Schnitt durch einen Masten;

[0031] [Fig. 7](#) – eine Schnittdraufsicht;

[0032] [Fig. 8](#) – einen Schnitt durch eine Strebe;

[0033] [Fig. 9](#) – eine Variante der Erfindung in Frontalansicht;

[0034] [Fig. 10](#) – eine Variante gemäß [Fig. 9](#) in Seitenansicht; sowie

[0035] [Fig. 11](#) – eine Variante gemäß [Fig. 9](#) in Draufsicht.

[0036] In der [Fig. 1](#) ist ein Ausführungsbeispiel der schwimmfähigen Offshore-Windkraftanlage **1** in einer schematischen Seitenansicht dargestellt. Die Windkraftanlage **1** weist einen Schwimmkörper **2** auf, der im Betriebszustand der Windkraftanlage **1** unterhalb der Wasseroberfläche **10** positioniert ist. Der Schwimmkörper **2** ist abgesenkt, so dass der Wellengang und die Oberflächenströmung keine oder nur geringe Einflüsse auf die Stabilität der Windkraftanlage **1** haben. Dadurch wird die Stabilität der gesamten Anlage verbessert. Bevorzugt ist die Windkraftanlage **1** in Gebieten einzusetzen, die eine Wassertiefe zwischen 10 und 50 Metern aufweisen, wobei der Schwimmkörper **2** zwischen 5 und 10 Metern unterhalb der Wasseroberfläche **10** positioniert ist. Das Niveau, auf dem der Schwimmkörper **2** befindlich ist, kann durch Ballast eingestellt werden, beispielsweise durch kontrolliertes Fluten von Hohlkörpern.

[0037] Auf dem Schwimmkörper **2**, dessen Konstruktion später näher erklärt werden wird, ist ein Aufbau mit Masten **3** angeordnet, an denen Rotoren **4** mit Generatoren **5** angeordnet sind. Die Rotoren **4** und die Generatoren **5** können an den oberen Enden der Masten **3** angeordnet sein. Zwischen den Masten **3** sind Streben **6** angeordnet, die eine Versteifung des Aufbaus bewirken. Die Streben **6** können horizontal, vertikal und diagonal angeordnet sein, um eine räumliche Verstrebung der Masten **3** zu bewirken. Die durch die Streben **6** und die Masten **3** erzielte Fachwerkstruktur vermindert die Biegebelastung auf die Masten **3**, so dass diese insgesamt leichter und kostengünstiger gebaut werden können. Oberhalb der Generatoren **5** können Mastverlängerungen **31** angeordnet sein, über die es möglich ist, eine Lastumleitung zu bewirken. Hierdurch wird eine zusätzliche Versteifung und Verstrebung der Gesamtkonstruktion erreicht. Als Aufbau werden diejenigen Komponenten angesehen, die sich oberhalb des Schwimmkörpers **2** befinden, also die Masten **3**, Rotoren **4**, Generatoren **5** und Streben **6** sowie weitere gegebenenfalls vorhandene Komponenten.

[0038] Die Generatoren **5** wandeln die Bewegungsenergie der sich drehenden Rotoren **4** in elektrische Energie um und leiten diese dann über Kabel weiter. Grundsätzlich ist es auch möglich, dass die Generatoren **5** nicht unmittelbar an den Rotoren **4** angeordnet sind, sondern sich im Inneren der Masten **3** oder an einer anderen Stelle an dem Schwimmkörper **2** befinden. Dann ist notwendig, die kinetische Energie über ein Getriebe und Übertragungselemente zu den jeweiligen Generatoren zu bringen. Die Generatoren **5**, die in so genannten Gondeln an den Masten **3** angeordnet sind, können starr an den Masten **3** befestigt sein, so dass keine aufwendige Drehbefestigung der Rotoren **4** und Generatoren **5** an den Masten **3** über Drehlager erfolgen muss. Dies reduziert weiterhin die Kosten für die Herstellung und Wartung der Windkraftanlage **1**.

[0039] Damit der Schwimmkörper **2** mit dem Aufbau nicht weggetrieben wird, ist ein Fundament **9** vorgesehen, das auf den Meeresboden abgesenkt wird. Das Fundament **9** ist mit dem Schwimmkörper **2** und dem Aufbau über die Lenker **7, 8** gekoppelt. Der obere Lenker **7** oder die oberen Lenker **7** werden dabei überwiegend auf Zug belastet, da der mastenseitige oder strebenseitige Anlenkpunkt sehr weit oben liegt. Der untere Lenker **8** wird überwiegend als Druckkraft aufnehmender Lenker eingesetzt, weil sich aus der Geometrie der Anlenkung und der Anordnung der Rotoren **4** oberhalb der Anlenkpunkte die Lenker **7, 8** ergeben. Die Lenker **7, 8** sind dabei als starre Elemente ausgebildet, vorzugsweise Rohrelemente mit einem tropfenförmigen Querschnitt in einer Hochkantausrichtung, die an den Anlenkpunkten an den Masten **3** oder Streben **6** ein Drehlager aufweisen, beispielsweise einen Drehbolzen, so dass bei einem Tidehub, Wellengang oder anderen Vertikalbewegungen relativ zu der fundamentseitigen Anlenkung eine Bewegung stattfinden kann. Ebenfalls ist an dem Fundament **9** eine schwenkbare Anlenkung der Lenker **7, 8** vorgesehen.

[0040] Die mastenseitigen Anlenkpunkte können höhenverstellbar sein, so dass die Neigung der Masten beim Positionieren der Windkraftanlage **1** vor Ort eingestellt werden kann. Diese Einstellung ist notwendig, da sowohl die Schwimmhöhe, der Schwimmkörper **2** als auch der Meeresspiegel **10** schwanken kann, so dass sich nach dem Absenken des Fundamentes **9** auf den Meeresboden eine individuelle geometrische Zuordnung ergibt. Um die Lenker **7, 8** nicht teleskopisierbar ausführen zu müssen, wird die Neigung oder ein Wankausgleich durch eine Variation der Höhe der Anlenkpunkte an den Masten **3** oder Streben **6** durchgeführt. Da eine Verstellbarkeit auch Probleme hinsichtlich der Zuverlässigkeit nach sich ziehen kann, ist eine feste Zuordnung der Anlenkpunkte ebenfalls möglich, wobei die Längen der Lenker und die Anlenkpunkte an den Masten auf den Tidehub und die Wassertiefe abgestimmt sein müssen.

[0041] In der [Fig. 2](#) ist in einer Draufsicht die Anordnung der Rotoren **4** und der Masten **3** auf dem Schwimmkörper **2** gezeigt. Der Schwimmkörper **2** weist zwei Schenkel **21, 22** auf, die in einem Winkel zueinander angeordnet sind. Im dargestellten Ausführungsbeispiel ist der eingeschlossene Winkel zwischen den Schenkeln **21, 22** größer als 90°, die Größe des Winkels kann den Anforderungen angepasst werden. Durch die winkelarartige Ausgestaltung des Schwimmkörpers **2** wird eine vergrößerte Stabilität des Schwimmkörpers **2** und damit der gesamten Windkraftanlage **1** erreicht. In der Draufsicht gemäß [Fig. 2](#) ist zu erkennen, dass die einzelnen Rotoren **4** hintereinander und nebeneinander angeordnet sind. Es wird angenommen, dass der Wind aus Richtung des Fundamentes **9** weht. Der in Windrichtung erste Rotor **4** ist in dem Verbindungsbereich zwischen

den einzelnen Schenkeln **21**, **22** angeordnet, also an der Spitze des Winkels. Dahinter sind zwei weitere Masten **3** mit Rotoren **4** angeordnet, die so zueinander beabstandet sind, dass die Rotorenumfänge einander nicht schneiden. Zwischen den Masten ist eine Querstrebe **6** angeordnet, um die Konstruktion zu versteifen. An den hinteren Enden der Schenkel **21**, **22** sind jeweils ein weiterer Mast **3** mit Rotor **4** angeordnet, wobei die beiden hinteren Rotoren **4** soweit auseinander stehen, dass zwischen ihnen ein Freiraum vorhanden ist, der dem Durchmesser des vorderen Rotors **4** entspricht.

[0042] Der Schwimmkörper **2** ist über die Lenker, von denen nur die Zuglenker **7** dargestellt sind, an dem Fundament **9** angeordnet. Die Lenker **7** sind an einem Drehkranz **91** angeordnet, so dass der gesamte Schwimmkörper **2** um das Fundament **9** herum-schwenken kann, um sich an ändernde Windrichtungen anzupassen.

[0043] In der **Fig. 3** ist eine Frontalansicht der Anordnung der Rotoren **4** gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Schenkel **21**, **22** des Schwimmkörpers unterhalb der Wasseroberfläche **10** liegen. Die Masten **3** ragen im Wesentlichen senkrecht nach oben und tragen an ihren Enden die Rotoren **4** mit den Generatoren **5**. Zwischen den Masten sind Streben **6** in Horizontalausrichtung und Diagonalausrichtung angeordnet. Die Zuglenker **7** sind ungefähr auf Höhe der Drehachsen der unteren Rotoren **4** angeordnet, während der Drucklenker **8** ungefähr auf Höhe des Meeresspiegels **10** angeordnet ist. Es ist zu erkennen, dass insgesamt vier Lenker **7**, **8** vorgesehen sind, in denen je ein Drucklenker **8** und Zuglenker **7** an den mittleren Masten **3** eines Schenkels **21**, **22** angreifen. Durch die relativ hohe Anlenkung der Zuglenker **7** verringert sich die Biegebelastung der Masten **3**, so dass die Gesamtkonstruktion sehr leicht ausgeführt werden kann.

[0044] In der **Fig. 3** ist zu erkennen, dass die Rotoren **4** so angeordnet sind, dass die Umfänge einander nicht überdecken, die vorderen und hinteren Rotoren **4** liegen im Wesentlichen auf einer Ebene, die mittleren Rotoren **4** sind oberhalb der vorderen und hinteren Rotoren **4** angeordnet. Eine Verbindung zwischen den Drehachsen und der jeweiligen Rotoren **4** würde zu einem gleichmäßigen Trapez führen.

[0045] In der **Fig. 3** ist zu erkennen, dass die Lenker **7**, **8** an einem Drehkranz **91** an dem Fundament **9** angeordnet sind. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die oberen Lenker **7** im Bereich der Verbindung einer Querstrebe **6** zu einem Masten **3** angelenkt sind, um eine gute Kraftableitung zu verwirklichen.

[0046] In der **Fig. 4** ist eine Detailansicht des Fundamentes **9** gezeigt. Das Fundament **9** ist grundsätzlich schwimmfähig und weist einen Betonankerblock

92 auf, der hohl ist. Durch die hohle Ausführung ist der Betonankerblock **92** schwimmfähig. An der Unterseite des Betonankerblocks **92** können Rückhalteelemente oder Zacken angeordnet sein, um sich im Meeresboden zu verkrallen. Aufwendige Gründungsaktivitäten entfallen. Der Betonankerblock **92** wird mit dem Schwimmkörper **2** und dem darauf befindlichen Aufbau über die Lenker **7**, **8** gekoppelt und nach der Montage in einer Werft an diejenige Position geschleppt, an der die Windkraftanlage **1** positioniert werden soll. Zum Festlegen der Schwimmkraftanlage **1** ist vorgesehen, dass der Betonunterblock **92** geflutet wird, so dass er absinkt und sich auf dem Meeresboden verankert. An dem oberen Ende des Betonankerblocks **92** ist der Drehkranz **91** angeordnet, an dem die Lenker **7**, **8** um eine im Wesentlichen horizontal angeordnete Schwenkachse verschwenkbar sind. Der Drehkranz **91** selbst ist um eine Vertikalachse drehbar, so dass neben einem Höhenausgleich die Lenker **7**, **8** sich um die Hochachse des Betonankerblocks **92** drehen können. Ein Stromkabel **12**, das entlang des oberen Lenkers **7** geführt ist, wird über ein Scherengestänge zu einem oberen Drehkranz **93** geleitet, der oberhalb des Meeresspiegels **10** angeordnet ist. Über den oberen Drehkranz **93** wird die elektrische Energie über eine Stromdurchführung einem Seekabel **13** zugeführt, über das die erzeugte elektrische Energie weitergeleitet wird.

[0047] Das Scherengestänge kann vorgesehen sein, damit das Stromkabel **12** nicht im Wasser verlaufen muss. Das Scherengestänge gleicht die Schwenkbewegung der Lenker **7** aus. Der obere Drehkranz **93** kann über ein Stahlrohr an dem Betonankerblock **92** angeordnet sein.

[0048] Zur Demontage oder zu Wartungszwecken ist es möglich, den Betonankerblock **92** zu entleeren, so dass aufgrund des Auftriebes das Fundament **9** von dem Meeresboden angehoben wird. Nach Trennung des Seekabels **13** kann dann das Fundament **9** zusammen mit oder getrennt von dem Schwimmkörper **2** und dem Aufbau zu Wartungszwecken einfach an Land bzw. in eine Werft geschleppt werden.

[0049] In der **Fig. 5** ist ein Querschnitt durch einen Schwimmkörper **2** gezeigt. Der Schwimmkörper **2** weist einen mehrteiligen Aufbau mit einem Zentralrohr **23** auf, das im vorliegenden Ausführungsbeispiel einen runden Querschnitt zur Aufnahme hoher Torsionsmomente aufweist. Das Zentralrohr **23** ist hohl ausgebildet und flutbar, so dass je nach Wasserstand innerhalb des Zentralrohrs **23** der Schwimmkörper **2** abgesenkt oder angehoben wird. Das Zentralrohr **23** ist zumindest teilweise von einer elliptischen Hülle **20** umgeben, so dass sich zwischen dem Zentralrohr **23** und der Hülle **24** ein Zwischenraum **25** bildet, der zusätzlich als Auftriebskörper wirkt. Der Zwischenraum **25** kann mit einem Schaumwerkstoff gefüllt sein, beispielsweise einem Hartschaum, einem Metallschaum

oder dergleichen. Die elliptische Ausgestaltung der Hülle **24** bewirkt, dass nur ein geringer Strömungswiderstand einer Wasserströmung entgegengesetzt wird, so dass die Kräfte, die über die Lenker **7, 8** auf das Fundament **9** übertragen werden, minimiert werden. Auf dem Zentralrohr **23** sind die Masten **3** angeordnet, vorzugsweise verschweißt oder auf andere Art und Weise daran befestigt.

[0050] In der [Fig. 6](#) ist eine Schnittdarstellung durch einen Masten **3** dargestellt. Der Masten **3** ist auf dem Schwimmkörper **2** angeordnet. Das Zentralrohr **23** ist in Strichlinien dargestellt. Der Querschnitt des Masten **3** ist im Wesentlichen tropfenförmig ausgebildet, wobei eine klappsymmetrische Querschnittskontur vorhanden ist. Die annähernd kreisförmige Vorderseite des Masten **3** ist in Richtung auf die primäre Windrichtung, die durch den Pfeil angedeutet ist, ausgerichtet. Die Längserstreckung des Querschnitts ist somit im Wesentlichen parallel zu der primären Windrichtung ausgerichtet. Alle Masten **3** der Windkraftanlage **1** sind im Wesentlichen parallel zueinander ausgerichtet, so dass ein möglichst geringer Luftwiderstand vorherrscht, wodurch die Windlasten, die durch den Winddruck auf die Masten **3** ausgeübt wird, minimiert werden. Die Achsen der Rotoren **4** liegen vorzugsweise in Deckung mit der Längserstreckung der Querschnittskontur mit den Masten **3**, wodurch sich eine belastungsoptimierte Ausgestaltung ergibt. Aufgrund der langgestreckten Seitenwände der Masten **3** wird bei sich ändernden Windrichtungen ein erhöhter Widerstand gegen seitlich auftreffenden Wind bereitgestellt, so dass sich der Schwimmkörper **2** leichter in den Wind dreht, so dass die Rotoren **4** stets optimal zu der Windrichtung ausgerichtet sind.

[0051] In der [Fig. 7](#) ist die tropfenförmige Kontur der Masten **3** zu erkennen. Ebenso ist zu erkennen, dass die Masten **3** gleich orientiert ausgerichtet sind, so dass die Längserstreckungen der jeweiligen Querschnittskonturen parallel zueinander ausgerichtet sind. Zwischen den einzelnen Masten sind Querstreben **6** vorgesehen, die ebenfalls eine tragflächenartige oder tropfenartige Querschnittskontur aufweisen. Eine solche Querschnittskontur ist in der [Fig. 8](#) dargestellt. Auch hier ist die Ausrichtung der Kontur so gewählt, dass ein möglichst geringer Widerstand vorhanden ist, um die Lasten durch den Winddruck zu minimieren. Die Streben **6** können eine innere Aussteifung in Gestalt von Stäben oder Rippen aufweisen und ggf. mit einem Schaumstoff zur Stabilisierung gefüllt sein. Zuganker **61** können vorgesehen sein, die zur Ableitung von Biegekräften an den hinteren Masten **3** befestigt sind. Die Zuganker **61** werden an der Strebe **6** geführt und dem vorderen Masten **3** befestigt.

[0052] Sowohl die Masten **3** als auch die Streben **6** können eine Gitterstruktur aufweisen, die ummantelt sein kann. Die Zuganker **61** können als Zugver-

band aus Spannstahl mit Gewinden ausgebildet sein, wobei auch hier eine strömungstechnisch günstige Tropfenform bevorzugt wird, die durch eine Verkleidung erzielt werden kann.

[0053] Die dargestellte Ausführungsform der schwimmend, halb tauchend ausgebildeten Windkraftanlage **1** ist bevorzugt für eine Wassertiefe von 10 bis 50 Metern ausgebildet, wobei der winkelförmige Schwimmkörper **2** zwischen 5 und 10 Meter unter der Wasseroberfläche **10** positioniert wird, um sich unterhalb der Wellenbewegungen zu befinden. Dadurch werden die Höhenschwankungen des Schwimmkörpers **2** minimiert, so dass die Lenker **7, 8** nur geringe Relativbewegungen ausführen müssen. Bevorzugt sind solche Windkraftanlagen **1** für eine geringe Rotoranzahl ausgebildet, die vorliegende Anlage ist für maximal fünf Generatoren **5** ausgelegt, so dass sie leicht an Land oder in Werften montiert und vollständig montiert an den Einsatzort geschleppt werden kann. Die gesamte Anlage ist so ausgebildet, dass sie ohne Zusatzgeräte, also Schwimmkran oder dergleichen, im Meer installiert werden kann. Dazu muss lediglich das Fundament **9** abgesenkt und der Schwimmkörper **2** auf das gewünschte Niveau durch Flutung oder Leerpumpen eingestellt werden. Über Verstelleinrichtungen, zum Beispiel Winden, die die Höhe der Anlenkpunkte der Lenker **7, 8** an den Masten **3** oder den Streben **6** einstellen, kann dann eine vertikale Ausrichtung der Masten **3** erfolgen. Bei festliegenden Anlenkpunkten werden die Lenker **7, 8** auf die gewünschte Höhe gezogen und verriegelt. Reparaturen können in speziellen Reparaturwerften durchgeführt werden, wobei der Schwimmkörper **2** zusammen mit dem Aufbau und mit dem oder ohne das Fundament **9** mit einem Schlepper transportiert werden kann. Dazu ist es lediglich notwendig, den gefluteten Betonankerblock **92** des Fundaments zu entleeren und gegebenenfalls den Schwimmkörper **2** leer zu pumpen. Dadurch tauchen sowohl der Schwimmkörper **2** als auch das Fundament **9** auf, so dass die gesamte Anlage in die Werft geschleppt werden kann. Zum Leerpumpen der Schwimmkörper **2** und des Fundaments **9** können separate Pumpen vorgesehen sein, ebenfalls können fest installierte Pumpen vorgesehen sein. Entsprechende Anschlüsse und Ventile beispielsweise zum Einpumpen von Luft sind möglich und vorgesehen. Alternativ dazu wird der Schwimmkörper **2** abgekoppelt und getrennt in die Werft geschleppt.

[0054] Die Lenker **7, 8** stellen eine tidehubunabhängige, starre Verriegelung zwischen dem Schwimmkörper **2** und dem Fundament **9** her, wobei beide Lenker **7, 8** sowohl Zug als auch Druckkräfte übertragen können. Der obere Lenker **7** überträgt primär Zugkräfte, der untere primär Druckkräfte.

[0055] Der Schwimmkörper **2** mit dem gesamten Aufbau stellt sich selbsttätig in den Wind, da der La-

gerungspunkt des Drehlagers **91** außerhalb des Winkels des Schwimmkörpers **2** liegt. Alle vom Wind umströmten Elemente **2, 3, 5, 6, 7, 8** ausgenommen die Rotoren **4**, sind mit einer tragflächenartigen Querschnittskontur versehen, so dass eine elliptische oder tropfenförmige Kontur bereitgestellt wird. Sowohl die Generatoren **5** als auch die Masten **3**, die Streben **6** und die Lenker **7, 8** weisen eine entsprechende Querschnittskontur auf, so dass aufgrund der aerodynamischen Optimierung sehr geringe Winddrücke durch den Aufbau bereitgestellt werden. Dadurch können die Durchmesser der Masten **3**, der Streben **6** und der Lenker **7, 8** verringert werden. Die winkelförmige Ausgestaltung des Schwimmkörpers **2** ermöglicht eine stabile Lage des gesamten Aufbaus, wodurch die Kippgefahr verringert wird. Die Anlenkung der Zug- und Drucklenker **7, 8** an dem Aufbau sind so, dass bei einem Tidehub, der in der Nordsee ungefähr 3 Meter beträgt, die senkrechte Position der Masten **3** sich nicht oder nur wesentlich ändert. Je nach geometrischer Auslegung ist es notwendig, dass eine Nachführung der Anlenkpunkte erfolgt. Es ist vorgesehen, dass Winkelsensoren an den Masten **3** vorhanden sind, die eine Neigung zur Schwerkraftichtung erfassen. Um bei einem Überschreiten des Schwellwertes die Neigung ausgleichen zu können, sind Verstelleinrichtungen vorgesehen, die eine automatische Verlagerung der Anlenkpunkte vornehmen, so dass ein automatischer Wankausgleich ermöglicht wird. Über den Drehkranz **91** und den oberen Drehkranz **93** für das Stromkabel **12** ist es möglich, dass die gesamte Windkraftanlage 1 um 360° schwenkbar bleibt.

[0056] In den **Fig. 9** bis **Fig. 11** ist eine Variante der Erfindung gezeigt, die der Windkraftanlage gemäß den **Fig. 1** bis **Fig. 3** im Wesentlichen entspricht. Gleiche Bezugszeichen bezeichnen gleiche Komponenten. Statt drei Ebenen von Masten **3** in Windrichtung hintereinander aufzustellen, so dass sich insgesamt fünf Rotoren **4** auf dem Schwimmkörper **2** befinden, sind gemäß den **Fig. 9** bis **Fig. 11** nur drei Masten **3** mit drei Rotoren vorgesehen, wobei auch hier die Zuglenker **7** und Drucklenker **8** an der zweiten Reihe der Masten **3** angreifen. In der Ausführungsform gemäß der **Fig. 1** bis **Fig. 3** wäre dies die mittlere Reihe, wenn die Anlage von der Seite betrachtet wird, in der Ausführungsform gemäß der **Fig. 9** bis **Fig. 11** sind die Lenker **7, 8** an den hinteren Masten **3** befestigt. Eine solche Anlage **1** mit drei Rotoren ist leichter als die Anlage **1** mit fünf Rotoren, so dass eine leichtere und kostengünstigere Variante im Vergleich zu den Ausführungsformen gemäß der **Fig. 1** bis **Fig. 3** realisiert werden kann.

Patentansprüche

1. Schwimmbfähige Offshore-Windkraftanlage mit einem Schwimmkörper (**2**) und einem daran angeordneten Aufbau mit Masten (**3**) mit einer tropfenförmigen Querschnittskontur, an denen zumindest ein Rotor (**4**) drehbar gelagert ist, der einen Generator (**5**) antreibt, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schwimmkörper (**2**) an einem Fundament (**9**) über mehrere Lenker (**7, 8**) befestigt ist, um eine Ausrichtung des Schwimmkörpers und des Aufbaus gegenüber dem Fundament (**9**) zu ermöglichen, von denen zumindest einer in Vertikalrichtung verfahrbar an dem Aufbau (**3, 4, 5, 6**) gelagert ist, wobei zumindest zwei Lenker (**7, 8**) in unterschiedlichen Höhen an dem Aufbau (**3, 4, 5, 6**) befestigt sind und einen Drucklenker (**8**) und einen Zuglenker (**7**) ausbilden.
2. Windkraftanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Querschnitt der Masten (**3**) klappsymmetrisch ausgebildet ist und die Klappachse parallel zu der Drehachse des Rotors (**4**) verläuft oder die Achsen einander überdecken.
3. Windkraftanlage nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwimmkörper (**2**) ein Zentralrohr (**23**) aufweist, das von einer elliptischen Hülle (**24**) unter Ausbildung eines Zwischenraumes (**25**) umgeben ist.
4. Windkraftanlage nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Zwischenraum (**25**) mit einem Schaumwerkstoff gefüllt ist.
5. Windkraftanlage nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Zentralrohr (**23**) flutbar ausgebildet ist.
6. Windkraftanlage nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwimmkörper (**2**) zwei winkelig zueinander angeordnete Schenkel (**21, 22**) aufweist, an denen die Masten (**3**) mit den Rotoren (**4**) angeordnet sind.
7. Windkraftanlage nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Rotoren (**4**) räumlich versetzt angeordnet sind.
8. Windkraftanlage nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Masten (**3**) durch Streben (**6**) miteinander verbunden sind.
9. Windkraftanlage nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Streben (**6**) eine tropfenförmige Querschnittskontur aufweisen.
10. Windkraftanlage nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an dem Aufbau (**3, 4, 5, 6**) Verstelleinrichtungen für den Lenker (**7**) angeordnet sind, die mit Sensoren an der Windkraftanlage gekoppelt sind und über eine Steuerung einen automatischen Wankausgleich ausführen.
11. Windkraftanlage nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die

Lenker (7, 8) über einen Drehkranz (91) an dem Fundament (9) befestigt sind.

12. Windkraftanlage nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Fundament (9) schwimmfähig und flutbar ausgebildet ist.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

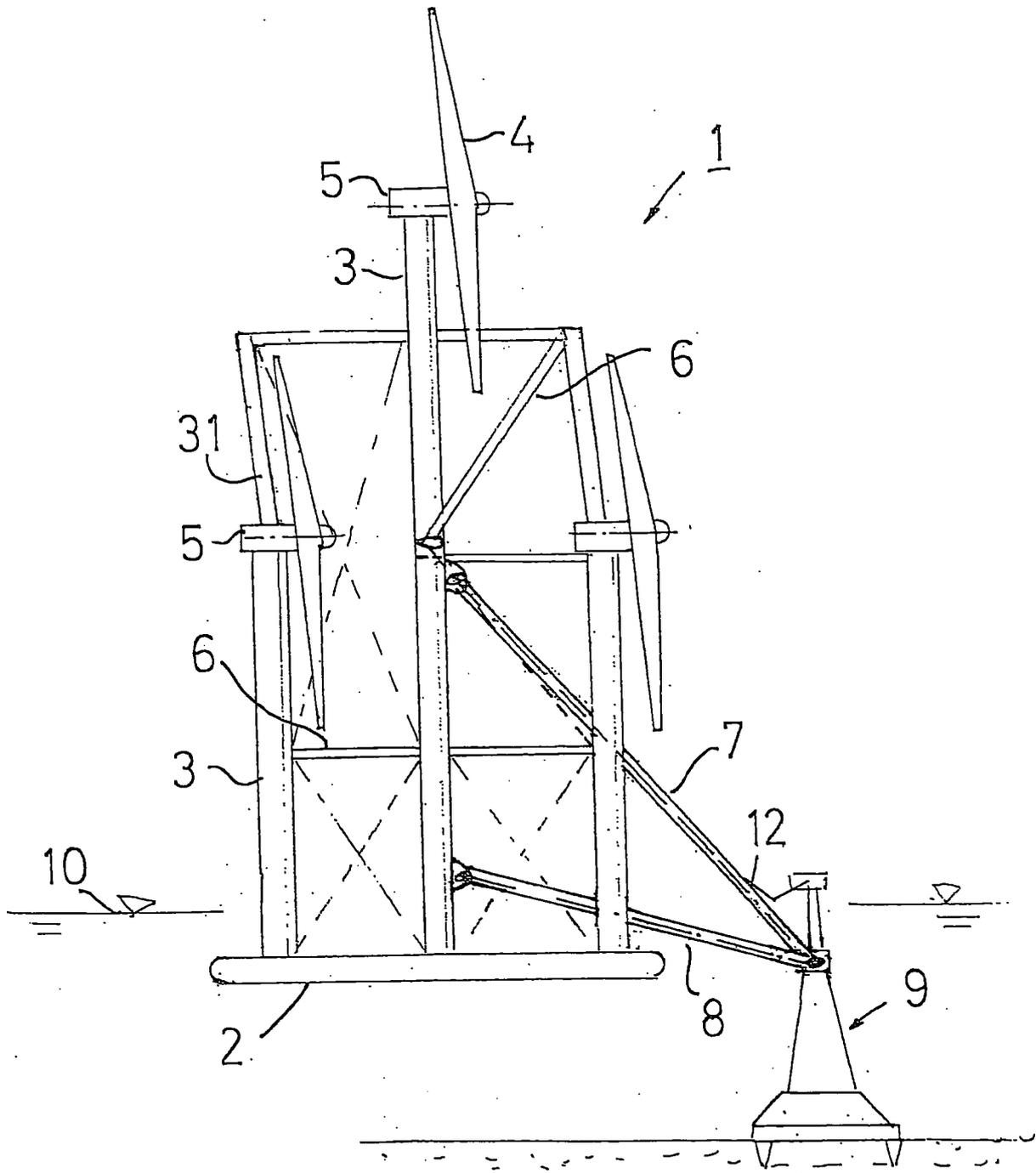


Fig.1

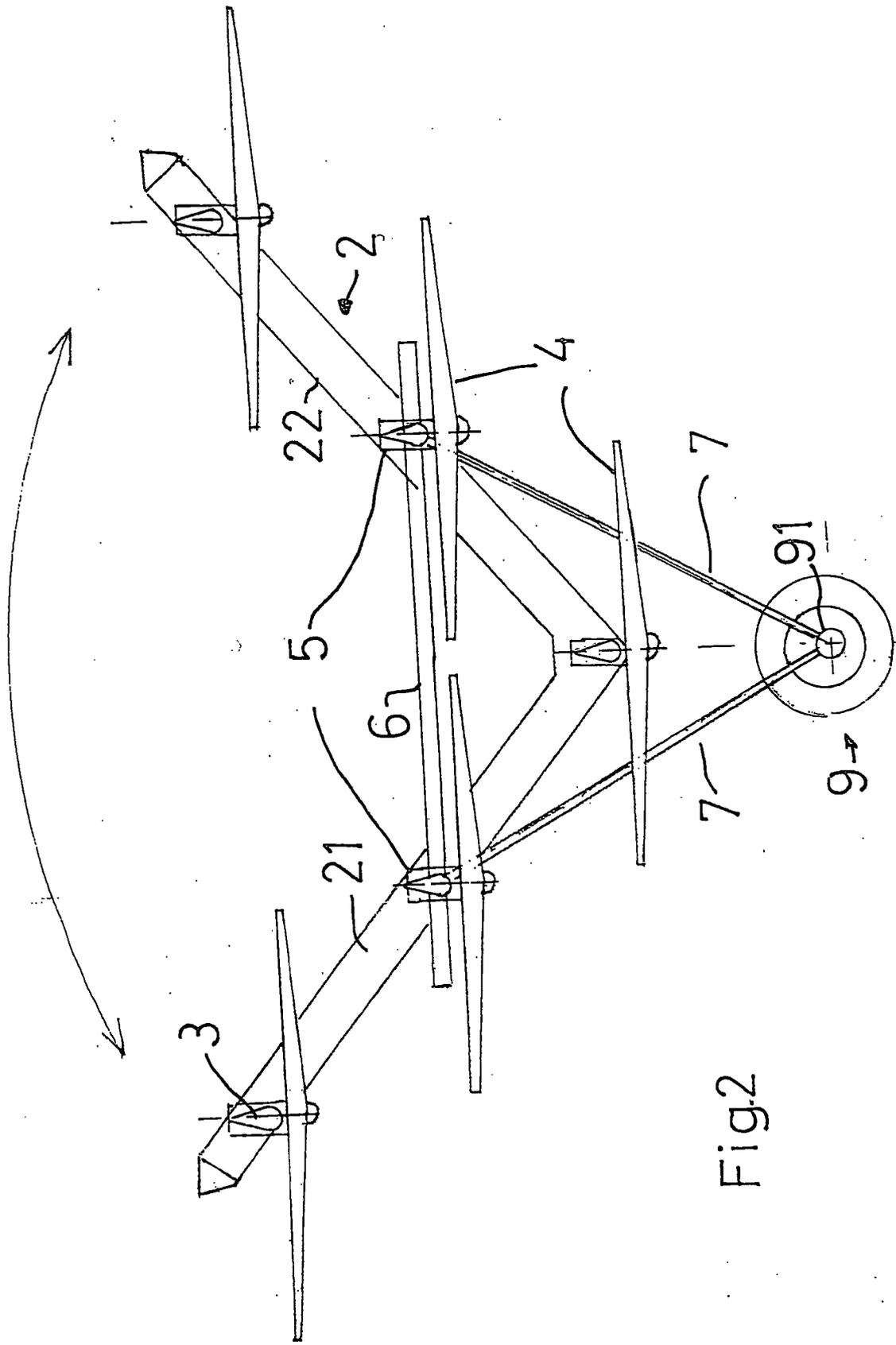
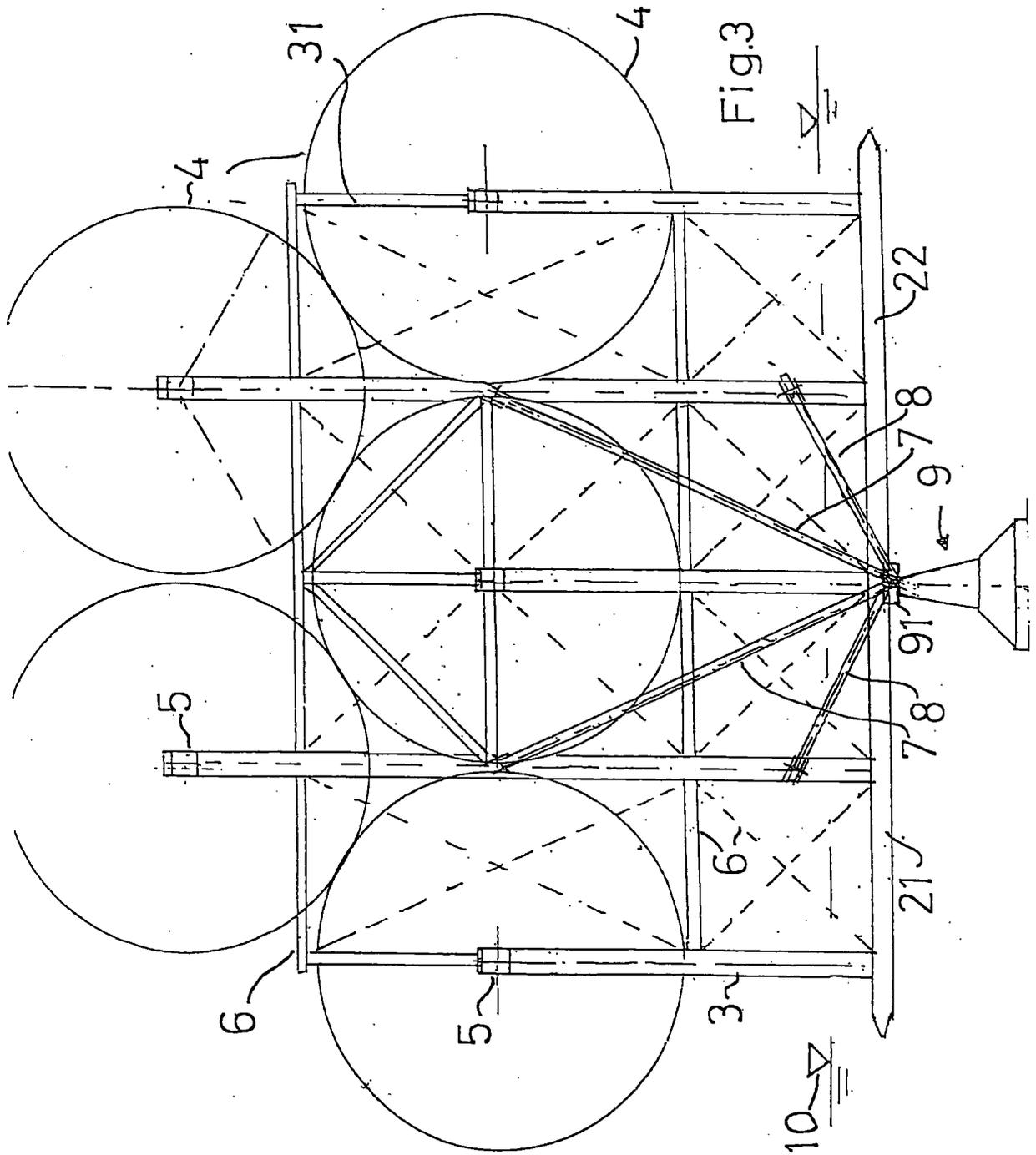


Fig.2



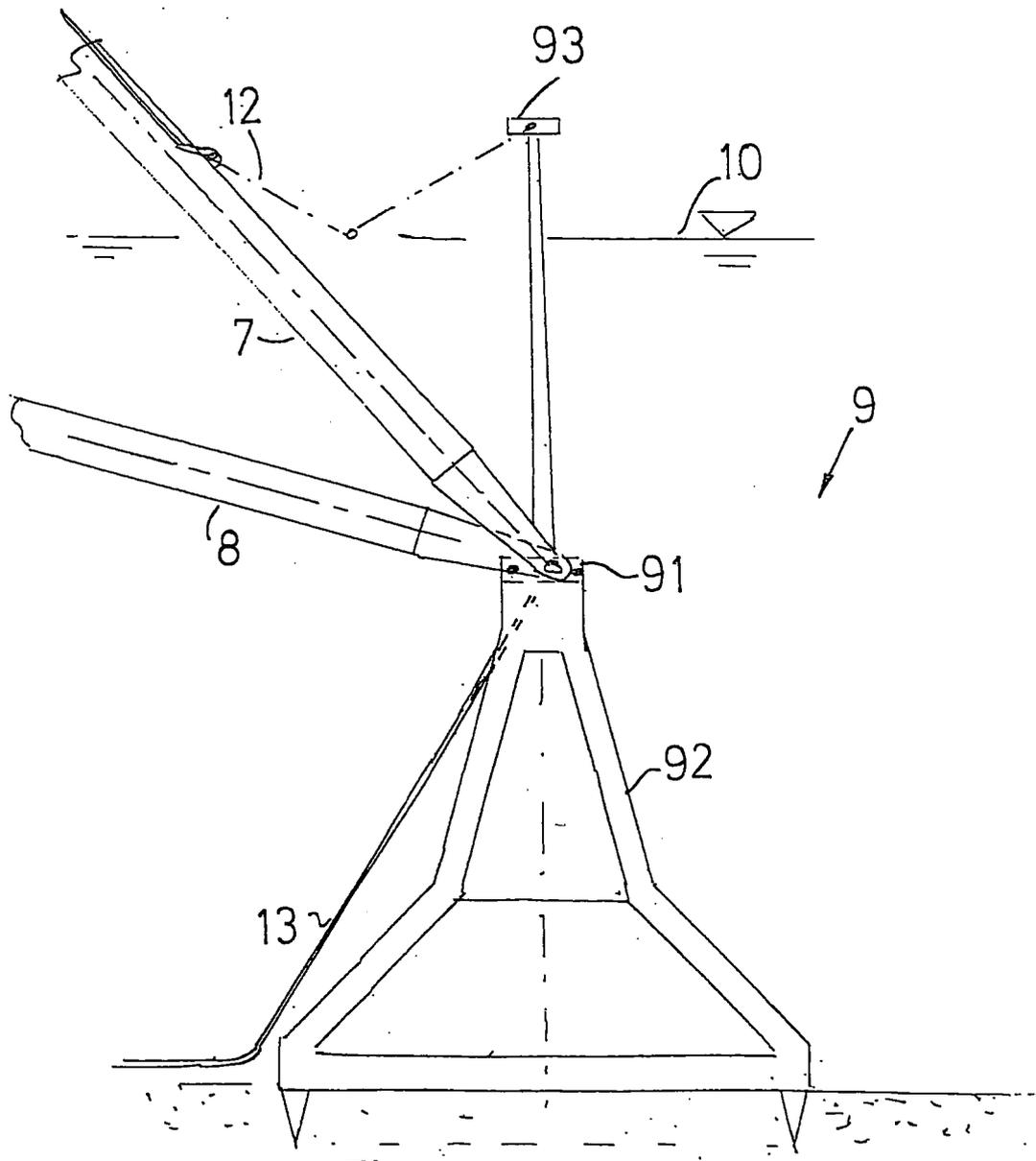
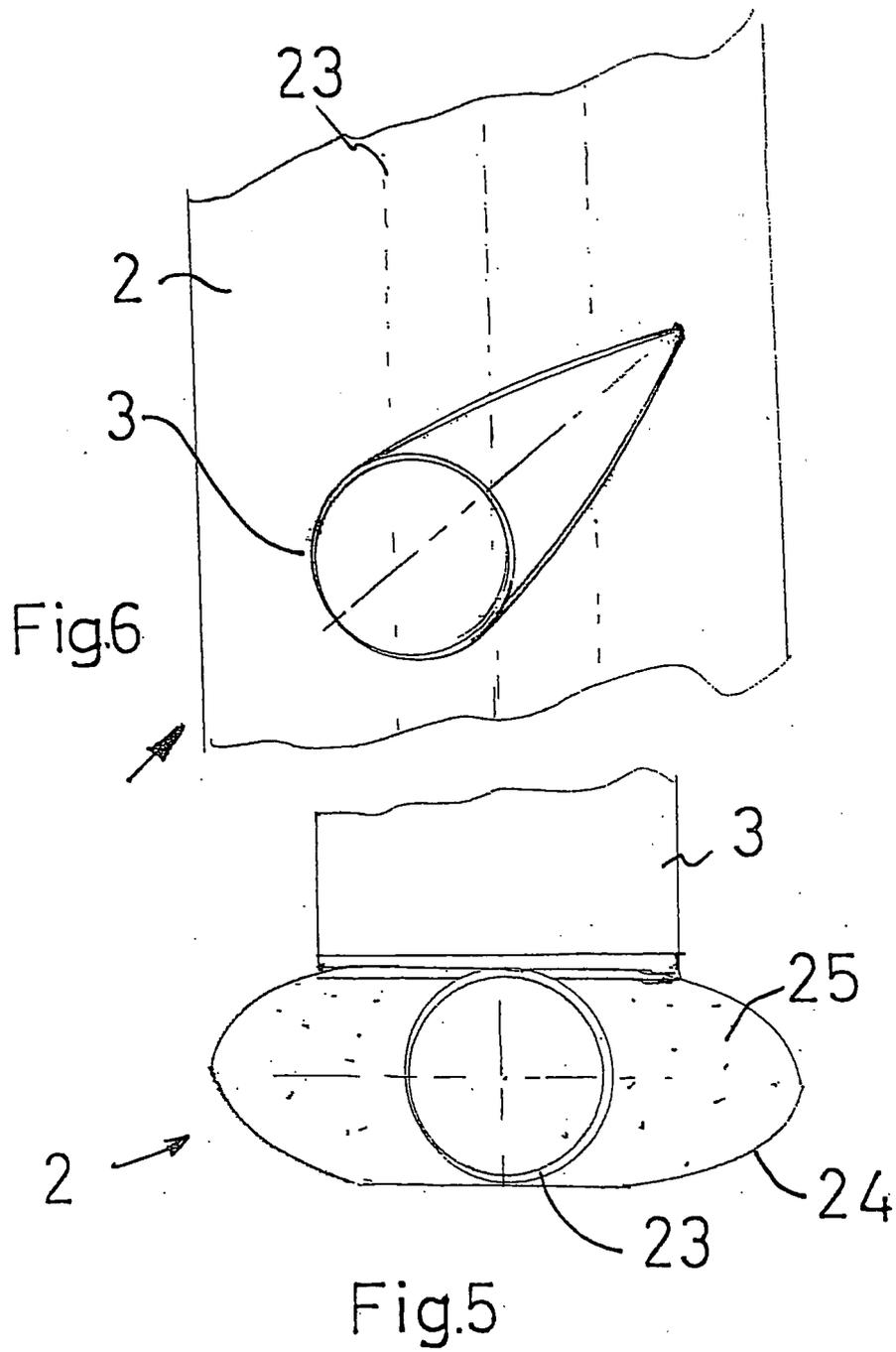


Fig.4



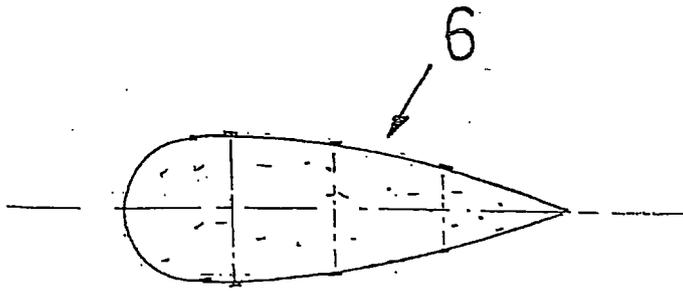


Fig.8

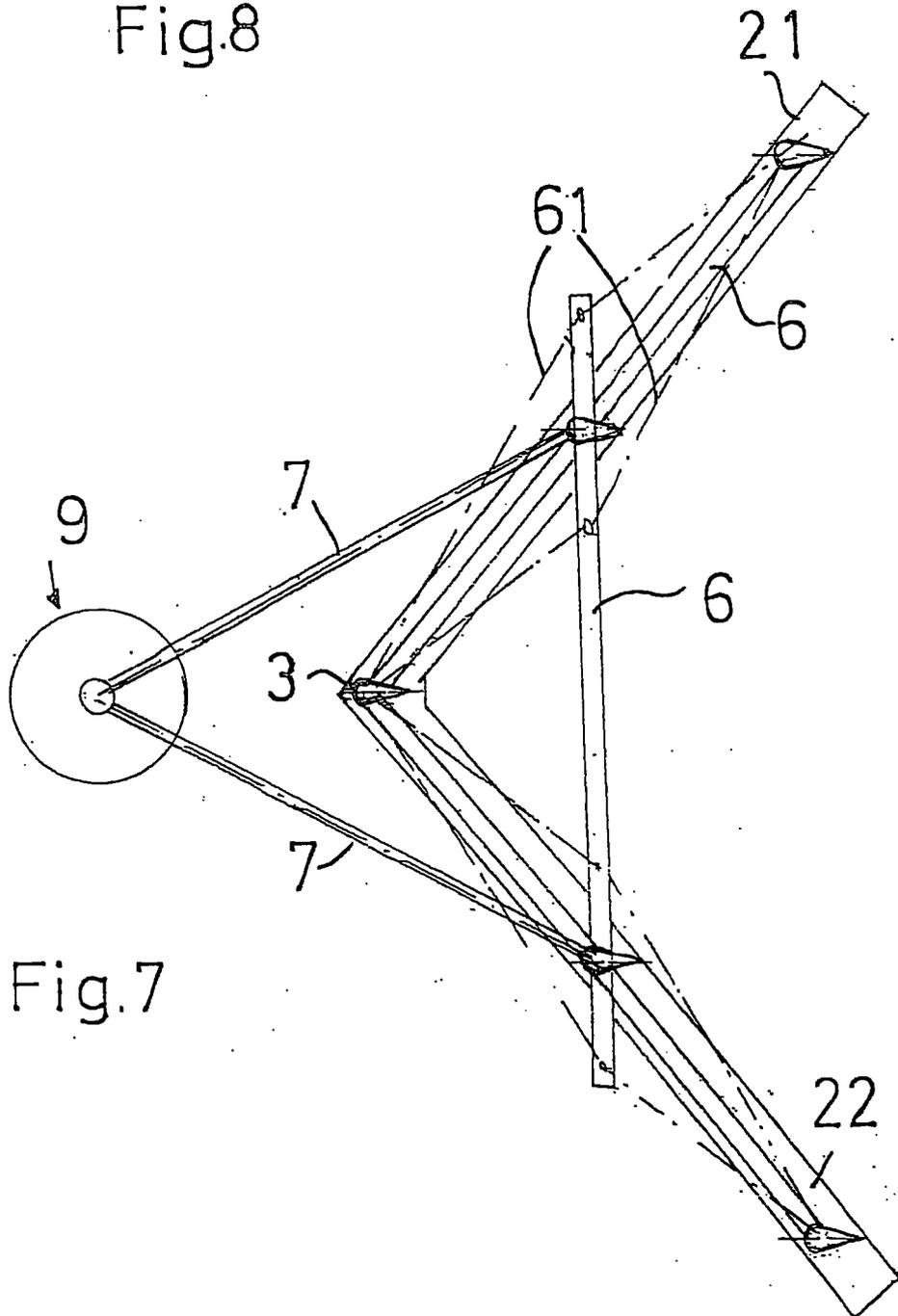


Fig.7

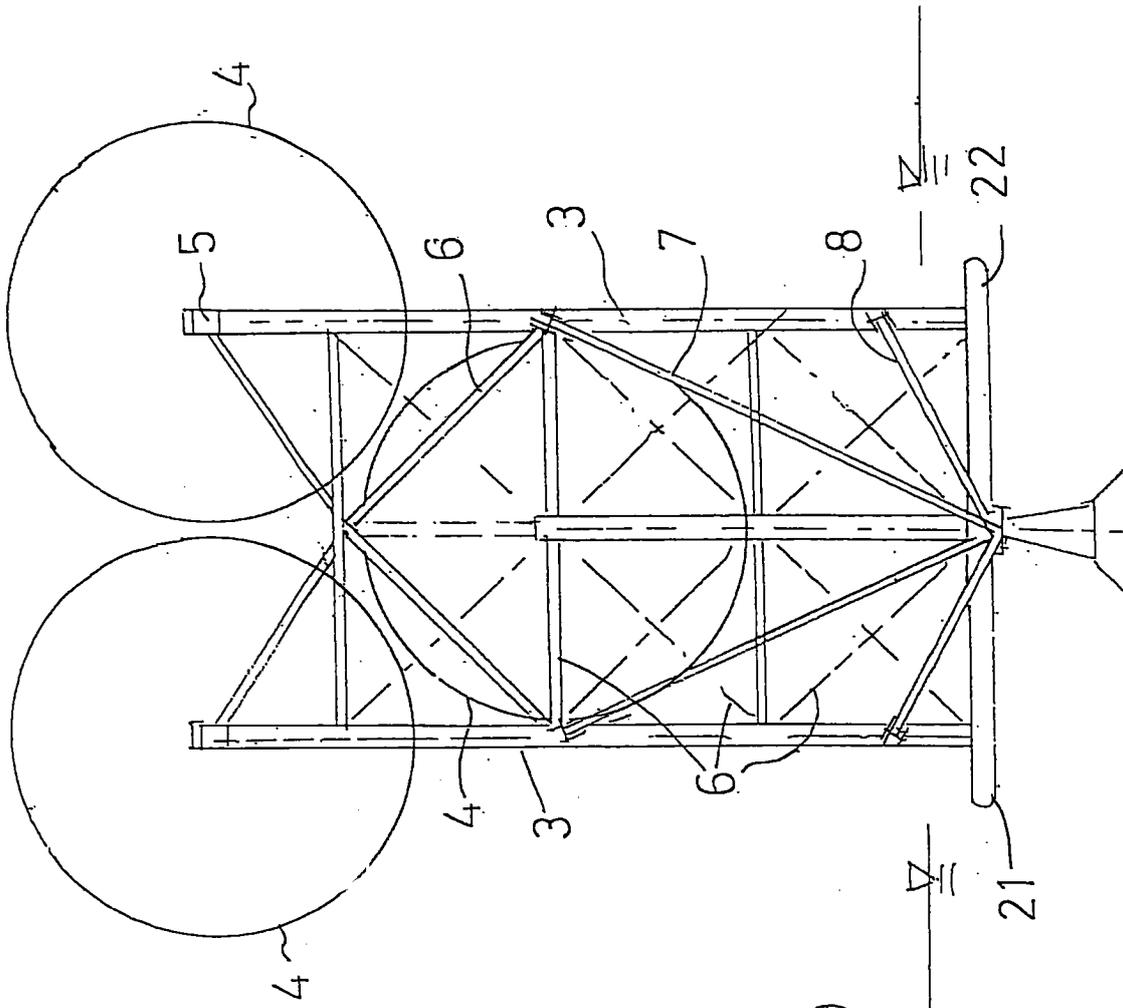


Fig.9

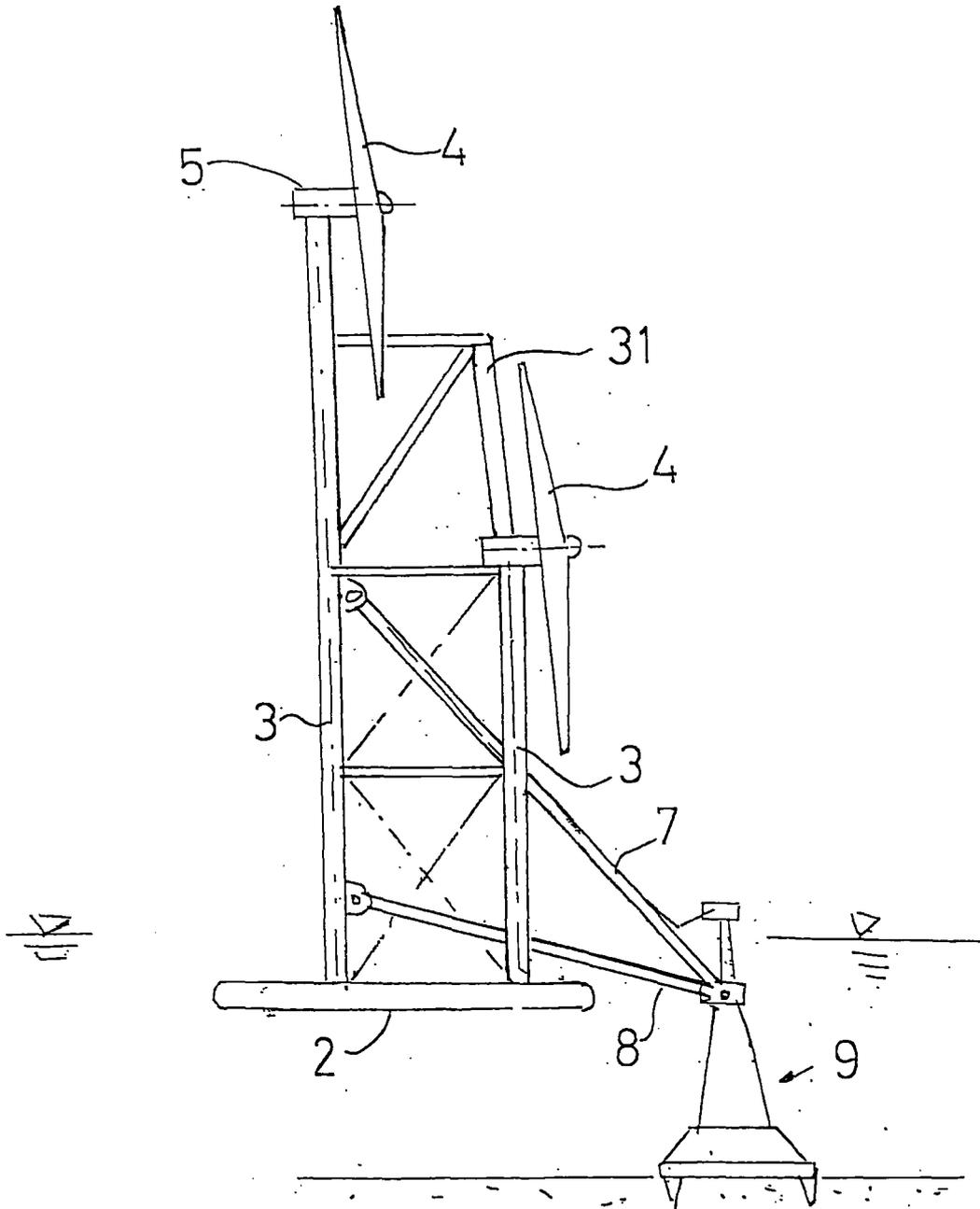


Fig.10

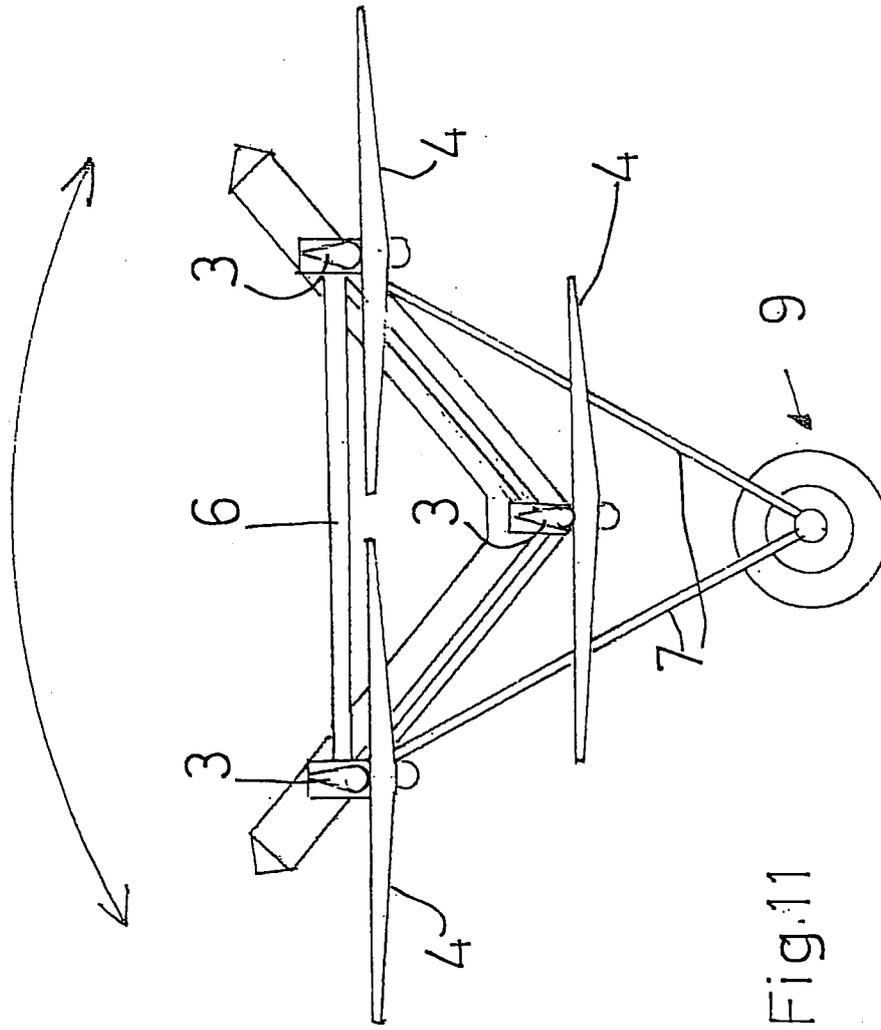


Fig.11