

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 010 438**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.07.2019 PCT/EP2019/069351**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.01.2020 WO20016351**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2019 E 19742352 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2024 EP 3824176**

54 Título: **Pala de rotor para una instalación de energía eólica e instalación de energía eólica**

30 Prioridad:

18.07.2018 DE 102018117398

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

03.04.2025

73 Titular/es:

**WOBBEN PROPERTIES GMBH (100.00%)
Borsigstraße 26
26607 Aurich, DE**

72 Inventor/es:

**MESSING, RALF y
STEMBERG, JOCHEN**

74 Agente/Representante:

ERVITI ARBAIZA, Blanca María

ES 3 010 438 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Pala de rotor para una instalación de energía eólica e instalación de energía eólica

5 La presente invención se refiere a una pala de rotor para una instalación de energía eólica. La presente invención también se refiere a una instalación de energía eólica y a un procedimiento para optimizar una instalación de energía eólica.

10 Las palas de rotor para un rotor de una instalación de energía eólica son generalmente conocidas. Estas palas de rotor tienen un perfil (perfil de sección transversal) que tiene en cuenta las especiales exigencias aerodinámicas.

15 Para influir en las propiedades aerodinámicas de las palas de rotor, es conocido prever generadores de vórtices en el perfil de sección transversal de las palas del rotor, que comprenden varios elementos de remolino que discurren perpendicularmente a la superficie. Los generadores de vórtice, también conocidos como generadores de vórtices, se utilizan para crear regiones locales de flujos de aire turbulentos sobre la superficie de la pala de rotor para aumentar la resistencia a la separación del flujo. Para ello, los generadores de vórtices hacen girar el flujo cerca de la pared de la pala de rotor, con lo que el intercambio de impulso entre las capas de flujo cercanas a la pared y las alejadas de ella aumenta significativamente y las velocidades de flujo en la capa límite cerca de la pared aumentan. Debido al aumento de las velocidades cerca de la pared, el flujo es capaz de superar los aumentos de presión en una distancia más larga sobre la superficie de la pala de rotor.

25 Una pala de rotor y una instalación de energía eólica del tipo mencionado anteriormente se conocen por el documento EP 3 309 388 A1. El documento EP 3 309 388 A1 describe una pala de rotor con un lado de succión y un lado de presión para una instalación de energía eólica, que comprende una raíz de pala de rotor de una región de buje para fijar la pala de rotor con un buje de rotor, y una punta de pala de rotor dispuesta en un lado de una región de punta alejada de la raíz de pala de rotor. La pala de rotor presenta un perfil de sección transversal, en el que están dispuestos varios generadores de vórtices idénticos uno al lado del otro, en tramos, en la dirección longitudinal de la pala de rotor. Los generadores de vórtices comprenden elementos de remolino dispuestos uno al lado del otro por pares con una longitud y una altura. Los elementos de remolino están orientados respectivamente formando un ángulo con respecto a una dirección de flujo principal de la pala de rotor, teniendo los elementos de remolino dispuestos en el mismo ángulo una separación lateral constante entre sí.

35 Palas de rotor para aerogeneradores con generadores de vórtice o elementos de remolino también se conocen por los documentos US 2014/0328692 A1, US 2014/0328693 A1, US 9.869.297 B2 y WO 2010/033018 A2.

40 En tales secciones de pala con generadores de vórtices, la pala de rotor presenta normalmente ángulos de ataque límite claramente mayores, en los que se produce por primera vez una separación del flujo en el borde posterior, que en secciones de palas en las que se prescinde de generadores de vórtices. Debido a su modo de acción, los generadores de vórtice provocan inevitablemente una mayor resistencia de fricción en la superficie del perfil de la pala de rotor, es decir, el coeficiente de arrastre del perfil de la sección transversal aumenta significativamente y, con ello, la relación de deslizamiento, la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, puede incluso disminuir. El aumento del coeficiente de arrastre o la disminución de la relación de deslizamiento tienen un efecto perjudicial sobre el rendimiento del sistema. La influencia de la relación de deslizamiento o el coeficiente de arrastre en el rendimiento desde la raíz de pala de rotor hasta la punta de pala de rotor continúa aumentando. Cuanto más lejos esté uno en la pala de rotor desde la raíz de pala de rotor hacia la punta del rotor, más importantes serán los coeficientes de arrastre bajos o los coeficientes de deslizamiento altos para la potencia y el rendimiento del sistema. Además, los generadores de vórtices pueden contribuir a aumentar las emisiones de ruido.

55 La invención se basa en el objetivo de eliminar o al menos reducir el problema mencionado anteriormente, en particular prever una pala de rotor que se caracterice absorber grandes fluctuaciones en el ángulo de ataque en la región de buje y por altos coeficientes de deslizamiento en la región de punta.

En lo que respecta a la pala de rotor, la tarea se soluciona mediante una pala de rotor según la reivindicación 1. La invención también conduce a una instalación de energía eólica según la reivindicación 8 y a un procedimiento para optimizar una instalación de energía eólica según la reivindicación 9.

60 Según la reivindicación 1, para una instalación de energía eólica está prevista una pala de rotor con un lado de succión y un lado de presión, donde la pala de rotor una raíz de pala de rotor de una región de buje para fijar la pala de rotor a un buje de rotor, una punta de pala de rotor que está dispuesta en un lado de una región de punta alejada de la raíz de pala de rotor, al menos un generador de vórtices, que está dispuesto entre la raíz

de pala de rotor y la punta de pala de rotor, donde el al menos un generador de vórtice comprende elementos de remolino con una longitud y una altura que están dispuestos uno al lado del en una dirección longitudinal de la pala de rotor, que están orientados en cada caso con un ángulo con respecto a una dirección de flujo principal de la pala de rotor. Los elementos de remolino tienen una separación lateral entre sí en la dirección longitudinal de la pala de rotor. En función de una distancia respectiva de la disposición de los elementos de remolino respecto de la raíz de pala de rotor, se lleva a cabo una variación de la geometría de los elementos de remolino.

La invención se basa en la idea de que una instalación de energía eólica no puede operarse en un punto de operación estacionario, sino que está sujeta a diferentes influencias que conducen a un cambio continuo en el punto de operación aerodinámico. Los ángulos de ataque que existen a lo largo del perfil de la sección transversal de la pala de rotor varían constantemente durante la operación de la instalación de energía eólica. En particular, parámetros como la turbulencia de flujo incidente, el corte horizontal y vertical de la capa límite del suelo y la densidad del aire influyen en la distribución del ángulo de ataque. Los efectos de los cambios en estos parámetros son desiguales a lo largo de la pala de rotor. Las pequeñas turbulencias de flujo incidente y los cambios en la densidad del aire, por ejemplo, provocan una reducción del coeficiente de alta velocidad, lo que a su vez hace que el ángulo de ataque en la región de buje varíe más que en la región de punta.

Para aumentar el esfuerzo y la complejidad de la medida que influye en el flujo en comparación con el estado de la técnica cuando se utilizan medidas de flujo pasivas, como por ejemplo la disposición de generadores de vórtices, se requiere una variación de la geometría de los elementos de remolino dependiendo de la distancia respectiva de la disposición de los elementos de remolino respecto a la raíz de pala del rotor. La adaptación de la geometría de los elementos de remolino en función de su distancia respecto a la raíz de pala de rotor permite una adaptación ventajosa a las condiciones límite de la pala de rotor que predominan en las secciones del rotor entre la región de buje y la región de punta. Modificando la geometría de los elementos de remolino en función de la distancia se pueden representar diferentes coeficientes de sustentación y relaciones de deslizamiento. Estas propiedades de los coeficientes de perfil, que se consiguen en particular modificando las dimensiones de los elementos de remolino del generador de vórtice, tienen exactamente en cuenta las necesidades de la pala de rotor.

Según la invención, los elementos de remolino están orientados por pares, cada uno con un ángulo sustancialmente opuesto a la dirección de flujo principal de la pala de rotor, donde la separación lateral se determina entre elementos de remolino dispuestos uno al lado del otro sustancialmente con el mismo ángulo. La disposición por pares de elementos de remolino garantiza una generación de vórtices especialmente eficaz, en particular que se generen vórtices uno al lado del otro que giran en sentido contrario.

Preferiblemente, la variación de la geometría de los elementos de remolino puede resultar de una relación de la separación lateral respecto a la longitud del elemento de remolino, donde la relación se puede determinar como una función de la distancia. Al aumentar la relación con una distancia creciente respecto de la raíz de rotor, en este caso reduciendo la longitud o aumentando la distancia entre elementos de remolino orientados de manera idéntica, se reduce el ángulo de ataque máximo alcanzable a favor de relaciones de deslizamiento mejoradas. Con una pequeña relación de la separación lateral respecto a la longitud del elemento de remolino se permiten ángulos de ataque máximos elevados en la región de buje.

Además, la variación de la geometría de los elementos de remolino puede deberse a una relación de la separación lateral respecto a la altura, que también puede determinarse como una función de la distancia. En consecuencia, cambiando la relación dependiendo de la distancia a la raíz del rotor, aquí cambiando la altura de los elementos de remolino o variando la distancia entre elementos de remolino orientados de manera idéntica, se puede ajustar el ángulo de ataque máximo alcanzable a favor de relaciones de deslizamiento mejoradas.

La relación relativamente pequeña de la separación lateral respecto a la longitud en la región de buje permite cubrir las grandes variaciones del ángulo de ataque presentes allí durante la operación de la instalación de energía eólica con separaciones de flujo reducidas. Los coeficientes deslizantes desfavorables desempeñan un papel menor en el rendimiento del sistema. Además, es aceptable una reducción del ángulo de ataque máximo permitido, como también es el caso de un aumento de la relación de la separación lateral respecto a la longitud o altura, ya que allí también disminuyen las variaciones del ángulo de ataque operativo, aunque esto luego se tiene en cuenta por la influencia cada vez mayor de las altas relaciones de deslizamiento en el rendimiento.

Según la invención, la variación de la geometría de los elementos de remolino resulta de una relación de la separación lateral respecto al ángulo con respecto a la dirección de flujo principal de la pala de rotor, que, como una función de la distancia, aumenta con distancias crecientes.

Las diversas formas de variación de la geometría se pueden proporcionar individualmente, independientemente o en combinación entre sí.

5 En particular, la relación de la separación lateral respecto a la longitud y/o de la separación lateral respecto a la altura de los elementos de remolino puede aumentar con distancias crecientes.

Preferiblemente, los elementos de remolino pueden tener un perfil de forma sustancialmente triangular o en forma de aleta.

10 Preferiblemente, la longitud y/o la altura y/o el ángulo de instalación de los elementos de remolino pueden ser esencialmente constantes. La variación geométrica puede realizarse entonces preferentemente mediante la variación de las distancias laterales entre elementos de remolino adyacentes. Esto hace posible utilizar sólo un único tipo de elemento de remolino y aun así conseguir las ventajas según la invención. Además, se consigue una reducción de errores y montajes incorrectos en la obra debido a la mezcla de elementos de remolino, así
15 como ventajas en la producción, ya que para la fabricación de los elementos de remolino sólo es necesario prever una sola herramienta, por ejemplo, mediante moldeo por inyección. De manera especialmente preferente, como se ha mencionado, los elementos de remolino están previstos en pares con una base común, por ejemplo, de una sola pieza como pieza moldeada por inyección.

20 De manera especialmente preferida, los elementos de remolino son idénticos, especialmente en pares, es decir, tienen la misma longitud, altura y ángulo de instalación a lo largo de la longitud de la pala de rotor. También son imaginables varios tipos de elementos de remolino, aumentando la distancia entre los elementos de remolino a medida que aumenta la distancia a la raíz de pala de rotor.

25 Preferiblemente, la variación de la geometría de los elementos de remolino puede resultar de una relación de la separación lateral respecto a un ángulo interno de una punta del elemento de remolino separada de una superficie de la pala de rotor, la cual se puede determinar como una función de la distancia. El ángulo interior en la punta proporciona información sobre la altura, es decir, la extensión perpendicular a la superficie de la pala de rotor, del elemento de remolino en relación con su longitud, es decir, la extensión en el plano de la
30 superficie de la pala de rotor, en particular en el caso de un perfil de forma sustancialmente triangular o en forma de aleta.

Además, el al menos un generador de vórtices comprende al menos una placa base, sobre la que están dispuestos los elementos de remolino por pares. De este modo se pueden producir generadores de vórtices
35 para diferentes secciones de rotor, cuyos elementos de remolino presentan una relación de la separación lateral respecto a la longitud y/o de la separación lateral respecto a la altura adaptada a las distintas secciones de rotor.

40 No se reivindica un generador de vórtices para una pala de rotor de una instalación de energía eólica, donde el generador de vórtices comprende una placa base con un borde delantero y un borde trasero, donde el borde delantero apunta en la orientación prevista en la pala de rotor en la dirección del borde delantero y el borde trasero apunta en la orientación prevista en la pala de rotor en la dirección del borde trasero y de este modo se determina una orientación de la placa base desde la raíz de pala de rotor hasta la punta de pala de rotor, estando dispuestos varios elemento de remolino en la placa base. Dependiendo de la distancia respectiva de
45 la disposición de los elementos de remolino respecto a la raíz de pala de rotor, se produce una variación de la geometría de los elementos de remolino sobre la placa base.

Los elementos de remolino están dispuestos preferentemente por pares, estando dispuestos de forma especialmente preferente varios pares sobre una placa base.

50 La dirección de la placa base o del borde delantero y del borde trasero de la misma no es necesariamente completamente paralela a una dirección longitudinal de la pala de rotor. Por ejemplo, la placa base también puede estar configurada paralela al borde trasero de la pala de rotor o inclinada en un ángulo determinado, por ejemplo, hasta 20°, preferiblemente menos de 10°, con respecto a la dirección longitudinal y/o al borde trasero.

55 Según la invención también se propone una instalación de energía eólica que esté equipada con una o varias palas de rotor según al menos una de las formas de realización descritas anteriormente. En particular se propone una instalación de energía eólica con tres palas de rotor, cada una de las cuales está configurada según una de las formas de realización anteriores.

60 Finalmente, según la invención, también se propone un procedimiento para optimizar una instalación de energía eólica según la reivindicación 9, donde la instalación de energía eólica tiene una pala de rotor con un lado de succión y un lado de presión para una instalación de energía eólica y donde la pala de rotor comprende: una

raíz de pala de rotor de una región de buje para fijar la pala de rotor a un buje de rotor, una punta de pala de rotor, que está dispuesta en un lado alejado de la raíz de pala de rotor de una región de punta, al menos un generador de vórtices, que está dispuesto entre la raíz de pala de rotor y la punta de pala de rotor. El al menos un generador de vórtices comprende elementos de remolino con una longitud y una altura que están dispuestos uno al lado del otro en la dirección longitudinal de la pala de rotor, y están orientados en cada caso en un ángulo con respecto a una dirección de flujo principal de la pala de rotor, donde los elementos de remolino tienen una separación lateral entre sí. En función de una distancia respectiva de la disposición de los elementos de remolino respecto a la raíz de pala de rotor, se lleva a cabo una variación de la geometría de los elementos de remolino.

Más ejemplos y ventajas se describen a continuación con referencia a las figuras adjuntas. Aquí se muestra en:

Fig. 1 una representación esquemática de una instalación de energía eólica;

Fig. 2 una representación esquemática de una pala de rotor;

Fig. 3 una representación esquemática de un generador de vórtices;

Fig. 4 dos curvas esquemáticas de un coeficiente de sustentación sobre un ángulo de ataque para un perfil con generadores de vórtice;

Fig. 5 dos curvas esquemáticas de una relación de deslizamiento sobre el ángulo de ataque para un perfil con generadores de vórtice; y

Fig. 6 una representación esquemática de una pala de rotor.

La figura 1 muestra una instalación de energía eólica 100 con una torre 102, que está construida sobre una base 103. En el extremo superior, opuesto a la base 103, se encuentra una góndola 104 (casa de máquinas) con un rotor 105, que comprende un buje de rotor 106 y palas de rotor 1 dispuestas en él, que se describen con más detalle con referencia a las otras figuras. El rotor 105 está acoplado a un generador eléctrico dentro de la góndola 104 para convertir el trabajo mecánico en energía eléctrica. La góndola 104 está montada de forma giratoria en la torre 102, cuya base 103 proporciona la estabilidad necesaria.

La figura 2 muestra una representación esquemática de una pala de rotor 1 de una realización. La pala de rotor 1 tiene en un extremo la raíz de pala de rotor 2 y en el extremo opuesto a esta una punta de pala de rotor 3. En la raíz de pala de rotor 2, o generalmente en la zona cercana a la raíz de pala de rotor 2, la pala de rotor 1 tiene una anchura de perfil grande. Sin embargo, en la punta de rotor 3 la anchura del perfil es mucho menor. La anchura del perfil disminuye considerablemente, empezando por la raíz de pala de rotor 2, que también puede denominarse raíz de perfil 2, en este ejemplo tras un aumento de la superficie interior de la pala, hasta una zona central 4. En la zona central 4 puede estar previsto un punto de separación (aquí no representado). Desde la zona central 4 hasta la punta de pala de rotor 3, la anchura del perfil es casi constante o la disminución de la anchura del perfil se reduce significativamente. La pala de rotor 1 tiene, por ejemplo, un lado de succión 7 sustancialmente convexo, un lado de presión, por ejemplo, sustancialmente cóncavo, un borde anterior o de ataque 5 y un borde posterior o de salida 6. El lado de presión y/o el lado de succión también pueden ser rectos o tener otra forma. La referencia 8 indica una longitud total de la pala de rotor 1.

Además, la ilustración de la Fig. 2 muestra generadores de vórtices 9 dispuestos en el lado de succión 7 de la pala de rotor 1, que también se denominan generadores de turbulencias. Los generadores de vórtices 9 se componen de elementos de remolino 10, 11 dispuestos por parejas uno al lado del otro. Los respectivos elementos de remolino 10, 11 se extienden en secciones entre el borde anterior 5 y el borde posterior 6 y están orientados cada uno de ellos formando un ángulo con respecto a la dirección de flujo principal SR de la pala de rotor 1 que es rodeada por el flujo, de modo que los pares de los elementos de remolino 10, 11 se extienden desde el borde anterior 5 hasta el borde posterior 6 y presentan un recorrido ensanchado.

En este ejemplo, los elementos de remolino 10, 11 se extienden perpendicularmente a la superficie de la pala de rotor 1, donde también son posibles ángulos distintos de los ángulos rectos entre los elementos de remolino 10, 11 y la superficie de la pala de rotor 1. Mientras que en el ejemplo los generadores de vórtices 9 se muestran dispuestos en el lado de succión 7, alternativa o adicionalmente son posibles generadores de vórtices 9 en el lado de presión.

Los elementos de remolino 10, 11 están dispuestos a una distancia R del buje de rotor o de la raíz de pala de rotor 2. Una zona o región de buje I de la pala de rotor 1 se extiende desde la raíz de pala de rotor 2

esencialmente hasta la zona media 4. Una zona o región de punta II de la pala de rotor 1 se extiende esencialmente desde la zona media 4 hasta la punta de pala de rotor 3.

La Fig. 3 muestra una representación esquemática de una realización de un generador de vórtices 9 en una vista en perspectiva. El generador de vórtice 9 puede tener al menos una placa base 13, que se utiliza para fijar el generador de vórtice 9 a la superficie de la pala de rotor 1. La placa base 13 tiene un borde delantero 14 y un borde trasero 15. Los respectivos elementos de remolino 10, 11, que en este ejemplo tienen esencialmente forma triangular o de aleta, discurren entre el borde delantero 14, que mira hacia el borde anterior 5 cuando está montado en la pala de rotor 1, y el borde trasero 15, que mira hacia el borde posterior 6.

Los elementos de remolino 10, 11 tienen cada uno una altura H, donde el perfil de altura aumenta hacia el borde trasero 15 de la placa base 13 hasta un valor máximo, y una longitud L, que es la extensión del respectivo elemento de remolino 10, 11, entre el borde delantero 14 y el borde trasero 15 o en el plano de las palas del rotor.

Los elementos de remolino 10, 11, dispuestos por pares uno al lado del otro, están dispuestos de forma inclinada con un ángulo respecto a la dirección principal del flujo SR, donde, empezando desde el borde delantero 14, se establece hasta el borde trasero 15 un perfil de los elementos de remolino adyacentes que se expande. Dos elementos de remolino 10, 11 dispuestos uno al lado del otro tienen una orientación sustancialmente simétrica con respecto a la dirección de flujo principal SR, es decir, un elemento de remolino 10 de los elementos de remolino 10, 11 dispuestos por pares apunta hacia afuera en la dirección longitudinal de la pala de rotor y el otro elemento de remolino 11 apunta hacia el interior en la dirección longitudinal de la pala de rotor. Una separación lateral entre dos puntas de dos elementos de remolino 10 y 11 alineados esencialmente en la misma dirección está marcada con un signo de referencia D o D₁.

Los generadores de vórtices constituyen una medida pasiva para influir en el flujo, ya que los elementos de remolino de los generadores de vórtice, que están dispuestos a distancias laterales iguales, provocan generalmente turbulencias en el flujo de la capa límite, ya que los elementos de remolino están dispuestos inclinados en ángulo con respecto a la dirección principal del flujo. Los generadores de vórtice hacen girar el flujo cerca de la pared de la pala de rotor, como resultado de lo cual aumenta considerablemente el intercambio de impulso entre las capas de flujo cercanas a la pared y las alejadas de ella y aumentan las velocidades de flujo en la capa límite cerca de la pared. Debido al aumento de las velocidades del flujo cerca de la pared, el flujo es capaz de superar los aumentos de presión en una distancia más larga sobre la superficie de la pala de rotor. Esto aumenta la resistencia a la separación del flujo.

Una instalación de energía eólica no opera en un punto de operación estacionario, sino que está constantemente sometida a diferentes influencias, que provocan que el punto de operación aerodinámico de la pala de rotor 1 cambie continuamente. El ángulo de ataque α , que está presente por todo el radio de la pala de la pala de rotor 1, varía continuamente durante la operación de la instalación. En particular, parámetros como la turbulencia de flujo incidente, el corte o cizallamiento horizontal y vertical de la capa límite del suelo y la densidad del aire, por citar sólo los parámetros más importantes, influyen en la distribución del ángulo de ataque sobre la pala de rotor 1. Pequeñas turbulencias de flujo incidente o cambios en la densidad del aire provocan una reducción del coeficiente de alta velocidad, lo que conduce a que el ángulo de ataque α en la zona interior, es decir, desde la región de buje I hasta la zona central 4, de la pala de rotor 1 varíe más que en la zona exterior, es decir, desde la zona central 4 hasta la región de punta II de la pala de rotor 1. Por lo tanto, en la zona interior de la pala de rotor 1 están previstas mayores reservas para el ángulo de ataque α durante la operación que en la zona exterior de la pala de rotor 1. Por consiguiente, los generadores de vórtices 9 se utilizan especialmente en la zona interior de la pala de rotor 1. Al aumentar la resistencia a la separación del flujo, los generadores de vórtice 9 amplían el área de uso del perfil de la pala de rotor 1, la denominada rama lineal, en la que existe una relación proporcional entre sustentación y ángulo de ataque.

Además, la influencia de la relación de deslizamiento ε o coeficiente de arrastre c_w sobre la potencia desde la raíz de pala de rotor 2 hasta la punta de rotor 3 de la pala de rotor 1 continúa aumentando. A medida que aumenta la distancia desde la raíz de pala de rotor 2, es esencial para la potencia y el rendimiento de la instalación lograr coeficientes de arrastre c_w bajos o relaciones de deslizamiento ε altas.

Para el funcionamiento seguro de una instalación de energía eólica deben absorberse en la zona interior de la pala de rotor 1 oscilaciones de ángulo de ataque elevadas, lo que puede garantizarse mediante palas del rotor 1 con los generadores de vórtices 9 dispuestos encima. La desventaja de las relaciones de deslizamiento ε reducidas cuando se utilizan generadores de vórtice 9 es aceptable en la zona interior de la pala de rotor 1, ya que la influencia de la relación de deslizamiento ε sobre el rendimiento de la instalación en la zona interior de la pala de rotor 1 es despreciable. Cuanto más lejos se encuentre uno en la pala de rotor 1, menor será el ángulo de ataque a cubrir y mayor será la influencia de la relación de deslizamiento ε sobre el rendimiento de

la instalación de energía eólica. Para tener en cuenta estas circunstancias, los elementos de remolino 10, 11 se dimensionan en función de la distancia R respectiva de la disposición de los elementos de remolino 10, 11 respecto a la raíz de pala de rotor 2. Esto significa que a medida que aumenta la distancia R respecto al buje de rotor o a la raíz de pala de rotor 2, se modifican las dimensiones geométricas altura H, longitud L y/o separación lateral D de los elementos de remolino 10, 11.

Se varía una relación V de la separación lateral D respecto a la altura H o de la separación lateral D respecto a la longitud L, donde la relación V de la separación lateral D respecto a la altura H o de la separación lateral D respecto a la longitud L aumenta con distancias R crecientes. En la región de buje de rotor 1 se selecciona una pequeña relación V de la separación lateral D respecto a la altura H o de la separación lateral D respecto a la longitud L, de modo que las grandes variaciones del ángulo de ataque presentes allí durante la operación de la instalación de energía eólica se puedan cubrir sin separaciones de flujo. Por otro lado, al aumentar la distancia R, es aceptable una reducción en el ángulo de ataque máximo permisible, como ocurre con un aumento en la relación V de la separación lateral D respecto a la altura H o de la separación lateral D respecto a la longitud L. Dado que las variaciones del ángulo de ataque operativo disminuyen al aumentar la distancia R al buje del rotor, esto puede tenerse en cuenta mediante la influencia gradualmente creciente de altas relaciones de deslizamiento sobre el rendimiento.

En una realización alternativa, el ángulo γ en el que se encuentran los elementos de remolino 10, 11 con respecto a la dirección de flujo principal SR, adicional, o alternativamente, varía al aumentar la distancia R desde el buje de rotor o la raíz de pala de rotor 2. En particular, se proporciona un ángulo menor con respecto a la dirección principal del flujo SR a medida que aumenta la distancia R.

Las figuras 4 y 5 muestran cada una dos curvas 16, 17 y 18, 19 del coeficiente de sustentación c_A y de la relación de deslizamiento ϵ sobre el ángulo de ataque α para una pala de rotor 1 provista de generadores de vórtice 9, en cada caso para dos relaciones V diferentes de la separación lateral D respecto a la altura H. Las curvas 16 y 18 se determinaron para una primera relación V de separación lateral D respecto a la altura H, mientras que las curvas 17 y 19 se determinaron para una segunda relación V de separación lateral D respecto a la altura H, donde la separación lateral D_1 es mayor que la separación lateral D.

A partir de las curvas 16 y 17 comparadas en la Fig. 4 se puede ver que el coeficiente de sustentación máximo c_A disminuye a medida que aumenta la relación V de la separación lateral D respecto a la altura H. Por otra parte, las curvas 18 y 19 comparadas en la figura 5 muestran que la relación de deslizamiento máxima alcanzable ϵ aumenta en un ángulo de ataque amplio. Si la relación V de la separación lateral D respecto a la altura H o H o la separación lateral D respecto a la longitud L de los elementos de remolino 10, 11 en la región de buje 1 de la pala de rotor 1 se elige pequeña, en esta sección de perfil de la pala de rotor 1 se permiten ángulos de ataque máximos elevados, lo cual, sin embargo, va acompañado de una relación de deslizamiento ϵ reducida. Si la relación de la separación lateral D respecto a la altura H o H o la separación lateral D respecto a la longitud L respecto a la punta de la pala 3 aumenta, entonces el ángulo de ataque máximo alcanzable α se reduce a favor de coeficientes de deslizamiento ϵ mejorados.

La figura 6 muestra esquemáticamente una pala de rotor 1, en la que la distancia entre pares de elementos de remolino 10, 11 aumenta a medida que aumenta la distancia desde la raíz de pala de rotor 2. Los elementos de remolino 10, 11 son esencialmente idénticos en toda la distancia en dirección longitudinal de la pala de rotor, es decir, están montados en el mismo ángulo y tienen alturas H y longitudes L idénticas.

Utilizando únicamente un tipo de elementos de remolino 10, 11, especialmente previstos en pares, se puede simplificar el montaje, por ejemplo, en una obra, ya que se reduce el riesgo de confusión y de montaje incorrecto de los elementos de remolino 10, 11. A esto se suman también ventajas tecnológicas de producción, ya que solo se necesita una herramienta de producción, por ejemplo, en la producción mediante tecnología de moldeo por inyección.

Además, la realización de la Fig. 6 se puede combinar con todas las demás variaciones geométricas descritas para lograr las ventajas asociadas.

Una ráfaga de viento que impacta en la instalación de energía eólica, es decir, un cambio de velocidad en el flujo incidente, provoca un cambio en el ángulo de ataque efectivo sobre la pala de rotor 1 en operación. El ángulo de ataque efectivo resulta de la suma vectorial de la velocidad circunferencial y la velocidad del viento entrante. La relación entre la velocidad circunferencial y la velocidad del viento determina si un cambio en la velocidad del flujo entrante da como resultado un cambio grande o pequeño en el ángulo de ataque efectivo.

En la raíz de pala de rotor 2, una ráfaga da como resultado un gran cambio en el ángulo de ataque efectivo, ya que la velocidad de entrada es grande en relación con la velocidad circunferencial. En la pala exterior, cerca

de la punta de rotor 3, donde la velocidad circunferencial es varios órdenes de magnitud mayor y la velocidad de flujo incidente es correspondientemente menor, la misma ráfaga de viento sólo provoca una pequeña variación en el ángulo de ataque efectivo.

5 Por este motivo es necesario diseñar generadores de vórtices 9 en la pala interior de tal manera que den como resultado una reserva de ángulo de ataque lo más grande posible. Esto también se puede expresar mediante un perfil polar deseado, libre de separación, durante el mayor tiempo posible y esto ocurre con una separación relativamente pequeña entre los generadores de vórtices 9. La resistencia adicional resultante y el rendimiento de deslizamiento reducido resultante tienen poco impacto en el rendimiento de la instalación de energía eólica
10 dadas las bajas velocidades circunferenciales.

Por las razones explicadas, en la pala exterior cerca de la punta de rotor 3 se necesitan reservas de ángulo de ataque adicionales más pequeñas. Además, una resistencia excesiva en la pala de rotor 1 tendría un impacto significativamente más negativo en el rendimiento del rotor a altas velocidades circunferenciales que en la raíz de pala de rotor 2. Por lo tanto, en esta zona están previstas preferentemente distancias cada vez mayores entre los generadores de vórtices 9, lo que da como resultado un mejor comportamiento de deslizamiento y un aumento ligeramente menor del ángulo de ataque hasta la pérdida debido a una menor resistencia.

20 Alternativa, o adicionalmente también tiene sentido el uso de generadores de vórtices 9 más pequeños hacia el exterior, de manera especialmente preferente en combinación con un aumento de la distancia hacia el exterior, incluso si el tamaño de los generadores de vórtices 9 se reduce hacia el exterior. De manera especialmente preferida, los generadores de vórtices 9 se seleccionan de entre 3 y 5 tamaños diferentes de generadores de vórtices 9 disponibles, de modo que la complejidad, por ejemplo, en el almacenamiento y el montaje, sigue siendo manejable.

25 Con respecto al sonido generado, cuantos más generadores de vórtices 9 estén en el viento, más sonido se producirá. Además, cuanto mayor es la velocidad del viento, más sonido produce cada uno de los generadores de vórtice 9. Desde el punto de vista acústico también es preferible una menor densidad de generadores de vórtices 9 hacia el exterior en comparación con la raíz de pala de rotor 2.

30 Al diseñar la pala de un rotor 1, el objetivo también es mantener el factor de inducción sobre el radio en el valor de potencia óptimo de $1/3$. Debido a la baja velocidad, esto sólo es posible en la zona de la raíz de pala de rotor 2 aumentando la anchura del perfil, lo que sólo es posible de forma limitada por motivos de transporte, o aumentando los coeficientes de sustentación. Por lo tanto, el rotor de potencia óptima con una anchura máxima limitada en la raíz de pala de rotor 2 debe diseñarse siempre de tal manera que se alcancen los coeficientes de sustentación más altos posibles en la zona de la raíz.

REIVINDICACIONES

1. Pala de rotor (1), con un lado de succión y un lado de presión, para una instalación de energía eólica, que comprende:
 - 5 - una raíz de pala de rotor (2) de una región de buje (I) para fijar la pala de rotor (1) a un buje de rotor,
 - una punta de pala de rotor (3), que está dispuesta en un lado de una región de punta (II) alejado de la raíz de pala de rotor (2),
 - al menos un generador de vórtices (9), que está dispuesto entre la raíz de pala de rotor (2) y la punta de pala de rotor (3),
 - 10 donde el al menos un generador de vórtices (9) comprende elementos de remolino (10, 11) con una longitud (L) y una altura (H), que están dispuestos uno al lado del otro en una dirección longitudinal de la pala de rotor y están orientados en cada caso en un ángulo con respecto a una dirección de flujo principal (SR) de la pala de rotor (1), donde los elementos de remolino (10, 11) tienen una separación lateral (D, D1) entre sí en la dirección longitudinal de la pala de rotor,
 - 15 donde el generador de vórtices (9) comprende al menos una placa base (13), sobre la cual los elementos de remolino (10, 11) están dispuestos por pares en ángulos sustancialmente opuestos a la dirección de flujo principal (SR) de la pala de rotor (1), donde la separación lateral (D, D1) se determina entre elementos de remolino (10, 11) dispuestos uno al lado del otro sustancialmente con el mismo ángulo donde en función de una distancia respectiva (R) de la disposición de los elementos de remolino (10, 11) respecto de la raíz de pala de rotor (2) se lleva a cabo una variación de la geometría de los elementos de remolino (10, 11), caracterizado por que la variación de la geometría de los elementos de remolino (10, 11) resulta de una relación (V) de la separación lateral (D, D1) respecto al ángulo con la dirección de flujo principal (SR) de la pala de rotor (1), la cual, como una función de la distancia (R), aumenta con distancias (R) crecientes.
- 25 2. Pala de rotor (1) según la reivindicación 1, caracterizada por que la variación de la geometría de los elementos de remolino (10, 11) resulta de una relación (V) de la separación lateral (D, D1) respecto a la longitud (L), relación que se puede determinar como una función de la distancia (R).
- 30 3. Pala de rotor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que la variación de la geometría de los elementos de remolino (10, 11) resulta de una relación (V) de la separación lateral (D, D1) respecto a la altura (H), relación que se puede determinar como una función de la distancia (R).
4. Pala de rotor (1) según una de las reivindicaciones 2 y 3, caracterizada por que la relación de la separación lateral (D, D1) respecto a la longitud (L) y/o de la separación lateral (D, D1) respecto a la altura (H) aumenta con distancias (R) crecientes.
- 35 5. Pala de rotor (1) según la reivindicación 4, caracterizada por que la longitud (L) y/o la altura (H) de los elementos de remolino (10, 11) son sustancialmente constantes.
- 40 6. Pala de rotor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que los elementos de remolino (10, 11) presentan un perfil de forma sustancialmente triangular o en forma de aleta.
7. Pala de rotor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que la variación de la geometría de los elementos de remolino (10, 11) resulta de una relación (V) de la separación lateral (D, D1) respecto a un ángulo interior de una punta del elemento de remolino (10, 11) separada de una superficie de la pala de rotor (1), la cual se puede determinar como una función de la distancia (R).
- 45 8. Instalación de energía eólica con un rotor, en donde el rotor tiene al menos una pala de rotor (1) según una de las reivindicaciones 1 a 7.
- 50 9. Procedimiento para optimizar una instalación de energía eólica, donde la instalación de energía eólica tiene una pala de rotor (1), con un lado de succión y un lado de presión para una instalación de energía eólica, donde la pala de rotor comprende
 - 55 - una raíz de pala de rotor (2) de una región de buje (I) para fijar la pala de rotor (1) a un buje de rotor,
 - una punta de pala de rotor (3), que está dispuesta en un lado de una región de punta (II) alejado de la raíz de pala de rotor (2),
 - al menos un generador de vórtices (9), que está dispuesto entre la raíz de pala de rotor (2) y la punta de pala de rotor (3),
 - 60 donde el al menos un generador de vórtices (9) comprende elementos de remolino (10, 11) con una longitud (L) y una altura (H), que están dispuestos uno al lado del otro en una dirección longitudinal de la pala de rotor y están orientados en cada caso en un ángulo con respecto a una dirección de flujo principal (SR) de la pala de rotor (1),

ES 3 010 438 T3

donde los elementos de remolino (10, 11) tienen una separación lateral (D, D1) entre sí, donde el generador de vórtices (9) comprende al menos una placa base (13), sobre la cual los elementos de remolino (10, 11) están dispuestos por pares en ángulos sustancialmente opuestos a la dirección de flujo principal (SR) de la pala de rotor (1), donde la separación lateral (D, D1) se determina entre elementos de remolino (10, 11) dispuestos uno al lado del otro sustancialmente con el mismo ángulo, donde

5 en función de una distancia respectiva (R) de la disposición de los elementos de remolino (10, 11) respecto de la raíz de pala de rotor (2) se lleva a cabo una variación de la geometría de los elementos de remolino (10, 11), caracterizado por que el paso de variar la geometría de los elementos de remolino (10, 11) resulta de una

10 relación (V) de la separación lateral (D, D1) respecto al ángulo con la dirección de flujo principal (SR) de la pala de rotor (1), la cual, como una función de la distancia (R), aumenta con distancias (R) crecientes.

DIBUJOS

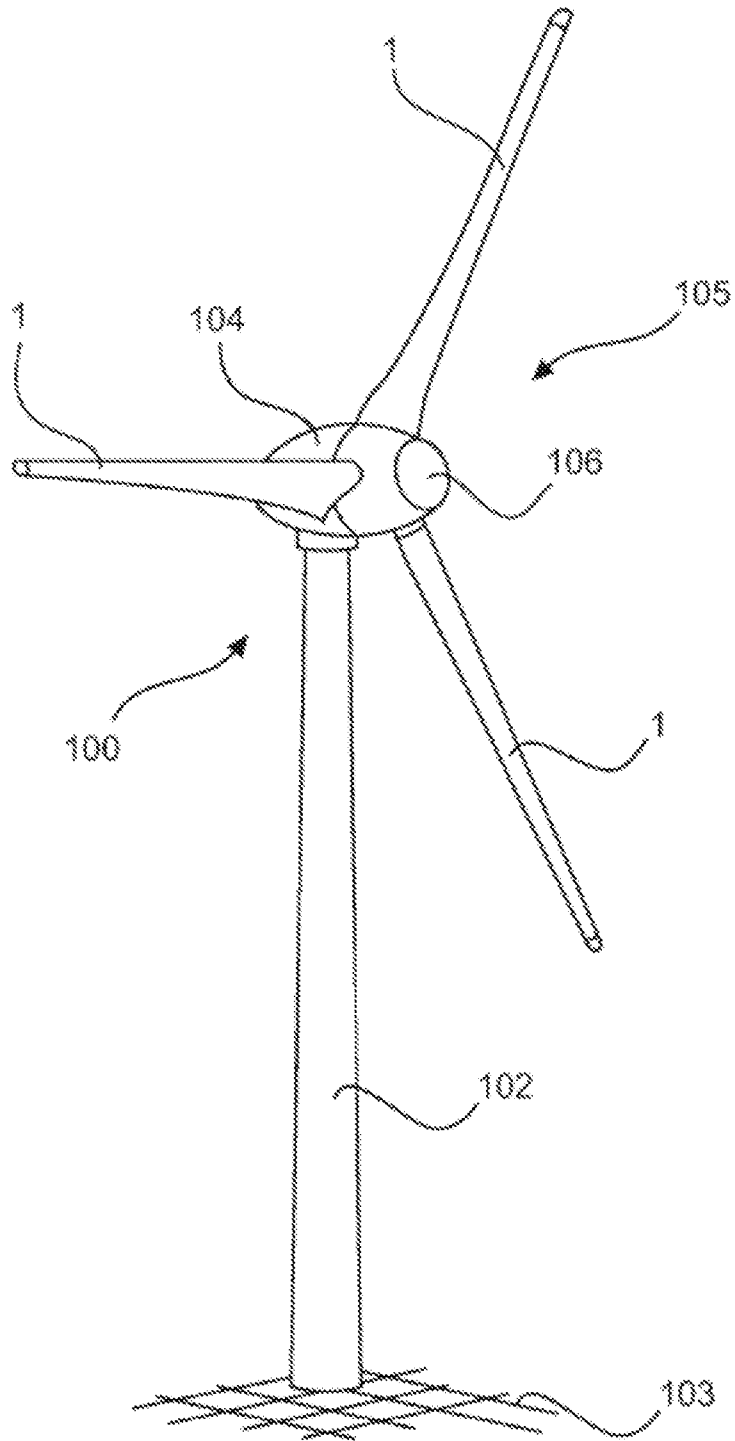


Fig. 1

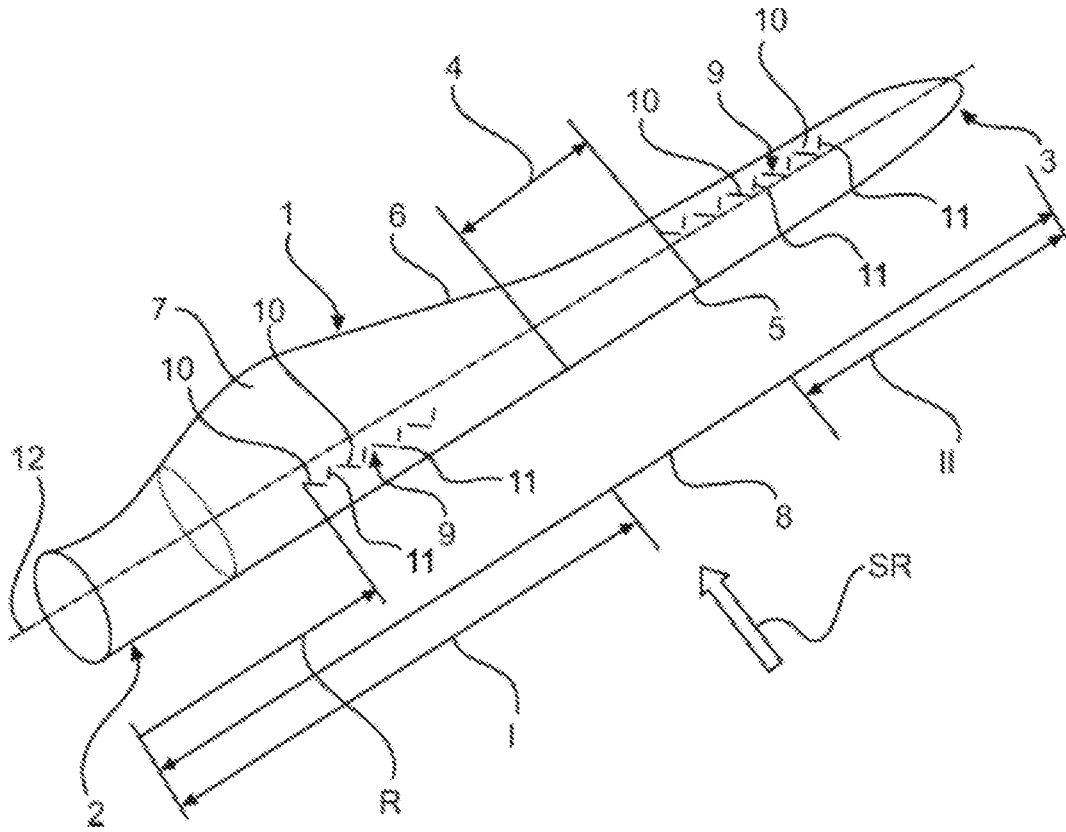


Fig. 2

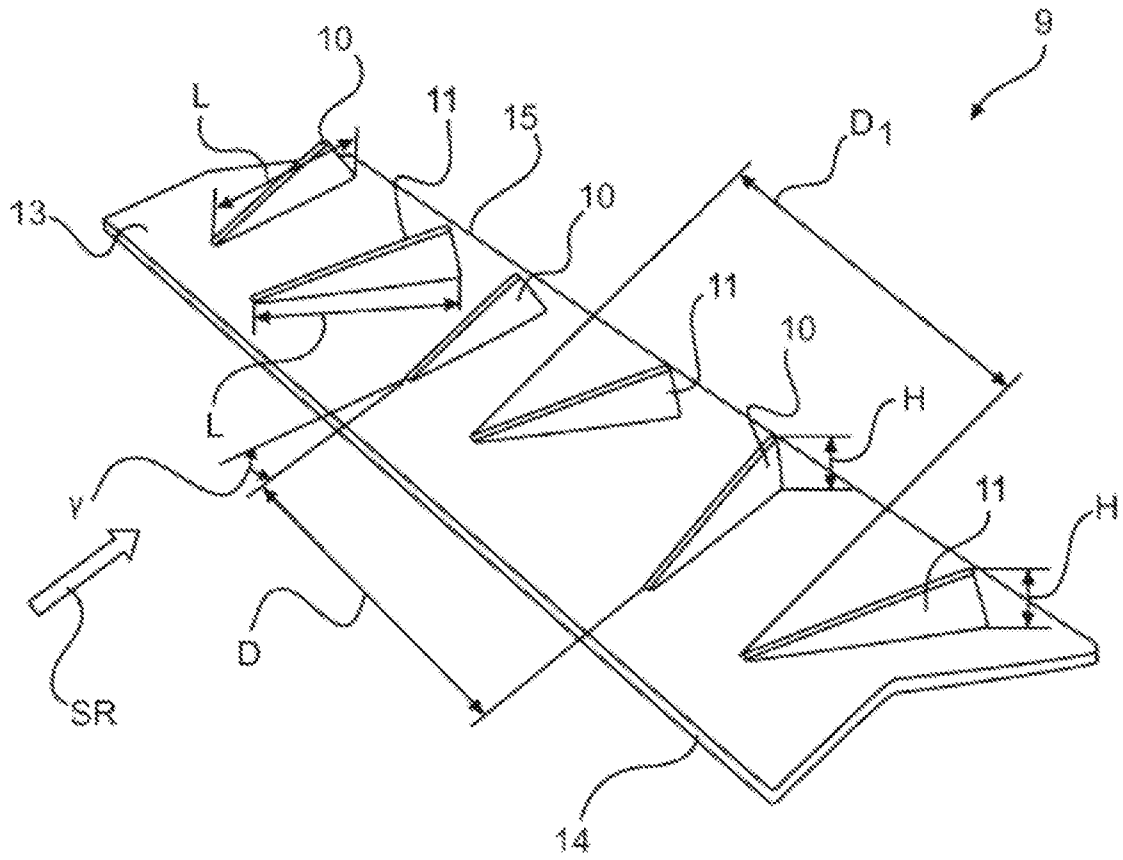


Fig. 3

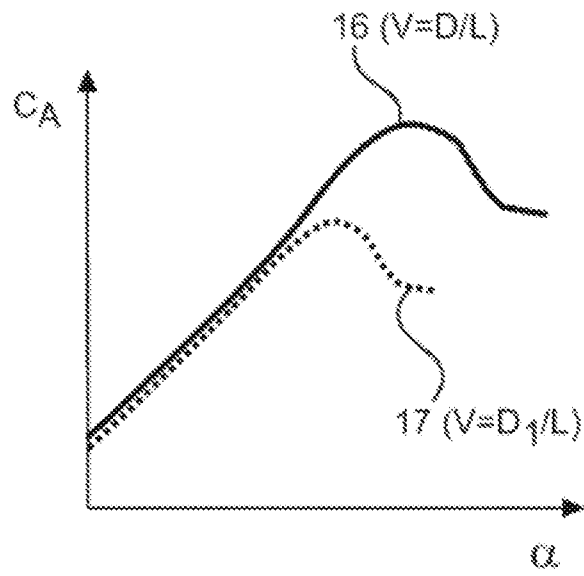


Fig. 4

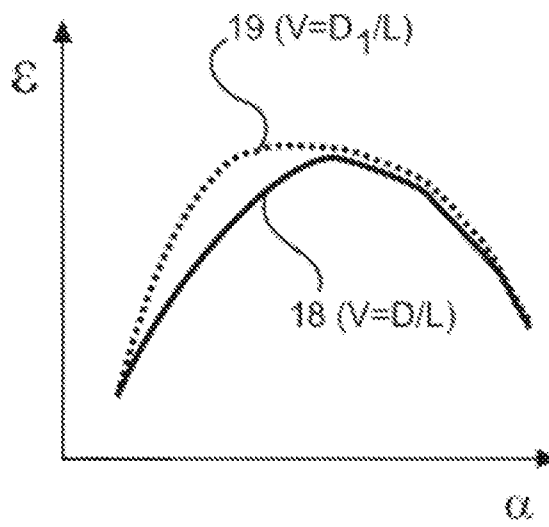


Fig. 5

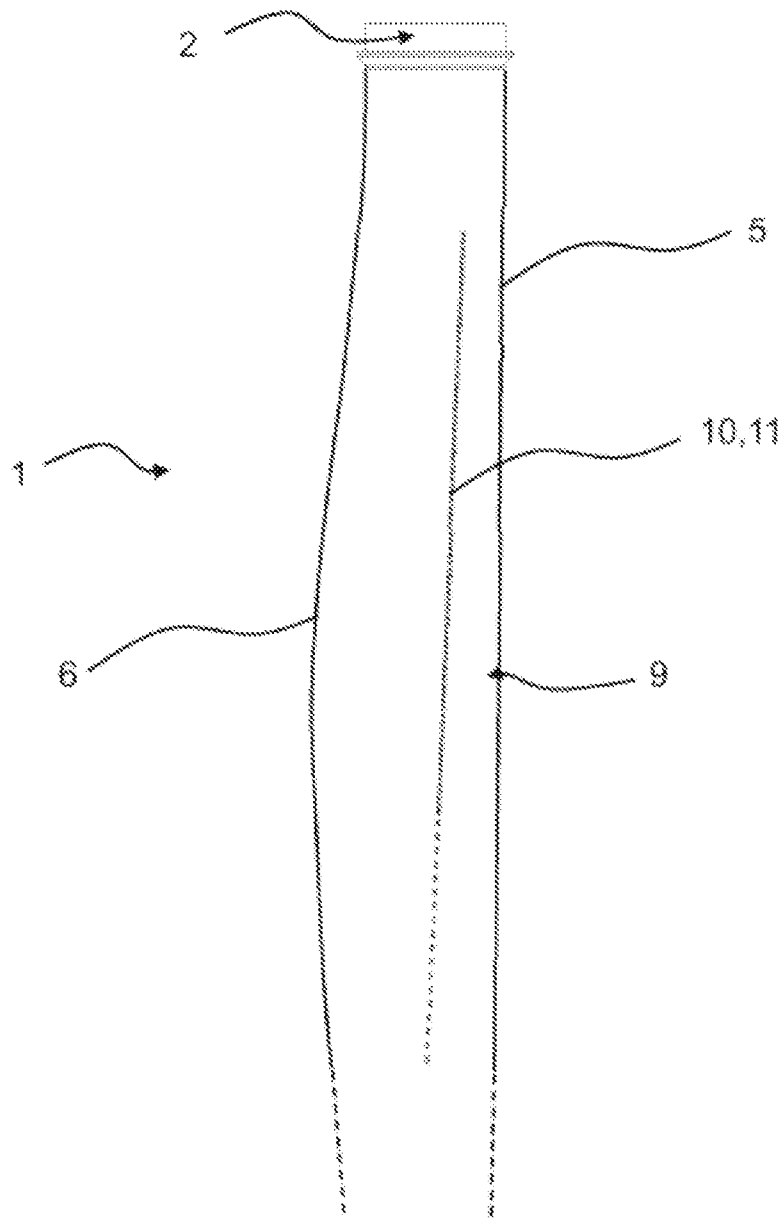


Fig. 6