

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 612 213**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.12.2014** E 14199681 (9)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.12.2016** EP 3037656

54 Título: **Pala de rotor con generadores de vórtices**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**12.05.2017**

73 Titular/es:

**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)**  
**Wittelsbacherplatz 2**  
**80333 München, DE**

72 Inventor/es:

**ENEVOLDSEN, PEDER BAY;**  
**FUGLSANG, PETER y**  
**GONZALEZ, ALEJANDRO GOMEZ**

74 Agente/Representante:

**LOZANO GANDIA, José**

**ES 2 612 213 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).

**PALA DE ROTOR CON GENERADORES DE VÓRTICES****DESCRIPCIÓN**

- 5 La presente invención se refiere a una turbina eólica y a una pala de rotor de una turbina eólica. En particular, la presente invención se refiere a la cuestión de cómo una pala de rotor y una turbina eólica que comprende una pala de rotor tal podrían mejorarse con respecto a aspectos aerodinámicos y estructurales.
- 10 Se conoce del campo de las aeronaves el proporcionar generadores de vórtices al ala de una aeronave, es decir un avión. Un generador de vórtices es un medio sencillo de mejorar la eficiencia aerodinámica del ala en ciertas condiciones. Un generador de vórtices es un complemento aerodinámico que puede, por ejemplo, montarse en un ala ya terminada o que puede incorporarse al procedimiento de fabricación de un ala nueva.
- 15 También se conoce que los generadores de vórtices pueden tener un efecto beneficioso para las palas de rotor de una turbina eólica. La solicitud de patente internacional WO 2006/122547 A1, por ejemplo, da a conocer una pala de rotor de una turbina eólica con medios de generación de turbulencia en el lado de superficie a sotavento, es decir el lado de aspiración, de la pala de rotor.
- 20 Otro ejemplo del uso de generadores de vórtices en el contexto de palas de rotor de turbina eólica es la solicitud de patente US 2009/0068018 A1. En la misma, se dan a conocer varios diseños y configuraciones de generadores de vórtices sobre palas de rotor de turbina eólica.
- 25 Los generadores de vórtices convencionales tienen, entre otros, los siguientes efectos técnicos: retraso de pérdida en una pala de rotor debido a la re-energización de la capa límite. La capa límite es la capa de flujo de aire que es adyacente a la superficie de la pala de rotor. Durante el funcionamiento de la turbina eólica, el retraso de pérdida es altamente ventajoso ya que, así, la turbina eólica puede hacerse funcionar en un intervalo mayor de ángulos de ataque. El ángulo de ataque se refiere al ángulo entre la cuerda de referencia de la pala de rotor y la dirección del flujo de aire entrante que incide en la pala de rotor.
- 30 Otro efecto técnico de los generadores de vórtices convencionales es el aumento de la sustentación de la pala de rotor. Esto puede ser particularmente ventajoso si el coeficiente de sustentación de la pala de rotor ya ha disminuido, por ejemplo debido al ensuciamiento de la pala de rotor. El coeficiente de sustentación de una pala de rotor caracteriza la sustentación que puede generarse si un flujo de aire incide en la pala de rotor en un cierto ángulo de ataque. El coeficiente de sustentación depende en general, entre otros parámetros, de si la pala de rotor está limpia o sucia. El ensuciamiento de la pala de rotor se refiere a una superficie rugosa que puede estar provocada por bichos, insectos, polvo o similares. El ensuciamiento frecuentemente sucede en el borde de ataque de la pala de rotor. En resumen, en el caso de una pala de rotor sucia, un aumento del coeficiente de sustentación normalmente se percibe como ventajoso para todos los ángulos de ataque relevantes.
- 35 Sin embargo, el aumento del coeficiente de sustentación también puede ser desventajoso si aumenta la sustentación máxima de la pala de rotor hacia un valor que es superior a la sustentación máxima de la pala de rotor sin generadores de vórtices. Éste es, por ejemplo, el caso para una pala de rotor limpia en la que la provisión de generadores de vórtices aumenta la sustentación máxima. En este contexto, el aumento de la sustentación máxima normalmente se percibe como desventajoso porque aumenta la carga de la pala de rotor y, por tanto, pueden tener que revisarse los requisitos para la estabilidad estructural de la pala de rotor.
- 40 Este inconveniente está presente en los generadores de vórtices convencionales y podría potenciarse si se alinean múltiples generadores de vórtices en una dirección con respecto a la envergadura o la cuerda tal como se da a conocer en la solicitud de patente mencionada US 2009/0068018 A1.
- 45 Sería por tanto deseable proporcionar una pala de rotor de una turbina eólica que está configurada de modo que supera, al menos parcialmente, las desventajas descritas de las palas de rotor convencionales de una turbina eólica que tiene generadores de vórtices convencionales.
- 50 Este objetivo se resuelve mediante las reivindicaciones independientes. Las reivindicaciones dependientes describen desarrollos y modificaciones ventajosas.
- 55 Según la invención se proporciona una pala de rotor de una turbina eólica que comprende un generador de vórtices principal que está configurado para generar un vórtice principal y un generador de vórtices secundario, que está configurado para generar un segundo vórtice. La altura del generador de vórtices principal es superior a la altura del generador de vórtices secundario. Adicionalmente, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario están configurados y dispuestos de tal modo entre sí que
- 60 a) para un espesor de capa límite que es inferior a la altura del generador de vórtices secundario, el generador de vórtices secundario reduce, en particular neutraliza, el impacto del generador de vórtices principal en la sustentación de la pala de rotor, y
- 65

b) para un espesor de capa límite que es superior a la altura del generador de vórtices secundario, la sustentación de la pala de rotor está sustancialmente inafectada por la presencia del generador de vórtices secundario.

5 En principio, un generador de vórtices debe entenderse como un dispositivo o un complemento que es adecuado para generar un vórtice. La pala de rotor de la invención comprende al menos dos generadores de vórtices: un generador de vórtices principal y un generador de vórtices secundario. La altura de los dos generadores de vórtices es diferente. La altura se refiere a la extensión del generador de vórtices perpendicular a la superficie de la pala de rotor en la ubicación específica de la pala de rotor en la que se monta el generador de vórtices. En otras palabras,  
10 los generadores de vórtices sobresalen alejándose de la superficie de la pala de rotor y se hace referencia a la altura de los generadores de vórtices como la distancia mínima del punto más distal del generador de vórtices a la superficie de la pala de rotor. Debe observarse que se pretende que la diferencia en altura entre el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario sea una diferencia en la altura que supera el 10% de la altura del generador de vórtices principal. En otras palabras, diferencias ligeras que se producen de manera natural en la altura que están provocadas, por ejemplo, por desviaciones de fabricación no son suficientes para calificarse como una diferencia de altura entre el generador de vórtices principal y secundario según se entiende en esta solicitud de patente. En particular, la altura del generador de vórtices principal es más del doble de la altura del generador de vórtices secundario.

20 Un aspecto clave de la presente invención es que el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario se eligen de modo que el generador de vórtices secundario cancela, o al menos reduce, el efecto o impacto del par de generadores de vórtices principales a pequeños espesores de capa límite; para grandes espesores de capa límite, sin embargo, el generador de vórtices secundario es "invisible", es decir inactivo. Por consiguiente, el efecto de la disposición de generadores de vórtices que comprende el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario depende del espesor de capa límite.

La capa límite se refiere a la capa de flujo que es adyacente a la superficie de la pala de rotor, y en la que la velocidad del flujo de aire varía de su denominada velocidad de flujo exterior hasta a un valor de cero en la superficie. En particular, la velocidad del flujo de aire aumenta, por ejemplo monótonamente, para distancias crecientes desde la superficie. El espesor de la capa límite se define de modo que la velocidad del flujo de aire alcanza el 99% de la velocidad de corriente no perturbada del flujo de aire. Espesores de capa límite típicos de una pala de rotor de una turbina eólica moderna están en el intervalo de unos pocos milímetros hasta unos pocos centímetros. Estos valores representan valores ejemplares para una pala de rotor que tiene una longitud de cuerda máxima de, por ejemplo, cuatro metros y una longitud en dirección con respecto a la envergadura de cincuenta metros. Obsérvese que el espesor de la capa límite depende, entre otros parámetros, del ángulo de ataque. El espesor de la capa límite también depende de si la pala de rotor está limpia o sucia.

El generador de vórtices secundario está dispuesto y preparado para reducir el impacto del generador de vórtices principal en la sustentación de la pala de rotor de manera selectiva para un espesor de capa límite que es inferior a la altura del generador de vórtices secundario. Obsérvese, sin embargo, que incluso para un espesor de capa límite, que es inferior a la altura del generador de vórtices secundario, podría suceder que el generador de vórtices principal todavía tenga un cierto impacto, es decir actividad, en la sustentación de la pala de rotor. Del mismo modo, incluso para un espesor de capa límite, que es superior a la altura del generador de vórtices secundario, podría suceder que el impacto del generador de vórtices principal todavía se reduce mediante el generador de vórtices secundario, aunque el generador de vórtices secundario esté completamente sumergido dentro de la capa límite. Una altura límite, en el que los generadores de vórtices son inefectivos aerodinámicamente, también se denomina la subcapa viscosa de la pala de rotor.

En una realización de la invención, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario se sitúan en el lado de aspiración de la pala de rotor.

Una colocación de los generadores de vórtices sobre el lado de aspiración de la pala de rotor es ventajosa porque el impacto positivo de los generadores de vórtices de la pérdida principal es más relevante en el lado de aspiración de la pala de rotor en comparación con el lado de presión de la pala de rotor.

En otra realización de la invención, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario se sitúan sustancialmente en la misma posición con respecto a la envergadura de la pala de rotor.

La posición con respecto a la envergadura se refiere a la envergadura de la pala de rotor. La envergadura de la pala de rotor se extiende entre la parte de raíz de la pala de rotor y la parte de punta de la pala de rotor. La envergadura de la pala de rotor también se denomina como su eje longitudinal. Con respecto a una palas de rotor que están configuradas para cabecear alrededor de un eje de cabeceo cuando una vez montadas en un buje de la turbina eólica, la envergadura podría ventajosamente ser sustancialmente equivalente al eje de cabeceo de la pala de rotor. Sin embargo, en el caso de una pala de rotor curvada o en flecha, la envergadura sigue la forma de la pala de rotor y por tanto está curvada o en flecha también.

En otra realización de la invención, la distancia entre el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario es inferior al 10%, en particular inferior al 5%, incluso más particularmente inferior al 2% de la longitud de cuerda de la pala de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador de vórtices principal.

5 Una ventaja de una distancia relativamente pequeña entre el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario es que el impacto del generador de vórtices secundario en el generador de vórtices principal es fuerte. En otras palabras, la distancia entre el generador de vórtices secundario y el generador de vórtices principal tienen que ser suficientemente pequeña de modo que en el caso en el que el generador de vórtices secundario está sustancialmente fuera de la capa límite, el generador de vórtices secundario tiene un impacto en la eficiencia aerodinámica del generador de vórtices principal.

A continuación, se dan dimensiones ventajosas del generador de vórtices principal.

15 Un primer aspecto se refiere al posicionamiento del generador de vórtices principal con respecto a la ubicación con respecto a la cuerda y con respecto a la envergadura sobre la superficie de la pala de rotor. El generador de vórtices principal puede posicionarse en cualquier posición a lo largo de toda la envergadura de la pala de rotor. En otras palabras, cualquier posición entre la raíz de la pala de rotor y la punta de la pala de rotor es adecuada. En relación con la posición con respecto a la cuerda, se prefiere una ubicación del generador de vórtices principal entre el 5% y el 60% de la longitud de cuerda de la pala de rotor. Obsérvese que los valores dados se refieren a posiciones determinadas a lo largo de la cuerda de referencia, tal como se mide desde el borde de ataque de la pala de rotor. Obsérvese también, como la longitud de cuerda de una pala de rotor normalmente varía a lo largo de la envergadura, que los valores dados se refieren a la longitud de cuerda en la posición con respecto a la envergadura, en la que se monta el generador de vórtices principal.

25 En una primera realización preferida, el generador de vórtices principal se sitúa entre el 50% y el 100% de la envergadura de la pala de rotor, tal como se mide desde la raíz de la pala de rotor. En relación con su posición con respecto a la cuerda, el generador de vórtices principal se sitúa entre el 20% y el 55% de la longitud de cuerda de la pala de rotor, tal como se mide desde el borde de ataque de la pala de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador de vórtices principal.

30 En una segunda realización preferida, el generador de vórtices principal se sitúa entre el 5% y el 50% de la envergadura de la pala de rotor, tal como se mide desde la raíz de la pala de rotor. En relación con su posición con respecto a la cuerda, el generador de vórtices principal se sitúa entre el 5% y el 40% de la longitud de cuerda de la pala de rotor, tal como se mide desde el borde de ataque de la pala de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador de vórtices principal.

35 En una tercera realización preferida, se combinan las realizaciones primera y segunda, dando como resultado por tanto una pluralidad de generadores de vórtices principales de los que una primera parte tiene las características de la primera realización y una segunda parte tiene las características de la segunda realización. En otras palabras, se proporciona una pala de rotor que comprende al menos un primer generador de vórtices principal en una posición con respecto a la envergadura entre el 5% y el 50% y una posición con respecto a la cuerda entre el 5% y el 40%, y al menos un segundo generador de vórtices principal en una posición con respecto a la envergadura entre el 50% y el 100% y una posición con respecto a la cuerda entre el 20% y el 55%.

45 Un segundo aspecto se refiere a la altura máxima del generador de vórtices principal. La altura del generador de vórtices principal se refiere a la extensión del generador de vórtices principal en una dirección perpendicular a la superficie de la pala de rotor en la posición en la superficie en la que el generador de vórtices principal se monta en la pala de rotor. Como en general, el generador de vórtices principal tiene una forma con una altura variante, por ejemplo tiene una altura creciente según se observa desde el extremo aguas arriba hasta el extremo aguas abajo del generador de vórtices principal, la altura máxima se refiere al valor máximo de la altura del generador de vórtices principal.

50 Preferiblemente, el generador de vórtices principal tiene una altura máxima entre el 0,2% y el 4%, lo más preferiblemente entre el 0,3% y el 1%, de la longitud de cuerda de la pala de rotor. Del mismo modo, el generador de vórtices secundario preferiblemente tiene una altura máxima entre el 0,1% y el 1%, lo más preferiblemente entre el 0,1% y el 0,5%, de la longitud de cuerda de la pala de rotor.

60 En otra realización de la invención, la pala de rotor comprende un generador de vórtices principal adicional y un generador de vórtices secundario adicional.

Por tanto, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices principal adicional construyen un par de generadores de vórtices principales. Del mismo modo, el generador de vórtices secundario y el generador de vórtices secundario adicional construyen un par de generadores de vórtices secundarios.

65 Es bastante habitual en el campo de las aeronaves así como en el campo de las palas de rotor de turbina eólica disponer generadores de vórtices en pares. Obsérvese que en principio un generador de vórtices también puede

trabajar y generar vórtices si está presente como tal. Sin embargo, la eficiencia de los generadores de vórtices aumenta si existen como un par.

5 Obsérvese que la posición y dimensiones ventajosas, que se mencionaron para el generador de vórtices principal, preferiblemente también son de aplicación para el generador de vórtices principal adicional. En particular, tanto el generador de vórtices principal como el generador de vórtices principal adicional tienen una posición y dimensiones similares.

10 Del mismo modo, ventajosamente, la posición y dimensiones, que se mencionaron para el generador de vórtices secundario, preferiblemente también son de aplicación para el generador de vórtices secundario adicional. En particular, tanto el generador de vórtices secundario como el generador de vórtices secundario adicional tienen una posición y dimensiones similares.

15 En otra realización de la invención, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices principal adicional divergen el uno del otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección de borde de ataque de la pala de rotor hasta la sección de borde de salida de la pala de rotor.

20 Esta divergencia del par de generadores de vórtices principales debe entenderse de modo que la distancia mínima entre el generador de vórtices principal y el generador de vórtices principal adicional es más pequeña en el extremo aguas arriba de los generadores de vórtices principales en comparación con el extremo aguas abajo de los generadores de vórtices principales.

25 Una ventaja de tener un par de generadores de vórtices principales que divergen el uno del otro con respecto a sus formas es que los vórtices que se generan por los generadores de vórtices no interfieren ni se impiden entre sí en tal medida que posiblemente sería el caso si convergieran entre sí.

30 Alternativamente, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices principal adicional también pueden converger el uno hacia el otro con respecto a la cuerda desde la sección de borde de ataque de la pala de rotor hasta la sección de borde de salida de la pala de rotor. Obsérvese que el efecto técnico de la invención trabaja en principio con pares de generadores de vórtices principales tanto divergentes como convergentes.

35 En una realización de la invención, el generador de vórtices secundario y el generador de vórtices secundario adicional convergen el uno hacia el otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección de borde de ataque de la pala de rotor hasta la sección de borde de salida de la pala de rotor.

Alternativamente, también podría ser ventajoso si el par de generadores de vórtices secundarios divergen el uno del otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección de borde de ataque de la pala de rotor hasta la sección de borde de salida de la pala de rotor.

40 El hecho de que el par de generadores de vórtices secundarios convergen el uno hacia el otro o divergen el uno del otro tiene un impacto en si los vórtices generados rotan en el sentido de las agujas del reloj entre sí o en el sentido contrario a las agujas del reloj entre sí. En función del diseño específico y el fin de la pala de rotor, es preferible una rotación o bien en el sentido de las agujas del reloj o bien en el sentido contrario a las agujas del reloj de los vórtices.

45 En resumen, tanto el par de generadores de vórtices principales pueden convergir o divergir como el par de generadores de vórtices secundarios pueden convergir o divergir. En principio, todas las combinaciones, un par de generadores de vórtices principales convergentes y un par de generadores de vórtices secundarios convergentes; un par de generadores de vórtices principales convergentes y un par de generadores de vórtices secundarios divergentes; un par de generadores de vórtices principales divergentes y un par de generadores de vórtices secundarios convergentes; y un par de generadores de vórtices principales divergentes y un par de generadores de vórtices secundarios divergentes, funcionan en principio y pueden llevar al efecto técnico inventivo tal como se describió anteriormente. Obsérvese que debido a las opciones adicionales de colocar el par de generadores de vórtices principales aguas arriba con respecto al par de generadores de vórtices secundarios o colocar el par de generadores de vórtices secundarios aguas arriba con respecto al par de generadores de vórtices principales (estas opciones se describirán en más detalle adicionalmente a continuación), incluso más combinaciones son posibles en principio.

60 En otra realización de la invención, el generador de vórtices secundario se sitúa aguas arriba del generador de vórtices principal. Alternativamente, el generador de vórtices secundario se sitúa aguas abajo del generador de vórtices principal.

De nuevo, ambas configuraciones son posibles y parecen prometedoras en función de la realización concreta de la pala de rotor de que los generadores de vórtices son una parte de y para el funcionamiento concreto de la pala de rotor.

65 En otra realización de la invención, el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario se

fusionan entre sí, de modo que el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario construyen un único dispositivo.

5 En principio, tanto el generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario pueden diseñarse como dos piezas separadas. Por tanto, no tiene un vínculo físico entre sí excepto que están montados en la misma parte de la superficie de la pala de rotor. Sin embargo, en una posible realización de la invención, podría ser ventajoso si los dos generadores de vórtices se fusionaran. Esto podría ser ventajoso en términos de la eficiencia aerodinámica ya que no están presentes ningún borde o reborde o interrupciones desde el extremo aguas arriba de la disposición de los generadores de vórtices hasta el extremo aguas abajo de la disposición.

10 En otra realización de la invención, el generador de vórtices secundario está configurado como un deflector de vórtices para guiar el vórtice principal lejos de la superficie de la pala de rotor.

15 Este deflector de vórtices puede por ejemplo configurarse en forma de una inclinación.

La invención también se dirige a una turbina eólica que comprende al menos una pala de rotor tal como se describe en una de las realizaciones anteriores.

20 Se hace referencia a una turbina eólica como un dispositivo que convierte energía cinética del viento en energía rotacional. Posteriormente, la energía rotacional se usa para generar electricidad. Una turbina eólica también se denomina un parque eólico.

Se describen ahora realizaciones de la invención, a modo de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos adjuntos, de los que:

25 la figura 1 muestra una turbina eólica;

la figura 2 muestra una pala de rotor de una turbina eólica;

30 la figura 3 muestra una vista en perspectiva de una parte de una pala de rotor de una turbina eólica con generadores de vórtices;

la figura 4 muestra una vista en sección transversal del perfil de superficie aerodinámica de la pala de rotor;

35 la figura 5 muestra diferentes espesores de capa límite;

la figura 6A muestra el coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque para diferentes palas de rotor;

40 la figura 6B muestra las respectivas relaciones de sustentación a resistencia para las palas de rotor tal como se muestran en la figura 6A;

la figura 7 muestra una primera realización de la invención;

45 la figura 8 muestra una segunda realización de la invención;

la figura 9 muestra una tercera realización de la invención;

la figura 10 muestra una cuarta realización de la invención; y

50 la figura 11 muestra una quinta realización de la invención.

La ilustración en los dibujos es en forma esquemática. Debe observarse que en diferentes figuras, elementos similares o idénticos pueden proporcionarse con los mismos signos de referencia.

55 En la figura 1, se muestra una turbina 10 eólica. La turbina 10 eólica comprende una góndola 12 y una torre 11. La góndola 12 se monta en la parte superior de la torre 11. La góndola 12 se monta de manera que puede rotarse con respecto a la torre 11 mediante un cojinete de guiñada. El eje de rotación de la góndola 12 con respecto a la torre 11 se denomina eje de guiñada.

60 La turbina 10 eólica también comprende un buje 13 con tres palas 20 de rotor (de los que dos palas 20 de rotor se ilustran en la figura 1). El buje 13 se monta de manera que puede rotarse con respecto a la góndola 12 mediante un cojinete principal. El buje 13 se monta de manera que puede rotarse alrededor de un eje 14 de rotor de rotación.

65 La turbina 10 eólica además comprende un árbol principal, que conecta el buje 13 con un rotor de un generador 15. El buje 13 está conectado directamente al rotor, por tanto la turbina 10 eólica se denomina turbina eólica sin

engranaje de transmisión directa. Como una alternativa, el buje 13 también puede conectarse al rotor a través de una caja de engranajes. Este tipo de turbina eólica se denomina turbina eólica de engranaje.

5 El generador 15 se aloja dentro de la góndola 12. Comprende el rotor y un estator. El generador 15 está dispuesto y preparado para convertir la energía rotacional del rotor en energía eléctrica.

10 La figura 2 muestra una pala 20 de rotor de una turbina eólica. La pala 20 de rotor comprende una sección 21 de raíz con una raíz 211 y una sección 22 de punta con una punta 221. La raíz 211 y la punta 221 están virtualmente conectadas mediante la envergadura 26 que sigue la forma de la pala 20 de rotor. Si la pala de rotor fuera un objeto de forma rectangular, la envergadura 26 sería una línea recta. Sin embargo, como la pala 20 de rotor tiene un espesor variante, la envergadura 26 está ligeramente curvada o doblada también. Obsérvese que si la propia pala 20 de rotor se dobla, entonces la envergadura 26 se doblaría, también.

15 La pala 20 de rotor comprende además una sección 24 de borde de ataque con un borde 241 de ataque y una sección 23 de borde de salida con un borde 231 de salida.

La sección 23 de borde de salida rodea el borde 231 de salida. Del mismo modo, la sección 24 de borde de ataque rodea el borde 241 de ataque.

20 En cada posición con respecto a la envergadura, puede definirse una cuerda 27 de referencia que conecta el borde 241 de ataque con el borde 231 de salida. Obsérvese que la cuerda 27 de referencia es perpendicular a la envergadura 26. El resalte 28 se define en la zona en la que la cuerda de referencia comprende una máxima longitud de cuerda.

25 Además, la pala 20 de rotor puede dividirse en una sección interior que comprende la mitad de la pala 20 de rotor adyacente a la sección 21 de raíz y una sección exterior que comprende la mitad de la pala 20 de rotor que es adyacente a la sección 22 de punta.

30 La figura 3 muestra una vista en perspectiva de una parte de una pala 20 de rotor. El lado 252 de aspiración puede verse y es opuesto al lado 251 de presión. Como la pala 20 de rotor está cortada en un corte en sección transversal en la figura 3, puede verse la cuerda 27 de referencia, que es la línea directa y recta entre el borde 241 de ataque y el borde 231 de salida. Obsérvese que el borde 231 de salida comprende una cierta extensión en la dirección que es perpendicular a la cuerda 27 de referencia. Esta extensión puede estar en el intervalo de unos pocos milímetros para una pala de rotor con una longitud de cincuenta metros. Si esta extensión es muy prominente, que comprende de manera ejemplar varios centímetros, el borde de salida también se denomina borde de salida de dorso plano.

35 Debe observarse que la disposición de generadores de vórtices sobre el lado 252 de aspiración de la pala 20 de rotor comprende cuatro grupos de generadores de vórtices. Cada grupo comprende un par de generadores 30 de vórtices principales y un par de generadores 40 de vórtices secundarios. Los generadores de vórtices secundarios convergen el uno hacia el otro en una dirección con respecto a la cuerda desde el borde 241 de ataque hasta el borde 231 de salida, mientras que los generadores 30 de vórtices principales divergen el uno del otro en la dirección con respecto a la cuerda desde el borde 241 de ataque hasta el borde 231 de salida. Los grupos de generadores de vórtices se disponen a lo largo de una línea que es sustancialmente paralela a la envergadura de la pala 20 de rotor.

45 La figura 4 ilustra la capa 51 límite que envuelve la superficie de la pala de rotor. Puede verse el flujo 53 de aire entrante, que inciden en la pala de rotor en un ángulo, que se denomina el ángulo 55 de ataque. El espesor 52 de capa límite varía a lo largo de posiciones con respecto a la cuerda de la pala de rotor. Obsérvese que la figura 4 sólo da un ejemplo de variaciones de espesor de capa límite relativas y que son posibles muchas alternativas y variaciones en una situación concreta. El espesor 52 de capa límite se refiere a la extensión perpendicular relativa a la superficie de la pala de rotor y la distancia a la que la velocidad del flujo 53 de aire alcanza un valor del 99% de la velocidad de flujo de aire de corriente no perturbada. Esto puede visualizarse mediante un perfil de velocidad del flujo 54 de aire. Puede lograrse un alto grado de eficiencia aerodinámica y sustentación si el flujo de aire está acoplado, es decir adherido, a la superficie de la pala de rotor tal como se muestra en la figura 4. Si, sin embargo, la capa límite está desacoplada en un cierto intervalo de posiciones con respecto a la cuerda, por ejemplo para cada posición con respecto a la cuerda superior al 70% tal como se determina desde el borde 241 de ataque de la pala de rotor, esta desacoplamiento de la pala de rotor también se denomina pérdida. La pérdida normalmente reduce el coeficiente de sustentación de la pala de rotor significativamente. Obsérvese que las propiedades de la capa 51 límite dependen mucho del ángulo 55 de ataque en el que el flujo 53 de aire incide sobre la pala de rotor.

60 En la figura 5, el concepto de la invención se explica con la ayuda de diferentes escenarios con respecto al espesor de capa límite que envuelve a la superficie de la pala de rotor. La figura 5 muestra un generador 30 de vórtices principal y un generador 40 de vórtices secundario, ambos acoplados al lado 252 de aspiración de una pala de rotor. Si el flujo 53 de aire fluye a lo largo del lado 252 de aspiración, una capa límite puede atribuirse al flujo de aire.

65 Un primer espesor 521 de capa límite se refiere a una pala de rotor limpia que funciona a pequeños ángulos de ataque. En cambio, el signo de referencia 522 se refiere a un segundo espesor de capa límite que es superior al

espesor 521 de capa límite. El segundo espesor 522 de capa límite se refiere a una pala de rotor limpia que funciona en un gran ángulo de ataque. Sin embargo, incluso para grandes ángulos de ataque el generador 40 de vórtices secundario sobresale fuera de la capa límite y por tanto es activo aerodinámicamente. En otras palabras, el generador 40 de vórtices secundario tiene un impacto en el generador 30 de vórtices principal, que está dispuesto a una distancia 56 aguas abajo del generador 40 de vórtices secundario.

La altura de los generadores 30 de vórtices principales es significativamente superior a la altura del generador 40 de vórtices secundario.

La figura 5 también muestra otras dos situaciones de una pala de rotor que llevan a diferentes espesores de la capa límite. El signo de referencia 523 se refiere a un tercer espesor de capa límite, que hace referencia a una pala de rotor sucia que funciona a pequeños ángulos de ataque. En cambio, el signo de referencia 524 se refiere a la misma pala de rotor sucia que funciona ahora a grandes ángulos de ataque. Obsérvese que para ambos ángulos de ataque, el generador 40 de vórtices secundario está completamente sumergido en la capa límite.

Un aspecto clave de la invención, que se visualiza en la figura 5, es que eligiendo dimensiones y distancias apropiadas y adaptadas del generador de vórtices principal y el generador de vórtices secundario, es posible una configuración en la que para cada ángulo de ataque posible y relevante en el caso de una pala de rotor sucia el generador 40 de vórtices secundario está completamente sumergido en la capa límite; mientras que para cualquier ángulo de ataque relevante de una pala de rotor limpia el generador 40 de vórtices secundario sobresale fuera de la capa límite. Esto se traduce en el resultado de que el generador 30 de vórtices principal es eficaz tan pronto como la pala de rotor se ensucia y se hace ineficaz siempre que la pala de rotor esté limpia. Por tanto, la invención proporciona una pala de rotor que tiene un generador de vórtices principal que, como tal, puede “encenderse o apagarse” mediante un generador de vórtices secundario posicionado aguas arriba que es eficaz o ineficaz en función de si la pala de rotor está sucia o limpia. Esto es ventajoso porque en el caso de una pala de rotor limpia el coeficiente de sustentación máximo ya es alto y un aumento adicional del coeficiente de sustentación máximo requeriría mayores requisitos de estabilidad estructural. Sin embargo, para una pala de rotor sucia, el coeficiente de sustentación ya está disminuido naturalmente de modo que un aumento de la sustentación de la pala de rotor mediante el generador de vórtices principal es deseable. Obsérvese que esta explicación se refiere al caso específico de una disposición de generadores de vórtices que comprende el generador 40 de vórtices secundario y el generador 30 de vórtices principal tal como se ilustra en la figura 5.

Las figuras 6A y 6B explican el efecto técnico de los generadores de vórtices de la invención en la curva de sustentación y la curva de relación de sustentación a resistencia, en comparación con generadores de vórtices convencionales y en comparación con ausencia de generador de vórtices. En particular, las figuras 6A y 6B muestran el coeficiente 61 de sustentación y la relación 62 de sustentación a resistencia, dependiendo cada uno del ángulo 55 de ataque. Obsérvese que cualquier generador de vórtices normalmente tiene una cierta resistencia. En otras palabras, contribuye a la resistencia global de la pala de rotor. Normalmente, un aumento de la resistencia de la pala de rotor no es deseable, ya que disminuye la eficiencia de la pala de rotor.

La figura 6A muestra diferentes curvas de sustentación para una pala de rotor. Una primera curva 611 de sustentación muestra un aumento monótono para el intervalo de ángulos de ataque pequeños a medianos. Esto significa que en un intervalo amplio para ángulos de ataque pequeños y medianos, el coeficiente 61 de sustentación aumenta con ángulos de ataque crecientes. En la práctica, esto significa que la sustentación generada por la pala de rotor aumenta mediante el aumento de ángulos de ataque que podrían estar provocados por ángulos cambiantes del viento entrante o mediante el cabeceo intencionado de la pala de rotor de modo que el viento entrante incide en un ángulo diferente en la pala de rotor. El coeficiente 61 de sustentación aumenta hasta que se alcanza un máximo. Se hace referencia al ángulo de ataque en el que se alcanza el máximo con el signo de referencia 551. Una disminución en el coeficiente de sustentación indica la aparición de pérdida en la pala de rotor.

Es una tendencia general que el coeficiente de sustentación aumenta monótonamente entre ángulos de ataque pequeños y medianos hasta que alcanza una sustentación máxima. Por consiguiente, entre ángulos de ataque medianos y grandes, el coeficiente de sustentación normalmente disminuye. La primera curva 611 se refiere a una curva de sustentación típica de una pala de rotor limpia sin generadores de vórtices. Proporcionando generadores de vórtices convencionales a una pala de rotor limpia, la curva de sustentación se desplaza a una segunda curva 612 de sustentación.

Un efecto de este desplazamiento es el retraso de pérdida. En otras palabras, el ángulo de ataque en el que sucede la pérdida se desplaza a un valor 552 superior. Por tanto, la pala de rotor puede hacerse funcionar con una capa límite acoplada en un mayor intervalo de ángulos 55 de ataque.

Otro efecto del desplazamiento de la curva de sustentación es que el coeficiente de sustentación como tal se desplaza a valores superiores. Por tanto, el valor absoluto del coeficiente de sustentación en su máximo aumenta en comparación con la primera curva de sustentación que se refiere a la misma pala de rotor sin ningún generador de vórtices. Este aumento del coeficiente de sustentación máximo está generalmente acompañado de un aumento en la carga extrema o máxima de la pala de rotor que podría ser problemática.

Las curvas 613 y 614 de sustentación representan la misma pala de rotor con un ensuciamiento en su superficie. El ensuciamiento de la pala de rotor se refiere a una capa adicional en secciones de superficie y/o a la erosión de la superficie de pala de rotor existente. La pala de rotor normalmente está sucia en la sección de borde de ataque, que llega potencialmente aguas abajo hasta la posición media con respecto a la longitud de cuerda de la pala de rotor. El ensuciamiento de la pala de rotor provoca que la curva de sustentación global disminuya. Esto es válido para el caso de una pala de rotor sucia sin generadores de vórtices, con signo de referencia 613, y es válido para el caso de una pala de rotor sucia con generadores de vórtices convencionales, que se representa mediante la cuarta curva 614 de sustentación. La disminución global del coeficiente de sustentación generalmente es indeseable ya que reduce la relación de sustentación a resistencia y, por tanto, la energía que puede captarse por la pala de rotor y la turbina eólica en conjunto.

Una pala de rotor limpia con generadores de vórtices de la invención se representa mediante la quinta curva 615 de sustentación. La pala de rotor limpia tiene una capa límite relativamente fina de modo que el generador de vórtices secundario es activo y reduce el impacto del generador de vórtices principal en la sustentación de la pala de rotor. Esto puede verse claramente en la figura 6A. La curva de sustentación de la pala de rotor limpia con el generador de vórtices de la invención se desplaza a valores de coeficiente de sustentación inferiores en comparación con la segunda curva 612 de sustentación que se refiere a la pala de rotor limpia con generadores de vórtices convencionales.

En el caso de una pala de rotor sucia, puede suponerse una capa límite espesa de modo que el generador de vórtices secundario está completamente sumergido en la capa límite, llevando a un generador de vórtices principal sustancialmente inafectado. Por tanto, la curva de sustentación de la pala de rotor sucia no cambia significativamente entre el caso de la provisión de generadores de vórtices convencionales y generadores de vórtices de la invención. En otras palabras, la curva de sustentación de la pala de rotor sucia con generadores de vórtices de la invención es aproximadamente idéntica a la cuarta curva de sustentación que se refiere a una pala de rotor sucia con generadores de vórtices convencionales.

Los números 551 a 555 se refieren a los ángulos de ataque en los que el coeficiente de sustentación es máximo, por tanto en los que se supone la aparición de pérdida. Adicionalmente, se hace referencia al intervalo de ángulos de ataque entre el ángulo 559 de ataque y el ángulo 558 de ataque como la zona de diseño. La zona de diseño se entiende como el intervalo de ángulos de ataque en el que la pala de rotor está diseñada para hacerse funcionar.

La figura 6B muestra la relación de sustentación a resistencia para las cinco curvas de sustentación de la figura 6A. Obsérvese que se supone un valor de resistencia típico para los generadores de vórtices para obtener las curvas de sustentación a resistencia de la figura 6B. Análogamente a la figura 6A, una primera curva 621 de sustentación a resistencia se refiere a una pala de rotor limpia sin generadores de vórtices, una segunda curva 622 de sustentación a resistencia se refiere a una pala de rotor limpia con generadores de vórtices convencionales, una tercera curva 623 de sustentación a resistencia se refiere a una pala de rotor sucia sin generadores de vórtices, y una cuarta curva 624 de sustentación a resistencia se refiere a una pala de rotor sucia con generadores de vórtices convencionales.

Debido a la provisión de los generadores de vórtices de la invención, se obtienen las siguientes curvas de sustentación a resistencia:

- Para el caso de una pala de rotor limpia con generadores de vórtices de la invención, se obtiene la quinta curva 625 de sustentación a resistencia. La quinta curva 625 de sustentación a resistencia tiene un alto valor de sustentación a resistencia en la zona de diseño entre los ángulos 558 y 559 de ataque.

- Para el caso de una pala de rotor sucia con generadores de vórtices de la invención la curva de sustentación a resistencia coincide sustancialmente con la cuarta curva 624 de sustentación a resistencia que representa la pala de rotor sucia con generadores de vórtices convencionales.

Por tanto, puede concluirse que mediante la provisión de generadores de vórtices de la invención en el caso de una pala de rotor limpia se logra una clara ventaja y el aumento en el valor de sustentación a resistencia al menos en la zona de diseño de ángulos de ataque; conferir la diferencia entre la quinta curva 625 de sustentación a resistencia y la segunda curva 622 de sustentación a resistencia. En el caso de una pala de rotor sucia, la curva de sustentación a resistencia con generadores de vórtices de la invención no disminuye significativamente; por tanto, permanece sustancialmente al mismo nivel. Por consiguiente, el rendimiento global de la pala de rotor aumenta.

Las figuras 7 a 11 muestran cinco realizaciones concretas de cómo podría realizarse una pala de rotor con un generador de vórtices principal y un generador de vórtices secundario.

La figura 7 muestra una primera realización. Se visualizan un par de generadores de vórtices que comprende un generador 30 de vórtices principal y un generador 31 de vórtices principal adicional. El generador 30 de vórtices principal y el generador 31 de vórtices principal adicional divergen el uno del otro tal como se ve en la dirección del flujo de aire, es decir tal como se ve desde el borde de ataque hasta el borde de salida, respectivamente.

Adicionalmente, un par de generadores de vórtices secundarios se montan en el lado 252 de aspiración de la pala de rotor. El par de generadores de vórtices secundarios comprende un generador 40 de vórtices secundario y un generador 41 de vórtices secundario adicional.

5 La figura 7 muestra los vórtices que se generan por los generadores de vórtices. Concretamente, se muestra que el generador 30 de vórtices principal puede crear un vórtice, es decir un vórtice 301 principal, que tiene un eje 302 de rotación específico. Del mismo modo, el generador 31 de vórtices principal adicional genera un vórtice 311 principal adicional con un eje de rotación del vórtice 312 principal adicional.

10 Específicamente, el vórtice 301 principal rota en el sentido de las agujas del reloj, mientras que el vórtice 311 principal adicional rota en el sentido contrario a las agujas del reloj (tal como se ve desde el lado aguas abajo de los generadores de vórtices en ambos casos). Por tanto, puede decirse que la dirección de rotación del vórtice 301 principal y el vórtice 311 principal adicional son contrarrotativas.

15 El generador 40 de vórtices secundario también crea un vórtice que se denomina el segundo vórtice 401 con un eje 402 de rotación. Del mismo modo, el generador 41 de vórtices secundario adicional genera un segundo 411 vórtice adicional que comprende un eje de rotación del segundo vórtice 412 adicional. El generador 41 de vórtices secundario adicional y el generador 40 de vórtices secundario convergen el uno hacia el otro en relación con la dirección del flujo de aire.

20 Específicamente, el segundo vórtice 401 rota en el sentido contrario a las agujas del reloj, mientras que el segundo vórtice 411 adicional rota en el sentido de las agujas del reloj (tal como se ve desde el lado aguas abajo de los generadores de vórtices en ambos casos). Por tanto, puede decirse que el segundo vórtice 401 y el segundo vórtice 411 adicional son contrarrotativos entre sí de manera similar al vórtice principal y el vórtice principal adicional.

25 La figura 8 muestra una segunda realización de la invención. La segunda realización es, en principio, similar a la primera realización. Difiere por el hecho de que el par de generadores 40, 41 de vórtices secundarios se sitúan aguas abajo del par de generadores 30, 31 de vórtices principales. Sin embargo, el efecto de cancelación o reducción de los generadores 40, 41 de vórtices secundarios sobre los vórtices generados por los generadores 30, 31 de vórtices principales es similar. Por tanto, también la segunda realización representa un enfoque prometedor para alcanzar el objetivo de la invención.

30 La figura 9 es similar a la segunda realización y representa la tercera realización de la invención. La diferencia de la tercera realización en comparación con la segunda realización es que el par de generadores 40, 41 de vórtices secundarios divergen el uno del otro tal como se ve en la dirección del flujo de aire. Se cree que principalmente los vórtices secundarios de los vórtices principales generados por los generadores 30, 31 de vórtices principales se reducen, o incluso se cancelan, por los segundos vórtices de los generadores de vórtices secundarios.

35 Obsérvese que, un generador de vórtices no sólo puede crear un vórtice, sino que también puede, en principio, crear un vórtice secundario. Esto es generalmente válido para cualquier tamaño del generador de vórtices, pero es más relevante en el contexto de esta invención para los generadores de vórtices principales. Por tanto, se cree que los generadores de vórtices principales no sólo generan vórtices principales, sino también vórtices secundarios.

40 En el caso de la tercera realización tal como se representa en la figura 9, son los vórtices secundarios tal como se generan por los generadores de vórtices principales los que están en interacción con los segundos vórtices tal como se generan por los generadores 40, 41 de vórtices secundarios.

45 En resumen, también la realización tal como se muestra en la figura 9 puede influenciar la actividad o eficiencia de los generadores de vórtices principales en función del espesor de la capa límite. Por tanto, también la tercera realización representa una manera prometedora de diseñar generadores de vórtices de una pala de rotor.

50 La figura 10 representa una cuarta realización de la invención. La cuarta realización representa un par de generadores de vórtices continuos, en el que el generador 40 de vórtices secundario es convergente en, es decir continuo con, el generador 30 de vórtices principal. Del mismo modo, éste es el caso para el generador 41 de vórtices secundario adicional, que converge en el generador 31 de vórtices principal adicional. Una ventaja de la cuarta realización es que sólo comprende la mitad de las piezas que tienen que instalarse sobre la superficie de la pala de rotor y que no tiene, debido a su forma redonda, ningún borde y reborde o similar, en los que pueden crearse vórtices u otras turbulencias.

55 Finalmente, la figura 11 muestra una quinta realización de la invención. En este caso, también se proporciona una disposición de generadores de vórtices continua. Los generadores 40, 41 de vórtices secundarios se conforman como un deflector de vórtices que empuja los vórtices lejos de la superficie de la pala de rotor. Por consiguiente, esto también lleva a una re-energización de la capa límite. La característica clave de la quinta realización es que, a diferencia del estado de la técnica, este deflector 40, 41 de vórtices depende fuertemente, con respecto a su eficiencia o actividad, del espesor de la capa límite.

65

Por tanto, también la quinta realización puede cambiar significativamente la relación de sustentación a resistencia en el caso de una pala de rotor limpia, pero dejar el valor de sustentación a resistencia de la pala de rotor al mismo nivel en comparación con generadores de vórtices convencionales si la parte de una superficie está sucia.

**REIVINDICACIONES**

1. Pala (20) de rotor de una turbina (10) eólica, en la que la pala (20) de rotor comprende
  - 5 - un generador (30) de vórtices principal que está configurado para generar un vórtice (301) principal, y
  - un generador (40) de vórtices secundario que está configurado para generar un segundo vórtice (401), en la que
  - 10 - la altura del generador (30) de vórtices principal es superior a la altura del generador (40) de vórtices secundario,

caracterizada porque

  - 15 el generador (30) de vórtices principal y el generador (40) de vórtices secundario están configurados y dispuestos de tal modo entre sí que
  - 20 - para un espesor (52) de capa límite que es inferior a la altura del generador (40) de vórtices secundario, el generador (40) de vórtices secundario reduce, en particular neutraliza, el impacto del generador (30) de vórtices principal en la sustentación de la pala (20) de rotor, y
  - para un espesor (52) de capa límite que es superior a la altura del generador (40) de vórtices secundario, la sustentación de la pala (20) de rotor está sustancialmente inafectada por la presencia del generador (40) de vórtices secundario.
- 25 2. Pala (20) de rotor según la reivindicación 1, en la que el generador (30) de vórtices principal y el generador (40) de vórtices secundario se sitúan en el lado (252) de aspiración de la pala (20) de rotor.
- 30 3. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el generador (30) de vórtices principal y el generador (40) de vórtices secundario se sitúan sustancialmente en la misma posición con respecto a la envergadura de la pala (20) de rotor.
- 35 4. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que la distancia entre el generador (30) de vórtices principal y el generador (40) de vórtices secundario es inferior al 10%, en particular inferior al 5%, incluso más particularmente inferior al 2% de la longitud de cuerda de la pala (20) de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador (30) de vórtices principal.
- 40 5. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el generador (30) de vórtices principal se sitúa entre el 5% y el 60% de la longitud de cuerda de la pala (20) de rotor, tal como se mide desde el borde (241) de ataque de la pala (20) de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador (30) de vórtices principal.
- 45 6. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que
  - el generador (30) de vórtices principal se sitúa entre el 50% y el 100% de la envergadura (26) de la pala (20) de rotor, tal como se mide desde la raíz (211) de la pala (20) de rotor; y
  - 50 - el generador (30) de vórtices principal se sitúa entre el 20% y el 55% de la longitud de cuerda de la pala (20) de rotor, tal como se mide desde el borde (241) de ataque de la pala (20) de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador (30) de vórtices principal.
- 55 7. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que
  - el generador (30) de vórtices principal se sitúa entre el 5% y el 50% de la envergadura (26) de la pala (20) de rotor, tal como se mide desde la raíz (211) de la pala (20) de rotor; y
  - 60 - el generador (30) de vórtices principal se sitúa entre el 5% y el 40% de la longitud de cuerda de la pala (20) de rotor, tal como se mide desde el borde (241) de ataque de la pala (20) de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador (30) de vórtices principal.
- 65 8. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que
  - el generador (30) de vórtices principal tiene una altura máxima entre el 0,2% y el 4%, preferiblemente entre el 0,3% y el 1%, de la longitud de cuerda de la pala (20) de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador (30) de vórtices principal; y/o

- el generador (30) de vórtices secundario tiene una altura máxima entre el 0,1% y el 1%, preferiblemente entre el 0,1% y el 0,5%, de la longitud de cuerda de la pala (20) de rotor en la posición con respecto a la envergadura del generador (30) de vórtices principal.

- 5 9. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que
- 10 - la pala (20) de rotor comprende un generador (31) de vórtices principal adicional, por tanto el generador (30) de vórtices principal y el generador (31) de vórtices principal adicional construyen un par de generadores de vórtices principales, y
- la pala (20) de rotor comprende un generador (41) de vórtices secundario adicional, por tanto el generador (40) de vórtices secundario y el generador (41) de vórtices secundario adicional construyen un par de generadores de vórtices secundarios.
- 15 10. Pala (20) de rotor según la reivindicación 9, en la que el generador (30) de vórtices principal y el generador (31) de vórtices principal adicional divergen el uno del otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección (24) de borde de ataque de la pala (20) de rotor hasta la sección (23) de borde de salida de la pala (20) de rotor.
- 20 11. Pala (20) de rotor según la reivindicación 9, en la que el generador (30) de vórtices principal y el generador (31) de vórtices principal adicional convergen el uno hacia el otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección (24) de borde de ataque de la pala (20) de rotor hasta la sección (23) de borde de salida de la pala (20) de rotor.
- 25 12. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones 9 a 11, en la que el generador (40) de vórtices secundario y el generador (41) de vórtices secundario adicional convergen el uno hacia el otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección (24) de borde de ataque de la pala (20) de rotor hasta la sección (23) de borde de salida de la pala (20) de rotor.
- 30 13. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones 9 a 11, en la que el generador (40) de vórtices secundario y el generador (41) de vórtices secundario adicional divergen el uno del otro en la dirección con respecto a la cuerda desde la sección (24) de borde de ataque de la pala (20) de rotor hasta la sección de borde (23) de salida de la pala (20) de rotor.
- 35 14. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el generador (40) de vórtices secundario se sitúa aguas arriba del generador (30) de vórtices principal.
- 40 15. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el generador (30) de vórtices principal y el generador (40) de vórtices secundario se fusionan entre sí, de modo que el generador (30) de vórtices principal y el generador (40) de vórtices secundario construyen un único dispositivo.
- 45 16. Pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el generador (40) de vórtices secundario está configurado como un deflector de vórtices para guiar el vórtice (301) principal lejos de la superficie de la pala (20) de rotor.
17. Turbina (10) eólica que comprende al menos una pala (20) de rotor según una de las reivindicaciones anteriores.

FIG 1

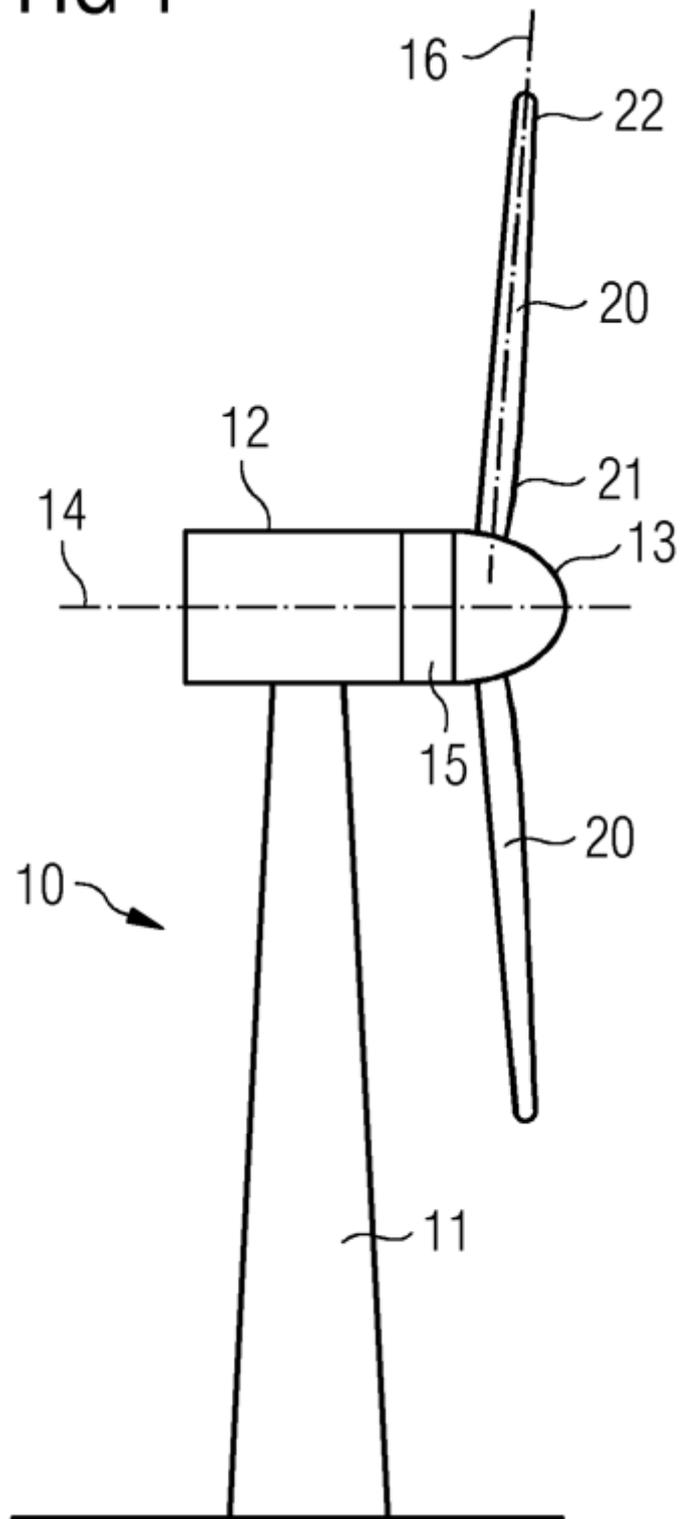


FIG 2

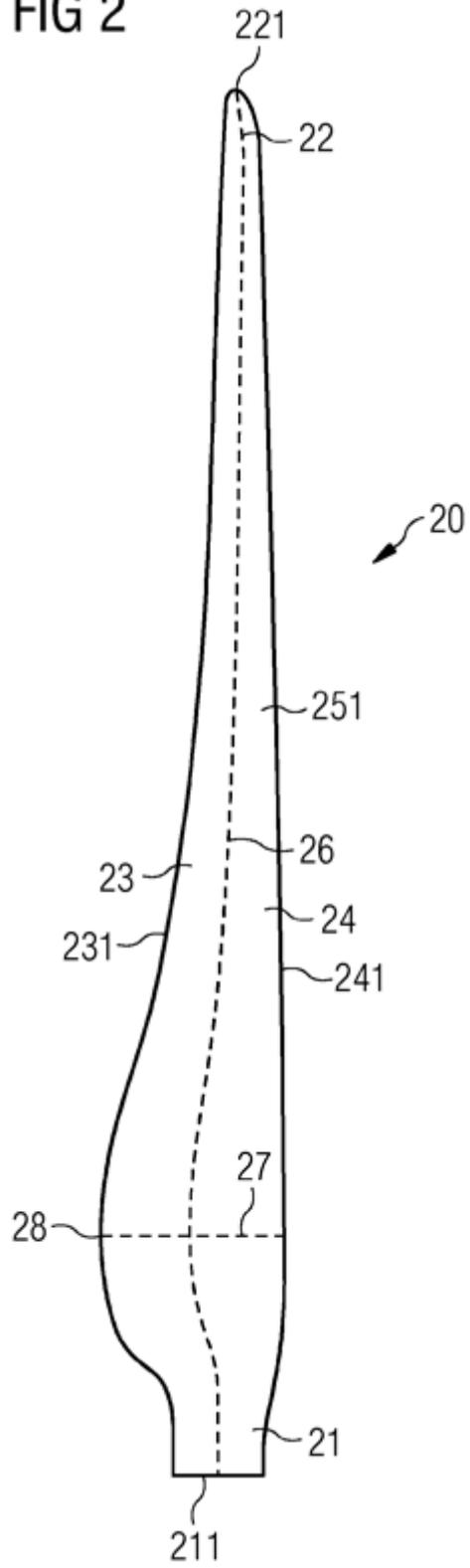


FIG 3

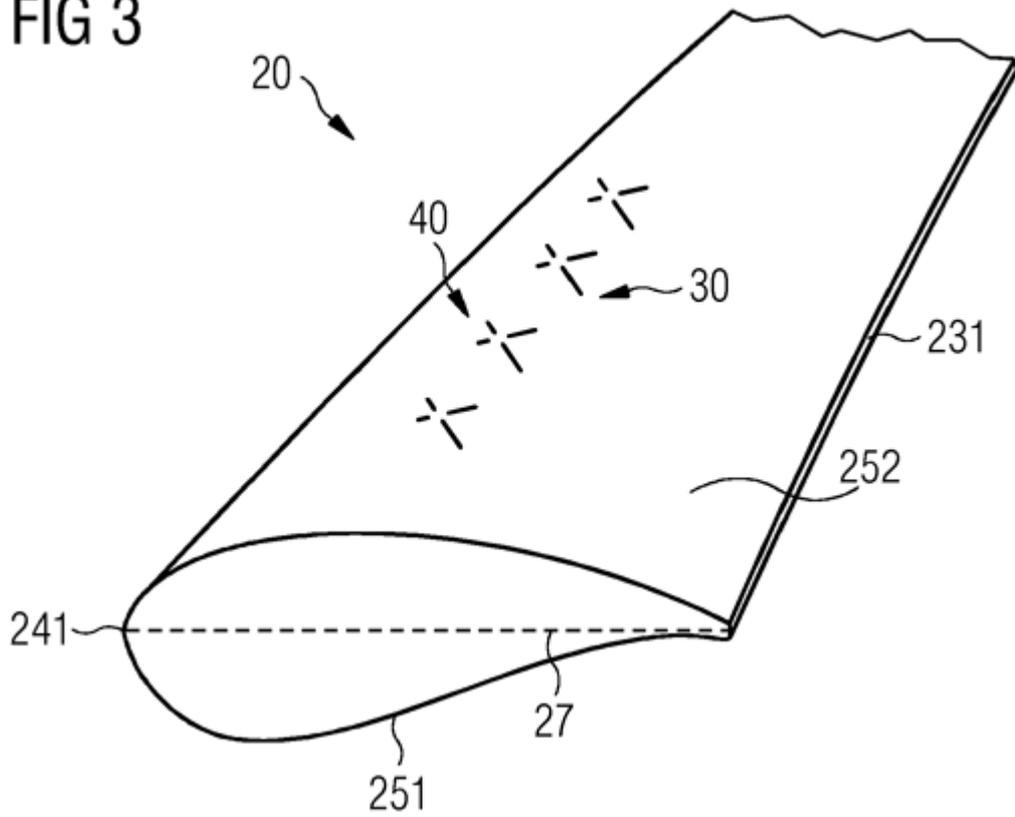
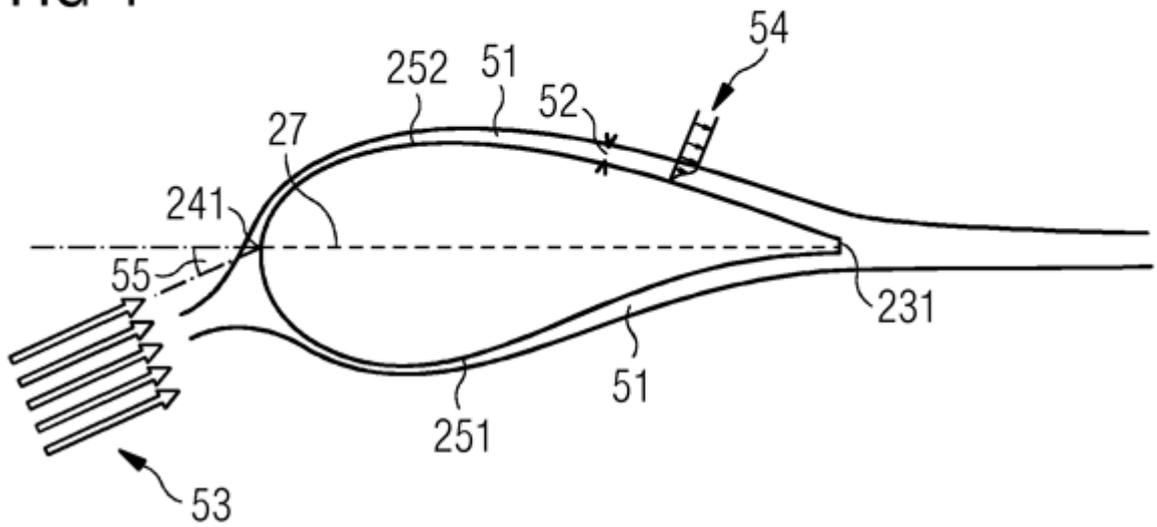


FIG 4



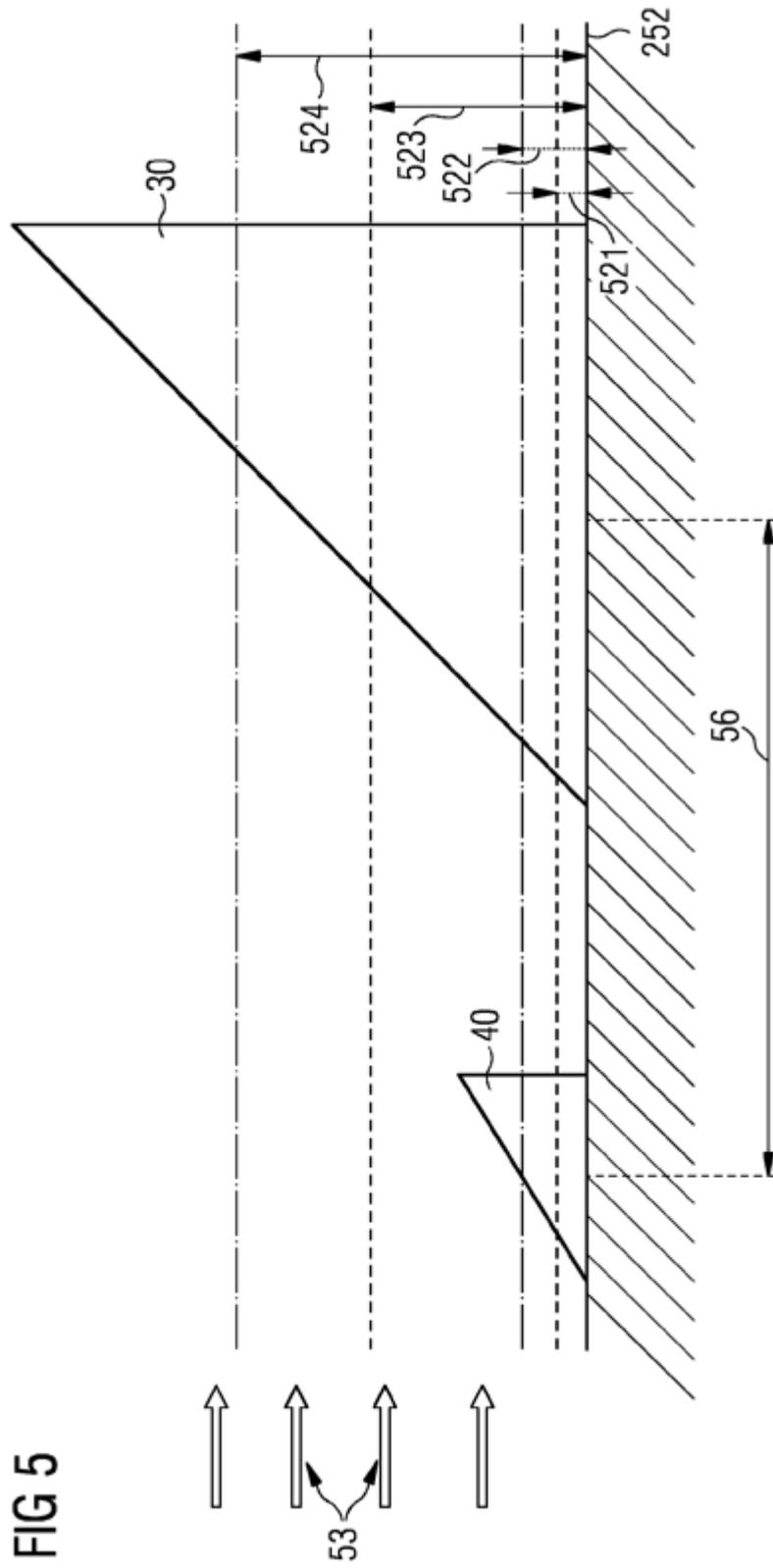


FIG 6A

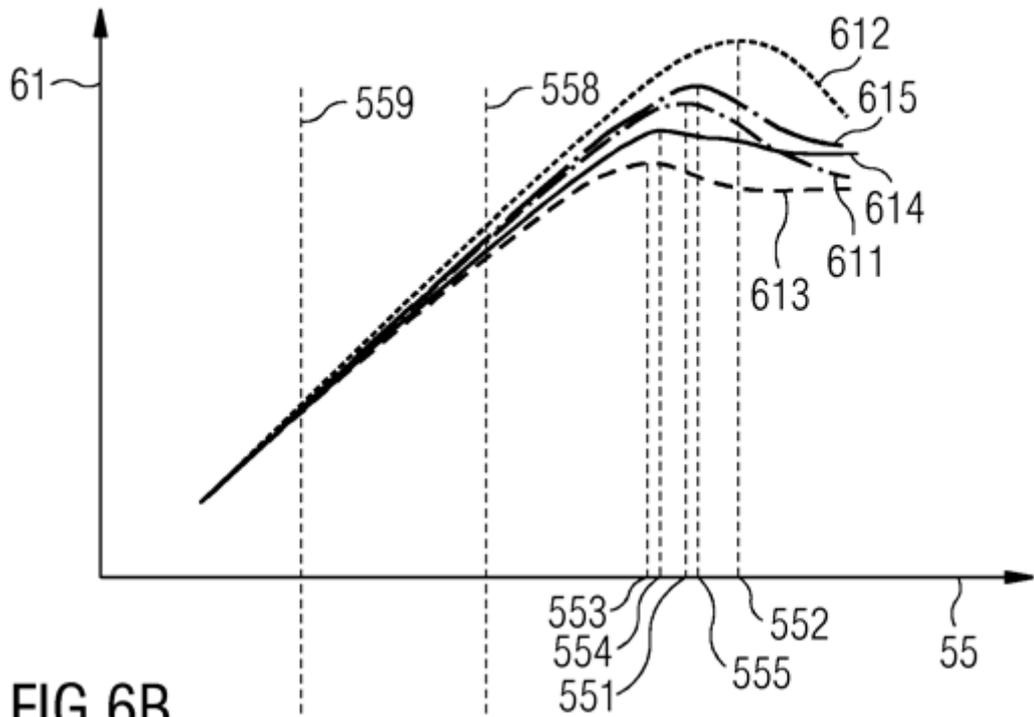


FIG 6B

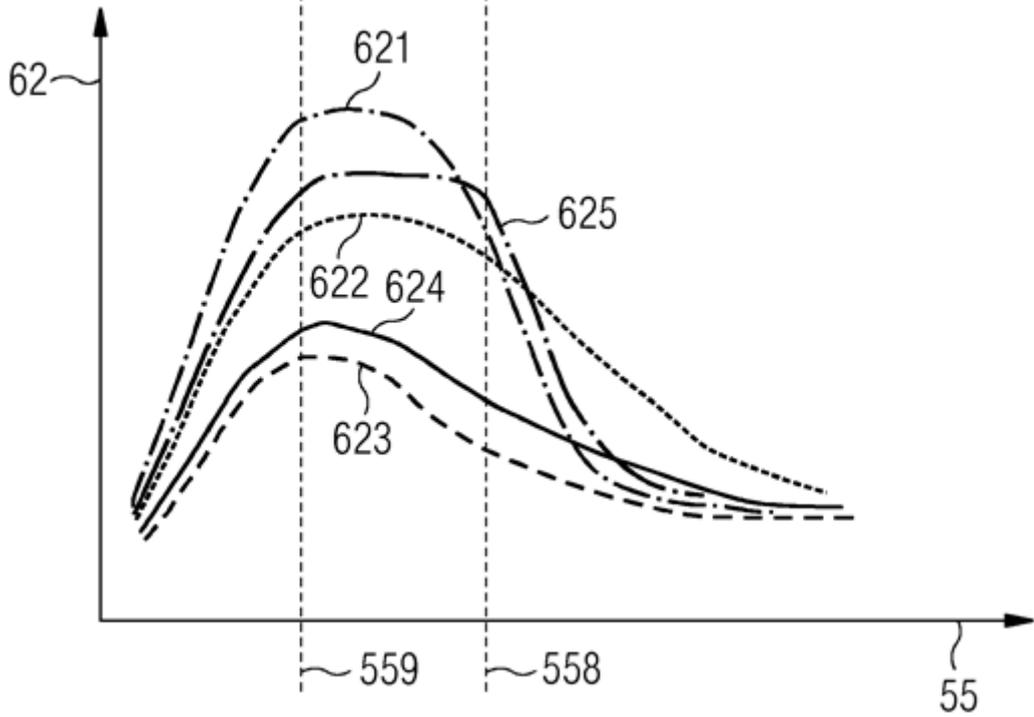


FIG 7

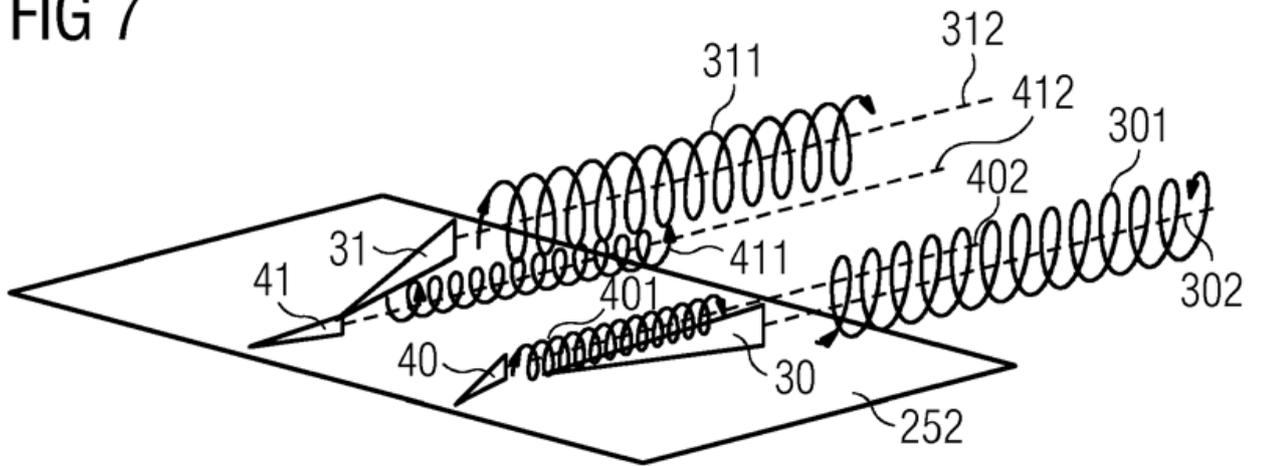


FIG 8

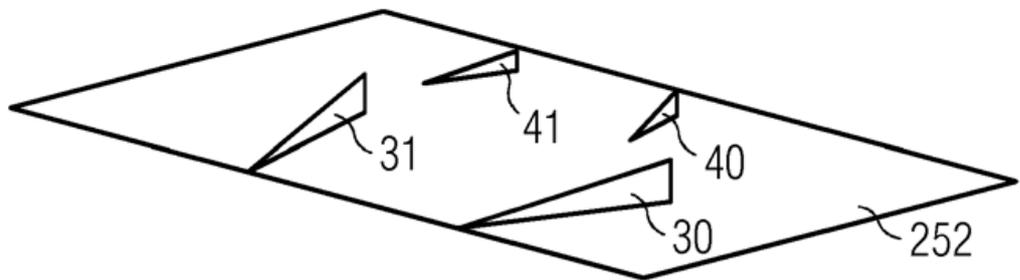


FIG 9

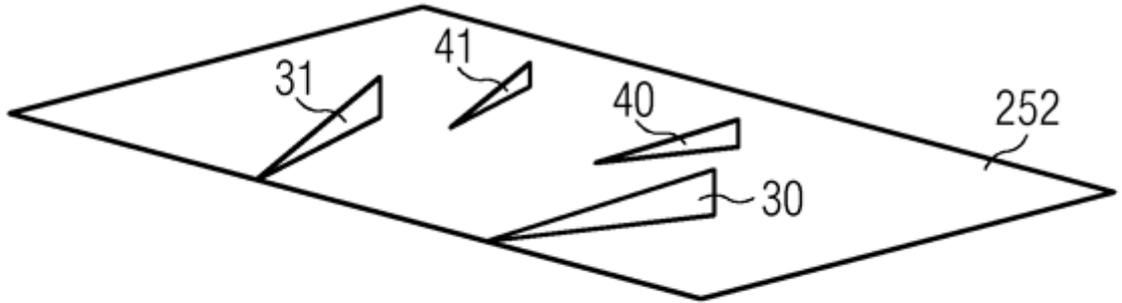


FIG 10

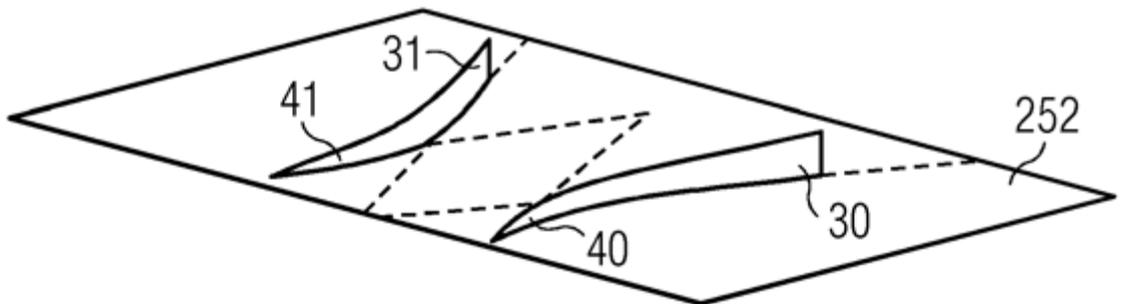


FIG 11

