

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 679 128**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.12.2013 PCT/EP2013/075647**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.06.2014 WO14086919**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.12.2013 E 13815696 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.04.2018 EP 2929178**

54 Título: **Borde de fuga de pala de rotor**

30 Prioridad:

**07.12.2012 DE 102012023895**  
**21.02.2013 DE 102013202881**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**22.08.2018**

73 Titular/es:

**WOBEN PROPERTIES GMBH (100.0%)**  
**Borsigstrasse 26**  
**26607 Aurich, DE**

72 Inventor/es:

**ALTMIKUS, ANDREE y**  
**KAMRUZZAMAN, MOHAMMAD**

74 Agente/Representante:

**ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María**

**ES 2 679 128 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

Borde de fuga de pala de rotor

- 5 La invención se refiere a la configuración del borde de fuga de una pala de rotor de una instalación de energía eólica o un procedimiento para el cálculo de un borde de fuga a fabricar. Además, la presente invención se refiere a un borde de fuga para una pala de rotor y la invención se refiere a una pala de rotor con un borde de fuga. Además, la presente invención se refiere a una instalación de energía eólica con al menos una pala de rotor con un borde de fuga.
- 10 Instalaciones de energía eólica se conocen en general y la figura 1 muestra una instalación de energía eólica conocida. El diseño de la pala de rotor o de las palas de rotor es un aspecto importante para la eficiencia de la instalación de energía eólica. Junto a la planta básica de la pala de rotor, el borde de fuga de la pala de rotor también tiene una influencia en el comportamiento de la pala de rotor.
- 15 En este contexto también se han propuesto ya bordes de fuga en forma de dientes de sierra o bordes de fuga con un desarrollo dentado con varias puntas. Pero la previsión de un borde de fuga semejante en forma de dientes de sierra puede ser costosa y existe el peligro de que la previsión de un borde de fuga dentado o borde de fuga en forma de dientes de sierra provoque un coste que no produce un efecto en una proporción adecuada.
- 20 Por el documento EP 0 652 367 A1 se conoce configurar el borde de fuga en forma de dientes de sierra en la dirección longitudinal del larguero principal de la pala de rotor. De este modo se puede conseguir una reducción del ruido.
- 25 Por el documento EP 1 314 885 B1 se conoce configurar el borde de fuga en forma de dientes de sierra y simultáneamente de forma elástica flexible en la dirección longitudinal del larguero principal de la pala de rotor. Con ello se debe conseguir un aumento del par de fuerzas que ejerce la pala de rotor sobre el generador.
- 30 El documento US 2003/0175121 A1 se considera como el estado de la técnica más próximo y muestra una pala de rotor de instalación de energía eólica con un borde de fuga dentado, presentando las puntas una altura y una distancia.
- 35 La presente invención tiene por ello el objetivo de direccionar al menos uno de los problemas arriba mencionados. En particular se debe proponer una solución que aumente la eficacia de una pala de rotor de una instalación de energía eólica.
- 40 El objetivo de la invención es aumentar aún más en particular la efectividad de una pala de rotor sin incremento de los efectos sonoros. Al menos se debe crear una solución alternativa.
- 45 Para ello se propone una pala de rotor, cuyo borde de fuga está configurado en forma de dientes de sierra en la dirección longitudinal del larguero principal de la pala de rotor, dependiendo la distancia y/o longitud funcionalmente de las condiciones de afluencia locales en el corte de pala y del espesor de capa límite turbulenta que se desarrolla por ello o de las escalas de longitud de coherencia de las bolas de turbulencia que se configuran aquí gracias a sus fluctuaciones de presión. Preferentemente la longitud de los dientes individuales se debe modificar de diente a diente.
- 50 Por consiguiente, se propone un borde de fuga en forma de dientes de sierra, que presente correspondientemente varias puntas o dientes, lo que aquí se usa de forma sinónima, que terminan en pico desde la pala de rotor esencialmente hacia detrás, a saber, el lado opuesto al movimiento de rotación previsto de la pala de rotor. Correspondientemente los espacios intermedios respectivamente entre dos puntas o dientes terminan en pico en la dirección hacia la pala de rotor. Tales puntas presentan una altura, a saber, la distancia entre la línea base, en la que finalizan los espacios intermedios que terminan en pico, y la línea de crestas, en la que finalizan las puntas que terminan en pico, como la línea de crestas que conecta los picos de punta. Esta línea base y esta línea de crestas pueden ser líneas curvadas y pueden presentar una distancia modificable entre sí a lo largo de la longitud de pala.
- 55 La longitud de los dientes individuales también se puede designar como altura de los dientes o altura de las puntas, es decir, altura de punta.
- 60 Según la invención se propone un procedimiento para el cálculo de un borde de fuga a fabricar según las reivindicaciones 1 o 6. Por lo tanto se propone una pala de rotor de instalación de energía eólica de un rotor

aerodinámico de una instalación de energía eólica según las reivindicaciones 7 u 8. La pala de rotor presenta posiciones radiales en referencia a este rotor, en el que se debe insertar o se inserta la pala de rotor. Una posición radial del borde de fuga y de la pala de rotor se refiere por consiguiente siempre a este rotor, es decir, a la distancia respecto al eje de giro del rotor. Este modo de observación también se toma por base para una pala de rotor todavía no montada en primer lugar. Una pala de rotor de una instalación de energía eólica está adaptada básicamente a una instalación de energía eólica especial, en particular al rotor que presenta esta pala de rotor y habitualmente otras dos palas de rotor.

La pala de rotor presenta para ello respecto a cada posición radial un perfil de pala local. En otras palabras, cada corte de pala presenta un perfil de pala propio en función de su posición radial.

El borde de fuga presenta un desarrollo dentado con varias puntas, lo que también se puede designar como en forma de dientes de sierra. Pero las puntas individuales tienen en este caso básicamente simetría especular, es decir, presentan dos flancos oblicuos, aproximadamente iguales. En particular estos dientes no presentan un flanco perpendicular y uno oblicuo, sino dos flancos oblicuos.

Cada punta presenta una altura de punta y una anchura de punta. La altura de punta es la distancia ya descrita entre una línea base y una línea de crestas. La anchura de punta es la distancia entre el extremo correspondiente de los dos espacios intermedios que terminan en pico, que delimitan la punta. En una primera aproximación, la anchura de la punta es la distancia entre su pico de punta y el pico de punta de una punta adyacente. Las puntas de un borde de fuga propuesto en forma de puntas se diferencian entre sí, sin embargo, esta diferencia es comparablemente pequeña para puntas directamente adyacentes.

Se propone que la altura de punta y además o alternativamente la anchura de punta se calculen en función de su posición radial. Por consiguiente resulta un cálculo propio para cada punta en función de su posición radial. Como resultado se origina de este modo un borde de fuga con muchas puntas, que se han calculado individualmente y pueden presentar correspondientemente tamaños individuales, que se modifican en particular de forma casi continua a lo largo de la longitud de la pala de rotor o con posición radial creciente o decreciente.

La altura de punta y además o alternativamente la anchura de punta se calculan preferentemente en función del perfil de pala local de su posición radial. Por consiguiente respecto a una punta se tiene en cuenta el perfil de pala de su posición radial, es decir, el perfil del corte de pala respecto a esta posición radial.

Según una configuración se propone que la altura de punta sea mayor que la anchura de punta y la anchura de punta se calcule a partir de la altura de punta. Para este cálculo la proporción entre la altura de punta y anchura de punta se sitúa en el rango de 0,5 a 10, en particular 3 a 5. Preferentemente tiene aproximadamente el valor 4, en particular el valor 2. La anchura de punta  $\lambda$  se calcula por consiguiente a partir de la altura de punta  $H$  según la fórmula:

$$\lambda = H/k_n \text{ con } k_n = [0,5 \dots 10], \text{ en particular } k_n = 2$$

La punta es, por consiguiente, proporcionalmente esbelta y en particular termina en un ángulo agudo. Una proporción en este rango ha demostrado ser especialmente ventajosa respecto a la minimización de ruido en cualquier caso para tales puntas calculadas individualmente. Especialmente luego, cuando la altura de punta respecto a la anchura de punta tiene una relación fija, es equivalente si se calcula en primer lugar la altura de punta y luego a partir de ella la anchura de punta o si se calcula primeramente la anchura de punta y luego a partir de ella la altura de punta.

Preferentemente las puntas presentan anchuras de punta diferentes entre sí y/o alturas de punta diferentes y se diferencian de este modo individualmente unas de otras.

Preferentemente el cálculo está diseñado de modo que, en los bordes de fuga para emplazamientos de viento débil, la altura de punta de las puntas referido a la profundidad de perfil decrece con radio creciente de la posición radial de sus puntas, mientras que, en los bordes de fuga de punta para emplazamientos de viento fuerte, la altura de punta de las puntas referido a la profundidad de perfil crece con radio creciente de la posición radial de sus puntas. Esto resulta del diseño de pala específico de la clase de viento.

En el sector de la energía eólica es habitual clasificar los emplazamientos según la clase de viento. En el caso de emplazamientos de viento fuerte, que están presentes en particular cerca de la costa o en emplazamientos offshore, se debe contar básicamente con viento más fuerte. La instalación de energía eólica, en particular las palas de rotor

se diseñan correspondientemente, a saber, de modo que puedan resistir vientos fuertes y a este respecto también se pueda hacer funcionar la instalación de energía eólica, pudiéndose extraer en el caso de vientos débiles menos energía del viento que lo que podría una instalación de energía eólica para emplazamientos de viento débil.

- 5 Correspondientemente las instalaciones de energía eólica para emplazamientos de viento débil que predominan en particular en áreas de tierra, están diseñadas de modo que no deben resistir vientos fuertes o al menos no en el funcionamiento corriente y al menos se deberían limitar en el caso de intensidades del viento con las que una instalación de energía eólica para un emplazamiento de viento fuerte todavía no se debería limitar. Para ello una instalación de energía eólica semejante para ubicaciones de viento débil puede extraer en el caso de viento débil  
10 más energía de éste. Tales subdivisiones le son familiares al especialista y en ocasiones efectúa otras subdivisiones.

Para ello según una forma de realización se propone que el cálculo esté configurado de modo que se reducen las alturas de puntas referido a las profundidades de perfil para las palas de rotor de instalaciones de energía eólica  
15 para emplazamientos de viento débil con radio creciente. Por ejemplo, en un borde de fuga para un emplazamiento de viento débil, el aumento de la modificación de la altura de punta H puede ser

$$\frac{\partial(H/c)}{\partial(r/R)} = [-15 \dots -25], \text{ en particular} = -20$$

- 20 para un radio normalizado de 0,6 a 0,8 referido al radio máximo. Así está presente una reducción de la altura de punta y aquí en el contador se considera la altura de punta H referido a la profundidad de perfil c y en el contador el radio r referido al radio máximo de la pala de rotor R. Entre  $r/R = 0,75$  y  $r/R = 0,9$  la altura de punta referido a la profundidad de perfil presenta preferentemente un desarrollo constante, a fin de caer primeramente en el  $r/R = 0,9$  de nuevo hacia el radio máximo R. Esto también se clarifica en la figura 10.

- 25 Para un borde de fuga para una instalación de energía eólica de la misma clase de potencia, pero para un emplazamiento de viento fuerte puede ser positiva la relación correspondiente y ascender a +20, ya que crecer la altura de punta, que también se puede designar como profundidad de punta. La altura de punta alcanza con  $0,85r/R$  un máximo y cae luego intensamente de forma monótona cayendo hacia la punta de pala.

- 30 Un cálculo semejante del borde de fuga dependiente de la clase de viento considera diferentes problemas que aparecen según la clase de viento.

- Preferentemente la altura de punta y/o la anchura de punta se calcula a través de una relación polinomial en función de su radio local, preferentemente a través de una relación polinomial de cuarto a octavo orden, en particular quinto o sexto orden, en particular sexto orden para emplazamientos de viento débil y quinto orden para emplazamientos de viento fuerte. Los desarrollos característicos de las alturas de las puntas se pueden diferenciar básicamente entre los emplazamientos de viento débil y emplazamientos de viento fuerte. Esto se puede tener en cuenta en tanto que se usen polinomios de diferente grado para emplazamientos de viento débil y emplazamientos de viento fuerte.

- 40 Preferentemente el cálculo se realiza en función de uno o varios espectros sonoros a esperar. Además o alternativamente el cálculo se realiza en función de uno o varios puntos de funcionamiento. Por consiguiente se propone tener en cuenta concretamente el comportamiento de la instalación de energía eólica en al menos un punto de funcionamiento. Un punto de funcionamiento semejante es en este sentido un punto de funcionamiento  
45 estacionario, idealizado, que se define en particular por una velocidad del viento, una velocidad de giro del rotor de la instalación de energía eólica y/o una potencia generada de la instalación de energía eólica. El ángulo de ataque de la pala de rotor respecto al viento también puede influir en este punto de funcionamiento.

- Para al menos un punto de funcionamiento semejante se determina ahora un espectro sonoro a esperar, a saber, un nivel sonoro o una intensidad sonora o un nivel de ruido en función de la frecuencia de este sonido. En este caso en general resulta un desarrollo dependiente de la frecuencia con un máximo. Se recurre a este espectro para el cálculo. En particular de este espectro se tiene en cuenta la frecuencia en la que aparece el máximo. Esta frecuencia se puede denominar frecuencia de cresta o frecuencia de pico y también se designa con frecuencia con el término "Peakfrequenz (frecuencia de cresta)" en el uso del idioma alemán. Si ahora se modifica el punto de funcionamiento,  
50 también se ajusta un nuevo espectro y por consiguiente una nueva frecuencia de cresta. Así, para cada punta individualmente, se pueden registrar en varios puntos de funcionamiento los espectros de frecuencia y por

consiguiente los valores de frecuencia de cresta. Para el cálculo de las puntas en cuestión se usa una frecuencia de cresta y para ello se puede seleccionar una de las varias frecuencias de cresta que se han determinado. La frecuencia de cresta usada también se puede formar como valor promedio a partir de las varias frecuencias de cresta registradas. El registro y la evaluación de los espectros de frecuencia también se explica a modo de ejemplo en la figura 6.

Para el registro de estos espectros de frecuencia y finalmente de las frecuencias de cresta correspondiente se pueden efectuar por ejemplo estudios en un canal de viento. Igualmente existen métodos de simulación para determinar tales espectros y frecuencias de cresta.

El punto de funcionamiento ajustado y cuando proceda también la modificación de los puntos de funcionamiento tomar por base en particular puntos de funcionamiento reales. En este caso trabajan muchos procedimientos de control de una instalación de energía eólica, de modo que a cada velocidad del viento está asociado básicamente un punto de funcionamiento. Al menos se puede partir de ello de forma simplificada, cuando efectos como diferentes turbulencias, viento muy fuerte, viento ascendente muy fuertemente o descendente muy fuertemente quedan desatendidos de forma simplificada. Preferentemente por consiguiente se seleccionan dos o tres o cuatro puntos de funcionamiento concretos a partir del rango de velocidad del viento, que debe cubrir la instalación de energía eólica en cuestión.

En el cálculo de la punta correspondiente, en particular altura de punta, también está integrado preferentemente la velocidad de afluencia efectiva, que está asociada al punto de funcionamiento correspondiente. La velocidad de afluencia efectiva o local  $V_{eff}$  es aquella velocidad que se ajusta desde el punto de vista de la pala de rotor en el punto en cuestión, es decir, en la posición radial en cuestión, a partir de la adición vectorial de la velocidad del viento y de la velocidad de movimiento de la pala de rotor en este punto.

Preferentemente el cálculo se realiza en función del perfil local correspondiente. El perfil está integrado por consiguiente en el cálculo o en el caso de estudios en el canal de viento también puede estar integrado en las mediciones. La velocidad de afluencia local también puede depender del perfil y/o de la posición de la pala de rotor y por consiguiente de la posición del perfil.

Según la invención el cálculo de la altura de punta  $H$  de una posición radial predeterminada se realiza a partir de la velocidad de afluencia  $V_{eff}$  correspondiente, de la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  correspondiente del espectro sonoro de un punto de funcionamiento y en función de un factor  $k$  predeterminado, que se puede determinar empíricamente y por ejemplo también puede estar presente como valor empírico. Basado en ello se calcula la altura de punta  $H$  luego según la fórmula:

$$H = k \cdot \frac{V_{eff}}{f_{peak}}$$

Este cálculo se basa en la reflexión siguiente. La altura de punta  $H$  se calcula a partir de la escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p,3}$  o  $\Lambda_{p3}$  de la fluctuación de presión turbulenta en el sentido y con la ayuda del modelo de Corcos [3] y usando un factor constante  $c_2$  según la siguiente igualdad:

$$H = c_2 \cdot \Lambda_{p3},$$

El factor  $c_2$  se puede determinar empíricamente, por ejemplo, a partir de mediciones de test. Para  $c_2$  también se pueden usar valores empíricos.  $\Lambda_{p3}$  es una función del radio del rotor en el que se inserta la pala de rotor. La escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$  se puede calcular a partir de la velocidad de convección  $U_c$  y la frecuencia de cresta  $f_{peak}$ , que también se designa en el ámbito idiomático alemán como *peakfrequenz* (frecuencia de cresta), según la fórmula siguiente:

$$\Lambda_{p3} = \frac{U_c}{(2 \cdot \pi \cdot f_{peak})}$$

La velocidad de convección  $U_c$  se calcula a partir de la velocidad de afluencia efectiva o local  $V_{eff}$  en el corte de pala a través de la constante  $c_1$ , que se puede determinar de forma empírica mediante ensayos o simulaciones y en particular tiene el valor 0,7 ( $c_1 = 0,7$ ), según la igualdad:

$$U_c = c_1 \cdot V_{eff}.$$

La velocidad de afluencia efectiva o local  $V_{eff}$  se calcula con ayuda de un método de momento del elemento de pala, que también se conoce bajo la abreviatura BEM (de la designación inglesa "Blade Element Momentum method").

En este cálculo entran el ángulo de ajuste de la pala de rotor, la velocidad de giro del rotor, la velocidad del viento así como el radio concreto y el perfil de pala del corte de pala en la posición radial y su ángulo de torsión en la pala de rotor, para el que se debe calcular la velocidad de afluencia  $V_{eff}$  y por consiguiente la altura de punta H. El cálculo se realiza por consiguiente para un punto de funcionamiento concreto.

La frecuencia de cresta  $f_{peak}$  es la frecuencia en la que para el punto de funcionamiento estudiado y la posición radial estudiada en la pala de rotor, referido al rotor, aparece o se debe esperar el mayor nivel sonoro. Así es la frecuencia en la que un espectro sonoro del borde de fuga o espectro de ruido del borde de fuga presenta su máximo.

La frecuencia de cresta  $f_{peak}$  se puede determinar empíricamente, por ejemplo, mediante estudios dedicados en el canal de viento, por ejemplo, con sensores de presión dinámicos en el borde de fuga del objeto de ensayo del canal de viento, o se puede calcular con una simulación numérica aeroacústica para el número de Reynolds local Re. El número de Reynolds local resulta del ángulo de afluencia local  $\alpha$ , la velocidad de afluencia local y la profundidad de perfil local, y se puede obtener también como resultado mediante el denominado BEM. Además está integrada la geometría de perfil bidimensional del corte de pala local.

La altura de punta H se calcula por consiguiente a partir de la siguiente proporción entre la velocidad de afluencia  $V_{eff}$  y la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  del espectro sonoro según la fórmula:

$$H = \frac{c_2 \cdot c_1 \cdot V_{eff}}{(2 \cdot \pi \cdot f_{peak})} = \frac{k \cdot V_{eff}}{f_{peak}}$$

con

$$k = \frac{c_2 \cdot c_1}{(2 \cdot \pi)}.$$

A este respecto  $V_{eff}$  y  $f_{peak}$  dependen del ángulo de ataque de la pala de rotor, de la velocidad de giro del rotor, de la velocidad del viento así como del radio concreto y del perfil de pala del corte de pala de la posición radial en la pala de rotor, respecto a la que se debe determinar la altura de punta H.

Además, según la invención se propone un borde de fuga. Un borde de fuga semejante se destaca por un desarrollo dentado, que presenta puntas con altura de punta y anchura de punta, dependiendo la altura de punta y/o la anchura de punta de su posición radial y/o del perfil de pala local de su posición radial.

Con ello resultan las relaciones, explicaciones y ventajas según al menos una forma de realización del procedimiento descrito para el cálculo de un borde de fuga a fabricar.

Preferentemente se propone un borde de fuga, que se calcula con un procedimiento según una de las formas de realización descritas arriba.

Un borde de fuga para una pala de rotor también se puede designar como borde de fuga de pala de rotor.

Según la invención el cálculo de la altura de punta H respecto a una posición radial predeterminada se realiza a partir de la escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$ , correspondiente teniendo en cuenta un factor constante  $c_2$  con la fórmula:

50

$$H = c_2 \cdot \Lambda_{p3}.$$

Por consiguiente para la punta del radio en cuestión la escala de longitud de coherencia de mismo radio está

- integrada en el cálculo. La escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$  es una función dependiente del radio del rotor y correspondientemente para las alturas de punta del borde de fuga resulta una función dependiente del radio. Mediante el factor constante  $c_2$  esta función se puede ampliar o empequeñecer proporcionalmente en su amplitud, pero por lo que el desarrollo básico de esta función no se modifica. Mediante una curva con un  $c_2$  muy pequeño y otra curva con un  $c_2$  muy grande se puede fijar un rango en la que se puede seleccionar una función ventajosa para las alturas de punta.
- 5 Según la invención se propone una pala de rotor para una instalación de energía eólica con un borde de fuga según al menos una forma de realización descrita.
- 10 Además, se propone una instalación de energía eólica con una, en particular tres palas de rotor semejantes.
- A continuación la invención se explica más en detalle a modo de ejemplo mediante ejemplos de realización en referencia a las figuras adjuntas.
- 15 La figura 1 muestra una instalación de energía eólica esquemática en una vista en perspectiva.
- La figura 2 muestra esquemáticamente una pala de rotor con un borde de fuga con un desarrollo dentado con varias puntas.
- 20 La figura 3 muestra esquemáticamente un fragmento de una pala de rotor en una vista en planta con un contorno esquemático para una instalación de viento fuerte y dibujado a trazos con un contorno divergente de él para una instalación de viento débil.
- 25 La figura 4 muestra esquemáticamente un corte de pala de una pala de rotor con zona de turbulencia representada esquemáticamente.
- La figura 5 muestra esquemáticamente el desarrollo de la altura de punta H según al menos una forma de realización en función del radio.
- 30 La figura 6 muestra espectros de frecuencia en posiciones de radio seleccionadas a modo de ejemplo de una forma de realización.
- La figura 7 muestra parámetros aerodinámicos locales que sirven de base a un cálculo BEM o se calculan con él.
- 35 La figura 8 muestra para una forma de realización la frecuencia de cresta en función del radio.
- La figura 9 muestra en un diagrama distintos desarrollos posibles de la altura de punta H en función del radio para una instalación de viento fuerte.
- 40 La figura 10 muestra en un diagrama distintos desarrollos posibles de la altura de punta H en función del radio para una instalación de viento débil.
- La figura 11 muestra en un diagrama el desarrollo de las alturas de punta, que están normalizadas a las profundidades de perfil locales correspondientes, respecto al radio adimensional para el diseño de viento fuerte y de viento débil.
- 45 Las figuras 12a y 12b muestran un borde de fuga para una instalación de viento fuerte.
- 50 Las figuras 13a y 13b muestran un borde de fuga para una instalación de viento débil.
- La explicación de la invención mediante ejemplos en referencia a las figuras se realiza esencialmente esquemáticamente y los elementos, que se explican en la figura correspondiente, pueden estar exagerados aquí para la mejor visualización y otros elementos estar simplificados. Así, por ejemplo, la figura 1 ilustra una instalación de energía eólica como tal esquemáticamente, de modo que no se puede reconocer el borde de fuga previsto en forma de puntas.
- 55 La figura 1 muestra una instalación de energía eólica 100 con una torre y una góndola 104. En la góndola 104 está dispuesto un rotor 106 con tres palas de rotor 108 y un spinner 110. El rotor 106 se pone en rotación por el viento durante el funcionamiento y de este modo acciona un generador en la góndola 104.
- 60

La figura 2 muestra esquemáticamente una pala de rotor 2 con un borde de fuga de la pala de rotor 1, que también se designa de forma simplificada como borde de fuga. La pala de rotor está fijada según lo previsto en un buje 4, lo que aquí sólo está indicado esquemáticamente, para girarse alrededor de un eje de giro 6 del buje 4.

5

El borde de fuga 1 presenta un desarrollo dentado con varias puntas 8, que están dispuestas unas junto a otras a lo largo de la pala de rotor 2. Este borde de fuga 1 con las puntas 8 está dispuesto aquí aproximadamente sólo en la mitad exterior de la pala de rotor 2. Cada punta presenta una posición radial, que se refiere al eje de giro 6. La primera punta 8 comienza con el radio  $r_1$  y la última punta 8 termina en el radio  $r_2$ , que se corresponde

10

simultáneamente con el radio total R de la pala de rotor 2 referido al eje de giro 6.

Cada punta 8 presenta una altura H que depende del radio r correspondiente. La altura H de las puntas 8 es por consiguiente una función del radio r:

15

$$H = f(r).$$

Correspondientemente la altura de la punta 8 en el caso del radio  $r_1$  es la altura  $H(r_1)$  y la altura H de la última punta es la altura  $H(r_2)$ . La anchura de cada punta 8 está indicada en la figura 2 con la letra griega  $\lambda$ , que igualmente depende del radio r correspondiente y por consiguiente está indicada como  $\lambda(r)$ .

20

Cada punta 8 presenta un pico de punta 10 y entre dos puntas 8 está respectivamente una incisión con un pico de incisión 12. Una línea que conecta los picos de punta 10 se puede designar como línea de crestas 14 y está dibujada a trazos en la fig. 2. Una línea base 16 conecta los picos de incisión 12 y puede representar, según es el caso en el ejemplo ilustrado en la figura 2, una línea posterior de la pala de rotor 2, que formaría un borde de fuga de

25

la pala de rotor 2 si no estuviese presente el borde de fuga 1 dentado mostrado.

La distancia entre la línea de crestas 14 y línea base 16 no es constante e indica respecto al radio r correspondiente la altura H de la punta 8 dispuesta allí. Correspondientemente también se modifica la altura H de las puntas 8 en función del radio local r de la pala de rotor 2. Para el diseño o fijación pueden estar agrupadas varias puntas 8, según indican las anchuras  $B_1$  y  $B_2$  mostradas. El cálculo de las puntas 8, en particular de la altura H de las puntas 8 depende del perfil del corte de pala correspondiente y se dibuja un corte de pala 18 semejante para la ilustración.

30

La anchura  $\lambda$  o  $\lambda(r)$  se puede modificar igualmente con el radio r y presenta en particular en una proporción fija para la altura H de la punta 8 en cuestión. Esta proporción es preferentemente de 2, de modo que la altura H de una

35

punta 8 es por consiguiente dos veces más grande que la anchura  $\lambda$  de la misma punta. Si según otra forma de realización, la proporción entre la altura H y la anchura  $\lambda$  debería ser claramente mayor de 2, en particular puede ser razonable a partir de consideraciones técnicas de fabricación el configurar las puntas 8 actuales de forma rectangular o aproximadamente rectangular, de modo que para el borde de fuga se origine un tipo de estructura de peine o un borde de fuga presente almenas en lugar de puntas.

40

La figura 3 muestra una pala de rotor 2, pero que se puede diferenciar de la pala de rotor 2 de la figura 2. Esta pala de rotor 2 de la figura 3 presenta un borde delantero 20 y un borde de fuga 1, cuyo desarrollo en forma de puntas no está representado aquí por sencillez. Esta pala de rotor 2 con el borde delantero 20 y el borde de fuga 1 ilustra una forma básica de una pala de rotor de una instalación de viento fuerte. Como comparación a ello se dibuja a trazos un

45

borde de fuga 1', que pertenece a una pala de rotor 2 de una instalación de viento débil, es decir, a una instalación de energía eólica para emplazamiento de viento débil. Para la ilustración también se dibuja aquí el eje de giro 6, a fin de ilustrar la dirección de rotación de la pala 2 y clarificar el lado de la pala de rotor 2 dirigido hacia el buje, es decir, hacia el eje de giro 6.

50

En cualquier caso a partir de la representación de la figura 3 se puede reconocer que una pala de rotor de una instalación de viento débil está configurada más esbelta en particular en la zona exterior que una pala de rotor de una instalación de viento fuerte. La figura 3 sólo debe ilustrar esto y se advierte que una pala de rotor de una instalación de viento débil es más larga en la misma clase de potencia de la instalación de energía eólica, es decir, se debe esperar con mayor radio que una pala de rotor de una instalación de viento débil.

55

La figura 4 ilustra las condiciones de flujo en una pala de rotor 2 de una instalación de energía eólica. La figura 4 muestra a este respecto un corte de pala, que por ejemplo puede ser el corte de pala 18 según la figura 2. El viento que afluye 22, que está dibujado aquí sólo como línea, se subdivide en la pala de rotor 2 en la zona de su borde delantero 20 y discurre en primer lugar de forma laminar. En particular en el lado de presión 24 discurre de forma

60

laminar hasta cerca del borde de fuga 1. En el lado de aspiración 26 se forma una capa límite, en la que se pueden



originar remolinos o turbulencias. Con cercanía creciente al borde de fuga crece el espesor de la capa límite. El espesor está dibujado aquí como  $\delta_1$ . Este crecimiento del espesor de capa límite  $\delta_1$  hacia el borde de fuga 1 conduce a que en la zona del borde de fuga 1 se produzcan remolinos o turbulencias correspondientemente mayores. En particular allí en la zona del borde de fuga 1 se pueden encontrar los islotes de turbulencia. Estos islotes de turbulencia se destruyen al menos parcialmente mediante el borde de fuga propuesto en forma de puntas o también se impide la formación. Para ello la inclinación de los flancos de las puntas 8 (según la figura 2) debería estar adaptada a estos islotes de turbulencia. El tamaño de las puntas 8 o de sus espacios intermedios también se puede adaptar a ser posible a estos islotes de turbulencia. Correspondientemente se ha descubierto que las puntas y sus espacios intermedios no deben ser demasiado grandes ni demasiado pequeños. Si son grandes se pueden conservar tales islotes de turbulencia se pueden entre dos puntas. Si las puntas son demasiado pequeñas, sólo tienen una pequeña influencia en los islotes de turbulencia. A este respecto se ha reconocido que los islotes de turbulencia pueden depender en tipo y tamaño del radio de su aparición. Las puntas se adaptan por consiguiente a estos islotes de turbulencia dependientes del radio.

- 15 La figura 5 muestra un desarrollo a modo de ejemplo de la altura H de las puntas 8 de un borde de fuga 1 en función del radio r. El desarrollo mostrado es de una pala de rotor de una instalación de viento fuerte. A este respecto, la altura H aumenta en primer lugar con radio r creciente y cae de nuevo con radio r que sigue creciendo. La curva central H<sub>1</sub> muestra este desarrollo. Además, está representada una curva H<sub>2</sub> que muestra un desarrollo posible muy bajo de la altura H y correspondientemente se muestra una curva H<sub>3</sub>, que muestra correspondientemente un desarrollo de valores muy grandes de la altura H. Estas curvas H<sub>2</sub> y H<sub>3</sub> pueden formar curvas límite, dentro de las cuales se selecciona preferentemente una curva H<sub>1</sub>.

La figura 6 muestra cuatro espectros de frecuencia SPC<sub>1</sub>, SPC<sub>2</sub>, SPC<sub>3</sub> y SPC<sub>4</sub>. Esto son espectros sonoros o espectros de ruido para un punto de funcionamiento de la instalación de energía eólica tomada por base en cuatro posiciones de radio seleccionadas a modo de ejemplo. Estos cuatro espectros de frecuencia SPC<sub>1</sub>, SPC<sub>2</sub>, SPC<sub>3</sub> y SPC<sub>4</sub> se han registrado en las posiciones de radio r<sub>1</sub> = 0,39, r<sub>2</sub> = 0,606, r<sub>3</sub> = 0,779 o r<sub>4</sub> = 0,989. Para ello se han determinado correspondientemente las frecuencias de cresta f<sub>peak1</sub>, f<sub>peak2</sub>, f<sub>peak3</sub> y f<sub>peak4</sub>. Cada uno de estos espectros de ruido presenta un punto máximo y las frecuencias correspondientes se usan posteriormente como frecuencias de cresta f<sub>peak</sub> según se describe. Un resultado semejante se ajusta por consiguiente cuando en un punto de funcionamiento de la instalación de energía eólica se registran los espectros sonoros en diferentes posiciones radiales de la pala de rotor. Por ello se pueden determinar una función dependiente del radio de los máximos de las frecuencias de cresta y/o por ello una función dependiente del radio de las alturas de punta H(r) calculada resultante.

La figura 7 muestra para un corte de pala 18 a modo de ejemplo de una pala de rotor 2, que se gira con la velocidad de giro  $\Omega$  a lo largo del plano de rotor 28, parámetros aerodinámicos locales, que se necesitan para un cálculo BEM o se calculan por éste. Para la velocidad de giro de rotor  $\Omega$  se dibuja un vector, que está opuesto a la dirección real de la velocidad de giro, a fin de indicar un viento correspondiente, aritmético, opuesto al movimiento. La adición vectorial de este viento aritmético con el viento o la velocidad del viento V<sub>w</sub> conduce por consiguiente a la velocidad de afluencia efectiva V<sub>eff</sub>.

A este respecto, la figura 7 ilustra la velocidad de giro del rotor  $\Omega$ , el ángulo de ataque efectivo  $\alpha$ , el ángulo constructivo local  $\beta$ , que se compone del ángulo de paso y la torsión de la pala de rotor, y el ángulo de afluencia  $\pi$ . Además está dibujada la profundidad de perfil local c del corte de pala 18 mostrado. Otras magnitudes relevantes se explican en la siguiente tabla.

45

$\Omega$ [m/s]	Velocidad de giro
$\alpha$ [°]	Ángulo de ajuste efectivo
$\beta$ [°]	Ángulo de instalación local = ángulo de torsión local más ángulo de ajuste de pala
$\lambda$ [m] o [mm]	Anchura de punta
$\Lambda_{p,3}$	Longitud de coherencia de envergadura de las fluctuaciones de presión turbulentas como función de la frecuencia de cresta f <sub>peak</sub>
$\varphi$ [°]	Ángulo de entrada
V <sub>eff</sub> [m/s]	Velocidad de afluencia efectiva
V <sub>w</sub> [m/s]	Velocidad del viento
a'	Factor de inducción tangencial
a	Factor de inducción axial
c <sub>i</sub>	Coefficiente de sustentación

$c_n$	Coefficiente de fuerza normal
$c_d$	Coefficiente de resistencia
$c_t$	Coefficiente de fuerza tangencial
$c$ [m]	Profundidad de perfil
$c_1$	Constante = 0.7
$c_2$	Constante = 4 ... 12
dB (-)	Decibelio (no ponderado)
$f_c$ [Hz]	Frecuencia central en la banda de tercio de octava
$f_{peak}$ [Hz]	Frecuencia en la que el nivel de presión sonora, en inglés Sound Pressure Level (SPL), tiene su valor máximo
$h$ [m] o [mm]	Mitad de altura de puntas
$H$ [m] o [mm]	Altura de punta $H = 2h$
$L_{p,ss}$ [dB(-)]	Nivel de presión sonora del lado de aspiración de perfil
MAX Lambda p,3 [mm]	$\Lambda_{p,3}$ longitud de coherencia referido al máximo del nivel de presión sonora $L_{p,ss}$ y frecuencia de cresta $f_{peak}$
$r$ [m]	Posición de radio local en la pala
$R$ [m]	Radio del rotor
$U_c = 0.7 V_{eff}$ [m/s]	Velocidad de convección, inglés Convective velocity

El uso en relación con un cálculo BEM se puede deducir de la referencia [1].

Ahora también se puede calcular en particular la escala de longitud de coherencia.

5

La escala de longitud de coherencia de radio y envergadura de las fluctuaciones de presión turbulentas se ha calculado con el modelo de Corcos [3] según la igualdad siguiente

$$\Lambda_{p3} = \frac{U_c}{2 \cdot \pi \cdot f_{peak}}$$

10

en donde

$$U_c = c_1 \cdot V_{eff}$$

15  $c_1$  es una constante con el valor 0.7.  $U_c$  se conoce como velocidad de convección. La velocidad de afluencia efectiva o local  $V_{eff}$  en el corte de pala de la posición de radio / envergadura  $r$  se determina mediante cálculos con un método de momento del elemento de pala (en inglés Blade element momentum method – BEM), véase la figura 7. El BEM también proporciona todos los otros parámetros de flujo locales necesarios como el ángulo de ataque efectivo  $\alpha$ , números de Reynolds (Re) y de Mach (Ma). El parámetro  $f_{peak}$  es la frecuencia en la que el espectro de ruido del

20 borde de fuga de la capa límite presenta su máximo. Este parámetro se puede determinar mediante experimentos en el canal de viento dedicados en el perfil, en los que se mide el espectro de frecuencia de las fluctuaciones de presión de pared de la capa límite turbulenta en un punto en el entorno inmediato del borde de fuga de perfil o mediante un modelo de pronóstico de ruido teórico cualquiera de modo numérico.

25 El espectro de ruido y la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  se puede determinar de forma empírica, por ejemplo, mediante estudios dedicados en el canal de viento, por ejemplo, con sensores de presión dinámicos en el borde de fuga del objeto de ensayo del canal de viento, o se puede calcular con una simulación numérica aeroacústica para la número de Reynolds Re. El número de Reynolds local resulta del ángulo de afluencia local  $\alpha$ , la velocidad de afluencia local y la profundidad de perfil local y también se puede obtener como resultado mediante el modelo BEM mencionado.

30 Además está integrada la geometría de perfil bidimensional del corte de pala local.

A este respecto,  $\Lambda_{p3}$  se determina para cada perfil a lo largo de la envergadura de pala mediante aplicación del proceso arriba descrito.

35 Para la definición de la dimensión geométrica local de las puntas de arista de fuga se han usado las fórmulas siguientes:

Altura de punta H como función del radio adimensional

$$H\left(\frac{r}{R}\right) = c_2 \cdot \Lambda_{p3}\left(\frac{r}{R}\right)$$

5 y distancia entre puntas

$$\lambda = \frac{H}{2}$$

En donde  $c_2 = c_{\text{const}}$  es una constante empírica en el rango de valor de 4 a 15. En una realización preferida es  $c_2 = 8$ .

10

La figura 8 muestra un diagrama que representa la frecuencia de cresta  $f_{\text{peak}}$  en función del radio para una punto de funcionamiento. Las frecuencias de cresta  $f_{\text{peak}1}$  a  $f_{\text{peak}4}$  se corresponden con aquellas en la figura 6 y se han obtenido según se explica en la figura 6. La representación selecciona para el radio la representación adimensional, a saber, el radio  $r$  normalizado respecto al radio máximo  $R$ . Para la ilustración están dibujadas muchas frecuencias de cresta registradas, dependientes del radio  $r$  y se han conectado respectivamente con una línea. La representación muestra que las frecuencias de cresta también se sitúan más elevadas con radio creciente. Por consiguiente de esta representación se puede deducir que la frecuencia del máximo de ruido o la frecuencia del máximo sonoro se desplaza hacia valores más elevados con radio  $r$  creciente. Esto se puede explicar porque los islotes de turbulencia, que también se pueden designar como bulbos de turbulencia, se vuelven más pequeños con radio creciente.

15

20

La figura 9 muestra la altura de punta  $H$  en función del radio  $r$  normalizado respecto al radio máximo  $R$ . En este diagrama, como también en el diagrama de la figura 10 sólo está representada aproximadamente la zona del tercio exterior de la pala de rotor estudiada. En el diagrama están representados 11 valores discretos  $H_r$  en función del radio normalizado respectivamente por cuadrados pequeños. Estos valores se han detectado de forma individual, en tanto que respectivamente se ha determinado una frecuencia de cresta respecto al radio correspondiente. Estas alturas de punta discretas  $H_r$  se refieren todas al mismo punto de funcionamiento. Respecto a estos valores discretos  $H_r$  se ha determinado ahora una relación funcional, que está representada como curva  $H_8$ . Esta curva  $H_8$  representa una aproximación polinomial de estos valores  $H_r$  registrados de forma discreta. Una aproximación semejante mediante polinomios se puede realizar por ejemplo de modo que se minimizan las desviaciones del estándar o la suma de los cuadrados de las desviaciones. Básicamente se pueden usar también otras aproximaciones, como por ejemplo un polinomio de orden superior o inferior. Este desarrollo aproximado  $H_8$  también se puede indicar como  $H = c_2 \cdot \Lambda_{p3}$ , en donde  $c_2$  presenta aquí el valor 8 ( $c_2 = 8$ ). Esta función  $H_8$  así determinada, dependiente del radio indica por consiguiente el desarrollo de la altura de las puntas en función del radio para un punto de funcionamiento. Para otros puntos de funcionamiento resultan otros desarrollos de la altura de punta  $H$ , lo que se puede reproducir por otro valor para  $c_2$ .

25

30

35

Correspondientemente los desarrollos  $H_4$  y  $H_{10}$  muestran desarrollos correspondientes de la altura de punta  $H$  para otros puntos de funcionamiento, siendo igual el punto de funcionamiento de la curva correspondiente  $H_4$  o  $H_{10}$  respectivamente para todos los radios representados. Se ha mostrado que es prescindible el registro del valor discreto  $H_r$  para otros puntos de funcionamiento y es suficiente una modificación de las constante  $c_2$ , para representar los desarrollos de las alturas de punta  $H$  en función del radio para otro punto de funcionamiento semejante con buena exactitud.

40

45

La figura 9 muestra las relaciones para una instalación de viento fuerte con una velocidad específica de diseño de 7, a saber, para una instalación de energía eólica de Enercon con designación de tipo E82, la figura 10 muestra desarrollos totalmente similares a la figura 9, pero para una instalación de viento débil, a saber una instalación de Enercon de tipo E92-1. Aquí también están representados desarrollos de altura  $H$  para diferentes puntos de funcionamiento y para la mejora de la claridad se usan aquí las mismas designaciones que en la figura 9. Por lo tanto para un punto de funcionamiento está presente una función  $H_8$ , que gracias a un polinomio de quinto orden aproxima varios valores  $H_r$  registrados de forma discreta. Para otros puntos de funcionamiento resulta el desarrollo  $H_4$  o  $H_{10}$ . A los desarrollos  $H_8$ ,  $H_4$  y  $H_{10}$  les sirve de base la relación funcional  $H = c_2 \cdot \Lambda_{p3}$  con  $c_2 = 8$ ,  $c_2 = 4$  o  $c_2 = 10$ .

50

Para obtener un desarrollo continuo a lo largo de la envergadura, se ha calculado por consiguiente  $\Lambda_{p3}\left(\frac{r}{R}\right)$  en distintas posiciones de envergadura discretas y para la definición se recurre a un polinomio de 6º orden mediante una adaptación de curva. En este caso el número de los términos del polinomio, a saber  $\left(\frac{r}{R}\right)^0$  a  $\left(\frac{r}{R}\right)^5$ , se usan como designación del orden y esto designa por consiguiente un polinomio de quinto orden.

5

El polinomio resultante de quinto orden para la altura de punta H como función del radio de pala adimensional expresa para el ejemplo según la figura 9:

$$H\left(\frac{r}{R}\right) = c_2 \cdot \Lambda_{p3} = c_2 \cdot \left[ 66808 \left(\frac{r}{R}\right)^5 - 281611 \left(\frac{r}{R}\right)^4 + 471582 \left(\frac{r}{R}\right)^3 - 392499 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 162465 \left(\frac{r}{R}\right) - 26738 \right]$$

10

Con  $c_2 = 8$  resulta el desarrollo preferido que está representado en la figura 9 como desarrollo  $H_8$ .

El rango de diseño se ha mostrado en la figura 9 mediante las curvas límite  $H_4$  con  $c_2 = 4$  así como  $H_{10}$  con  $c_2 = 10$ . La línea con símbolos cuadrados describe el desarrollo de los valores  $\Lambda_{p3}$  calculados en puntos discretos.

15

La figura 10 muestra a este respecto el diseño para una instalación de viento débil con una velocidad específica de diseño de 9. De nuevo se ha caracterizado el rango de diseño, como en la figura 9, con  $H_4$  para  $c_2 = 4$  y con  $H_{10}$  para  $c_2 = 10$ . La línea con los símbolos cuadrados describe el desarrollo de los valores  $\Lambda_{p3}$  calculados en puntos discretos. Aquí el polinomio de sexto orden expresa para el desarrollo continuo:

20

$$H\left(\frac{r}{R}\right) = c_2 \cdot \Lambda_{p3} = c_2 \cdot \left[ \begin{array}{l} 60351,47 \left(\frac{r}{R}\right)^6 - 278386,84 \left(\frac{r}{R}\right)^5 + -534315,59 \left(\frac{r}{R}\right)^4 + 546057,47 \\ \left(\frac{r}{R}\right)^3 - 313179,86 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 95422,62 \left(\frac{r}{R}\right) - 12015,31 \end{array} \right]$$

Con  $c_2 = 8$  resulta el desarrollo preferido, que está caracterizado en la figura 10 con  $H_8$ .

25 El rango de definición del polinomio se extiende a lo largo de un radio adimensional  $\frac{r}{R} = 0.5$  a 1.0. En el caso preferido, el rango se sitúa entre  $\frac{r}{R} = 0.65$  a 1.0, pero al menos se debe cubrir un rango de  $\frac{r}{R}$  de 0.7 a 1.0.

Si es interesante el desarrollo de  $\frac{r}{R} < 0.6$ , debe tener lugar un cálculo ampliado de los valores  $\Lambda_{p3}$  y adaptarse los factores de los términos del polinomio.

30

A este respecto el valor  $\Lambda_{p3}$  local calculado depende del estado del flujo en el punto de funcionamiento de la instalación de energía eólica. Por ello la dimensión definitiva de altura de punta y distancia (o equivalentemente  $\Lambda_{p3}\left(\frac{r}{R}\right)$ ) se debe seleccionar de modo que el borde de fuga dentado se vuelve eficaz en un punto de funcionamiento seleccionado de la instalación de energía eólica, de modo óptimo el funcionamiento nominal.

35

El cálculo de  $\Lambda_{p3}\left(\frac{r}{R}\right)$  a través del modelo de Corcos no es trivial y se puede realizar más exactamente a través de la correlación de dos puntos de mediciones de oscilaciones de presión de pared en el canal de viento en el perfil del borde de fuga, según se representa en la referencia [2].

40 La figura 11 muestra para una o dos formas de realización en un diagrama el desarrollo de alturas de punta, que están normalizadas respecto a la profundidad de perfil local correspondiente, a través del radio adimensional para el diseño de viento fuerte y de viento débil. Se puede reconocer que para el diseño para viento fuerte resulta otra característica. Se propone tenerlo en cuenta en el diseño de las alturas de punta.

45 A este respecto, la figura 12a y por lo demás también las figuras 12b, 13a y 13b, está dibujada a escala. Se puede

- reconocer que la altura de punta  $H$  disminuye fuertemente de un radio local pequeño  $r_1$  a un radio local grande  $r_2$ . Para ilustrarlo se dibuja la altura de punta  $H_1$  para el radio pequeño  $r_1$  y la altura de punta pequeña  $H_2$  para el radio grande  $r_2$ . El borde de fuga mostrado está representado aquí separado y todavía se debe colocar en una pala de rotor para una instalación de viento fuerte. El borde de fuga 1 mostrado presenta en este caso una longitud de
- 5 aproximadamente 12 metros. Se puede reconocer que la altura  $H_1$  es claramente mayor que la altura  $H_2$  y que la altura de punta  $H$  de las puntas 8 permanece igual y luego cae fuertemente hacia el radio grande, a saber exterior  $r_2$ . Debido a la profundidad de perfil que cae simultáneamente aumenta por consiguiente la altura de punta relativa  $H$  de las puntas 8, a saber, en primer lugar la altura de punta referida a la profundidad de perfil correspondiente, y cae luego hacia el final de la pala de rotor, a saber con  $r_2$ .
- 10 La representación en perspectiva según la figura 12b ilustra de nuevo el desarrollo de la altura de punta. También se puede reconocer en las dos figuras que junto con la altura de punta también se vuelve más pequeña la anchura de punta o la distancia entre puntas.
- 15 Las figuras 13a y 13b se refieren a un borde de fuga 1 para una instalación de viento débil. También se puede reconocer que la altura de punta  $H_1$  disminuye fuertemente respecto a la altura de diente  $H_2$ , a saber disminuye de un radio pequeño  $r_1$  hacia un radio grande  $r_2$ . Los radios  $r_1$  y  $r_2$  de la figura 13a, por un lado, y de las figuras 12a y 12b, por otro lado, se diferencian en su tamaño. Los dos bordes de fuga 1 de las figuras 12a y 12b, por un lado, y de la figura 13a, por otro lado, están previstos a este respecto aproximadamente para un tercio exterior de la pala de
- 20 rotor en cuestión. Los dos bordes de fuga 1 están subdivididos además en los segmentos  $S_1$  a  $S_5$ , habiéndose usado las mismas referencias a pesar de las diferentes bordes de fuga 1 para simplificar la comparación. El quinto segmento  $S_5$  del borde de fuga 1 de la figura 13a está subdividido además en otros subsegmentos. En la figura 13a se puede reconocer que la altura de punta  $H$  ya ha decrecido en el segundo segmento, mientras que un decrecimiento en el segundo segmento del borde de fuga para la instalación de viento fuerte según la figura 12 no
- 25 se puede reconocer allí en el segundo segmento  $S_2$  y todavía tampoco está presente. En este sentido se diferencian el desarrollo de altura de la altura de punta  $H$  del borde de fuga 1 para instalaciones de viento fuerte según las figuras 12a y 12b del desarrollo según la figura 13a para una instalación de viento débil.
- La figura 13b muestra además un fragmento del borde de fuga 1 de la instalación de viento débil, para ilustrar una
- 30 realización posible técnicamente, en particular de las puntas 8. Por lo tanto se puede reconocer en primer lugar que las puntas 8 están conectadas entre sí a través de una base 30. La altura de punta  $H$  se mide de la línea base 16, en la que también están dispuestos por consiguiente los picos de incisión 12. La figura 13b muestra también que el pico de punta 10 puede estar provisto de un ligero redondeamiento.
- 35 [1] Theory and User Manual BLADOPT, ECN report, agosto, 2011 por B.H. Bulder, S.A.M. Barhorst, J.G: Schepers, F. Hagg.
- [2] M. S. Howe. Acoustics of Fluid-Structure Interactions. Cambridge University Press, online ISBN: 9780511662898, en tapa dura ISBN: 9780521633208, de bolsillo ISBN: 9780521054287 edición, 1998.
- 40 [3] G. M. Corcos. The structure of the turbulent pressure field in boundary-layer flow. Journal of Fluid Mechanics, 18:353-378, 1964.
- [4] Andreas Herrig, Validation and Application of a Hot-Wire based Method for Trailing-Edge Noise Measurements on
- 45 Airfoils, PhD Thesis, University of Stuttgart, 2011, ISBN 978-3-8439-0578.
- Técnicamente en la fabricación se genera preferentemente el desarrollo deseado, en tanto que se procesa con control por ordenador una bandera de borde de fuga predeterminada mediante un proceso de corte automatizado.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para el cálculo de un borde de fuga a fabricar para una pala de rotor de un rotor aerodinámico de una instalación de energía eólica, en el que

5

- la pala de rotor presenta posiciones radiales con respecto al rotor,
- la pala de rotor presenta un perfil de pala local, dependiente de las posiciones radiales referidas al rotor
- y el borde de fuga presenta un desarrollo dentado con varias puntas,
- en el que cada punta presenta una altura de punta y una anchura de punta, y

10 - al altura de punta y/o la anchura de punta se calculan en función de su posición radial y/o en función del perfil de pala local de su posición radial,

**caracterizado porque**

15 el cálculo de la altura de punta H de una posición radial predeterminada se realiza a partir de una escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$  correspondiente teniendo en cuenta un factor constante  $c_2$  con la fórmula

$$H = c_2 \cdot \Lambda_{p3},$$

20 calculándose la escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$  a partir de la velocidad de convección  $U_c$  y la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  según la fórmula siguiente:

$$\Lambda_{p3} = \frac{U_c}{(2 \cdot \pi \cdot f_{peak})}$$

25 2. Procedimiento según la reivindicación 1,

**caracterizado porque**

la altura de punta es mayor que la anchura de punta, la anchura de punta se calcula a partir de la altura de punta y para ello la proporción entre la altura de punta y anchura de pula se sitúa en el rango de 3 a 5, en particular tiene aproximadamente el valor 4.

30

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2,

35 **caracterizado porque**

la altura de punta y/o la anchura de punta depende de su radio local a través de una relación polinomial, preferentemente a través de una relación polinomial de cuarto a octavo orden, en particular quinto o sexto orden, en particular sexto orden para emplazamientos de viento débil y quinto orden para emplazamientos de viento fuerte.

40

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores,

**caracterizado porque**

45 las puntas presentan anchuras de punta y/o alturas de punta diferentes entre sí.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores,

**caracterizado porque**

50

el cálculo está diseñado de modo que, en los bordes de fuga para emplazamientos de viento débil, la altura de punta de las puntas decrece más fuertemente con radio creciente de la posición radial de su punta que en los bordes de fuga para emplazamientos de viento fuerte y/o **porque** la altura de punta de una posición relativa igual es menor en los bordes de fuga para instalaciones de energía eólica para emplazamientos de viento débil que en los bordes de fuga para instalaciones de energía eólica de la misma clase de potencia, en particular misma potencia nominal, para emplazamientos de viento fuerte.

55

6. Procedimiento para el cálculo de un borde de fuga para una pala de rotor de instalación de energía

eólica, en el que

- la pala de rotor presenta posiciones radiales con respecto al rotor,
  - la pala de rotor presenta un perfil de pala local, dependiente de las posiciones radiales referidas al rotor
- 5 - y el borde de fuga presenta un desarrollo dentado con varias puntas,
- en el que cada punta presenta una altura de punta y una anchura de punta, y
  - al altura de punta y/o la anchura de punta se calculan en función de su posición radial y/o en función del perfil de pala local de su posición radial,

**10 caracterizado porque**

el cálculo de la altura de punta H de una posición radial predeterminada se realiza a partir de la velocidad de afluencia  $V_{eff}$  correspondiente, de la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  correspondiente del espectro sonoro y un factor predeterminado k, con la fórmula

15

$$H = k \cdot \frac{V_{eff}}{f_{peak}}$$

7. Pala de rotor de instalación de energía eólica (2), con una dirección longitudinal,

20

un borde de fuga (1), un perfil de pala local, dependiente de las posiciones a lo largo del eje longitudinal,

- en el que el borde de fuga (1) presenta un desarrollo dentado con varias puntas (8),
- en el que cada punta (8) presenta una altura de punta y una anchura de punta, y

25 - en el que la altura de punta (H) y/o la anchura de punta ( $\lambda$ ) depende de su posición a lo largo del eje longitudinal y/o depende del perfil de pala local de su posición a lo largo del eje longitudinal,

**caracterizada porque**

30 la altura de punta H de una posición predeterminada a lo largo del eje longitudinal resulta de una escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$  correspondiente teniendo en cuenta un factor constante  $c_2$  con la fórmula

$$H = c_2 \cdot \Lambda_{p3},$$

35 calculándose la escala de longitud de coherencia  $\Lambda_{p3}$  a partir de la velocidad de convección  $U_c$  y de la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  según la fórmula siguiente:

$$\Lambda_{p3} = \frac{U_c}{(2 \cdot \pi \cdot f_{peak})}$$

40 8. Pala de rotor de instalación de energía eólica (2), con una dirección longitudinal, un borde de fuga (1), un perfil de pala local, dependiente de posiciones a lo largo del eje longitudinal,

- en el que el borde de fuga (1) presenta un desarrollo dentado con varias puntas (8),

45 - en el que cada punta (8) presenta una altura de punta y una anchura de punta, y

- en el que la altura de punta (H) y/o la anchura de punta ( $\lambda$ ) depende de su posición a lo largo del eje longitudinal y/o depende del perfil de pala local de su posición a lo largo del eje longitudinal,

**caracterizada porque**

50

la altura de punta H de una posición predeterminada se calcula a partir de la velocidad de afluencia  $V_{eff}$  correspondiente, la frecuencia de cresta  $f_{peak}$  correspondiente del espectro sonoro y un factor k predeterminado, con la fórmula

$$H = k \cdot \frac{V_{eff}}{f_{peak}}$$

9. Pala de rotor de instalación de energía eólica según la reivindicación 7 u 8,

**5 caracterizada porque**

la altura de punta es mayor que la anchura de punta y la proporción entre altura de punta y anchura de punta se sitúa en el rango de 3 a 5, en particular tiene aproximadamente el valor 4.

10 10. Pala de rotor de instalación de energía eólica según la reivindicación 9,

**caracterizada porque**

la altura de punta y/o la anchura de punta depende de su posición radial a través de una función polinomial, preferentemente de una función polinomial de cuarto a octavo orden, en particular sexto orden, en particular sexto orden para emplazamientos de viento débil y quinto orden para emplazamientos de viento fuerte.

11. Pala de rotor de instalación de energía eólica según la reivindicación 10,

**20 caracterizada porque**

está diseñada para una instalación de energía eólica para un emplazamiento de viento débil, cayendo la altura de punta con radio creciente.

25 12. Pala de rotor de instalación de energía eólica según la reivindicación 7 u 8,

**caracterizada porque**

está diseñada para una instalación de energía eólica para un emplazamiento de viento fuerte, aumentando la altura de punta con radio creciente y cayendo de nuevo con radio que sigue aumentando.

13. Instalación de energía eólica con una pala de rotor según una de las reivindicaciones 7 a 12.



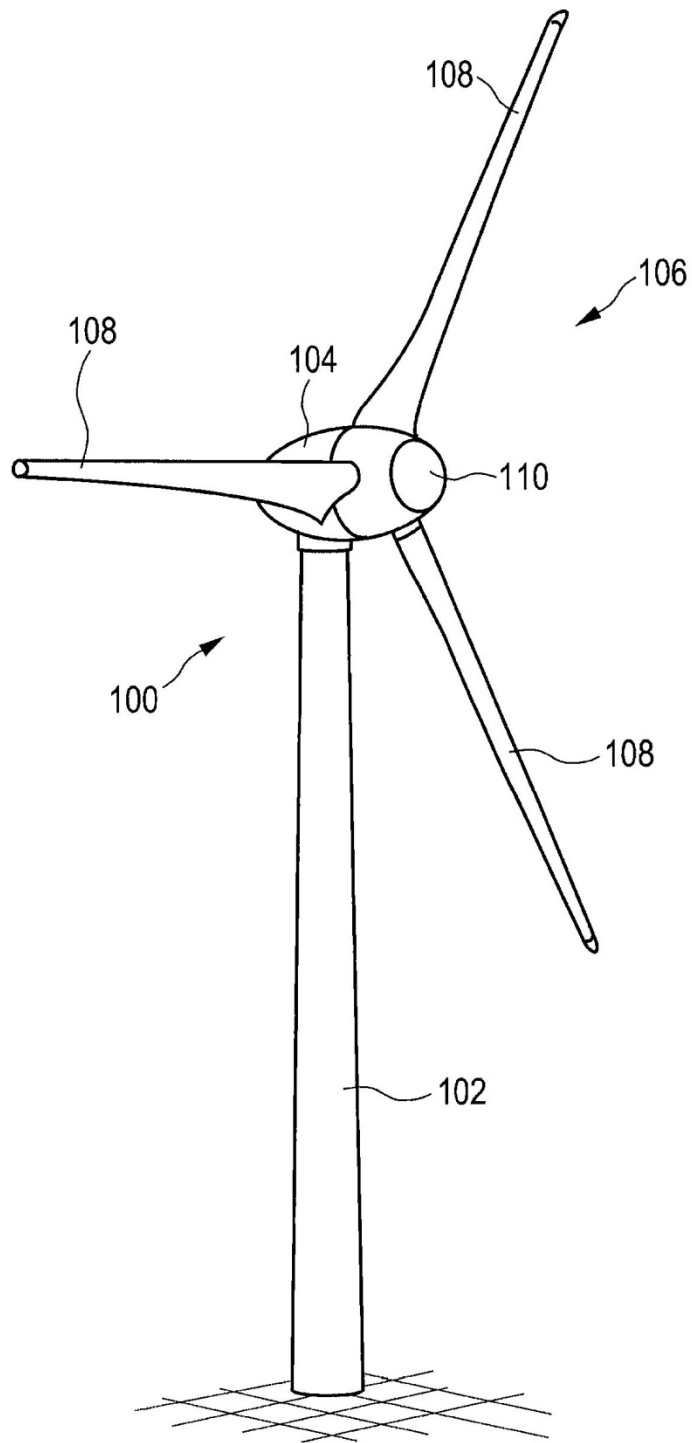


Fig. 1

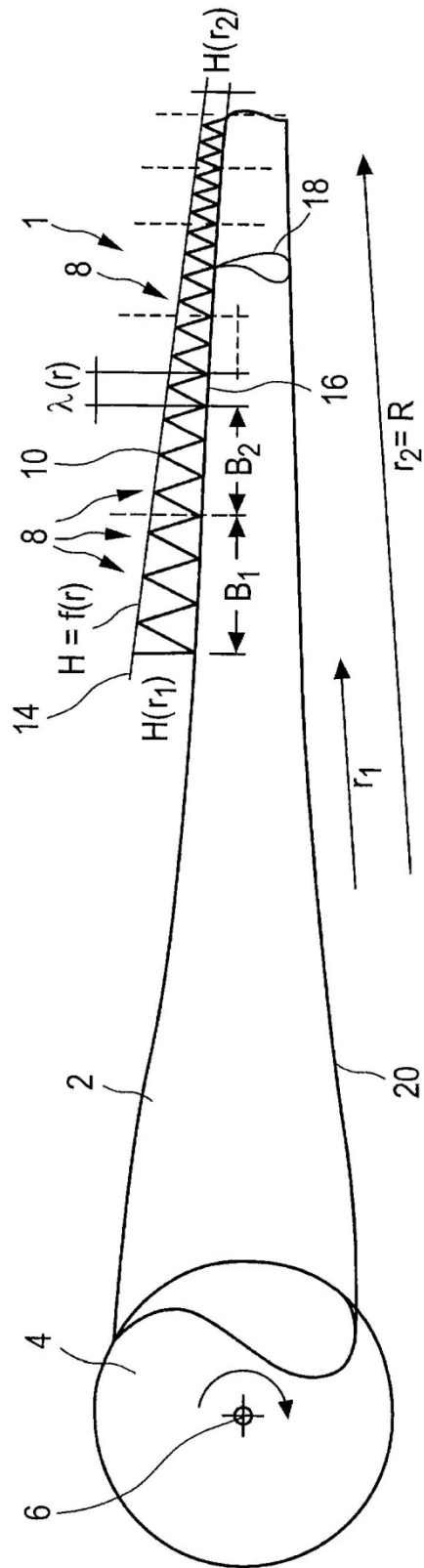
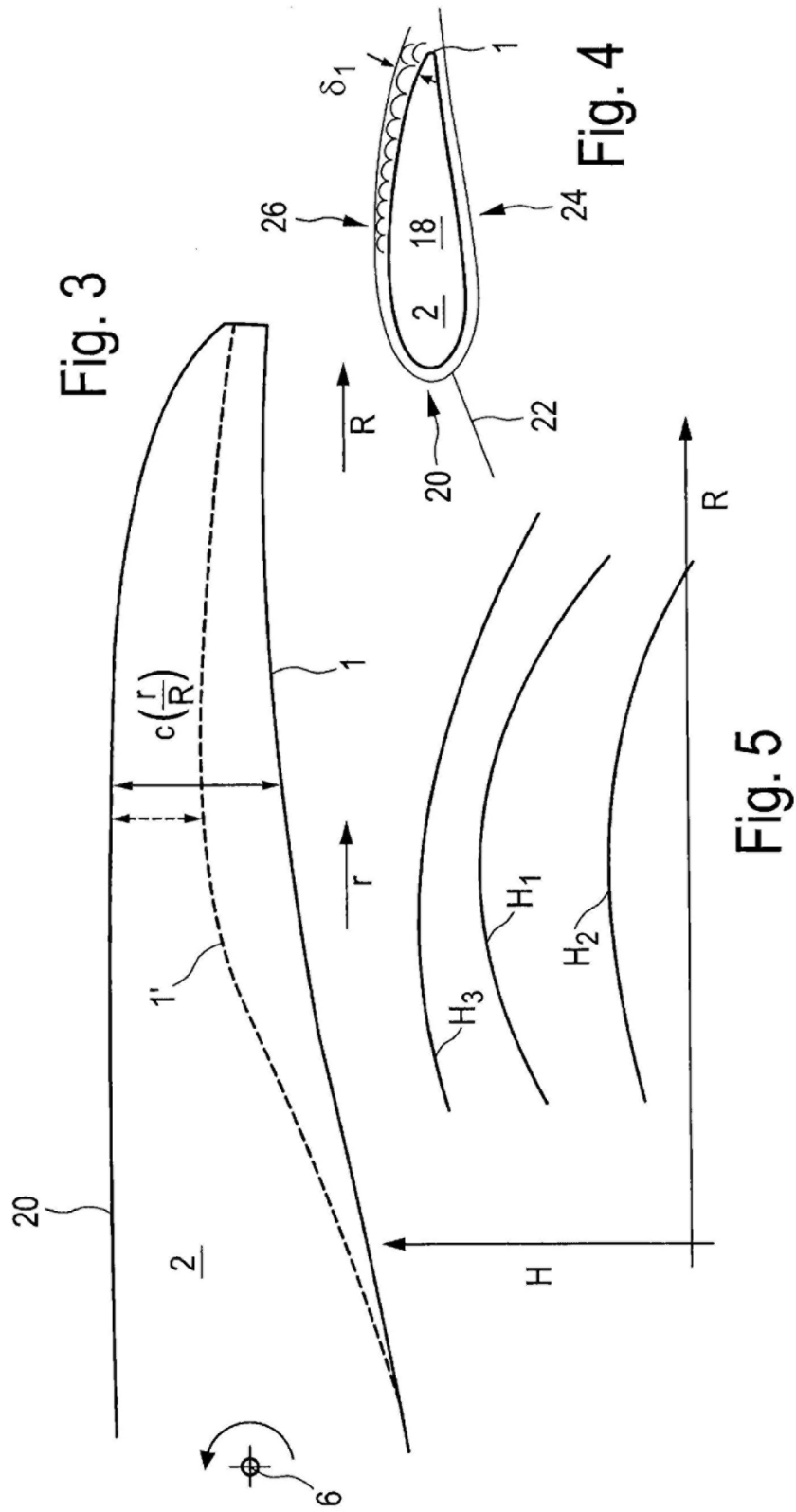


Fig. 2



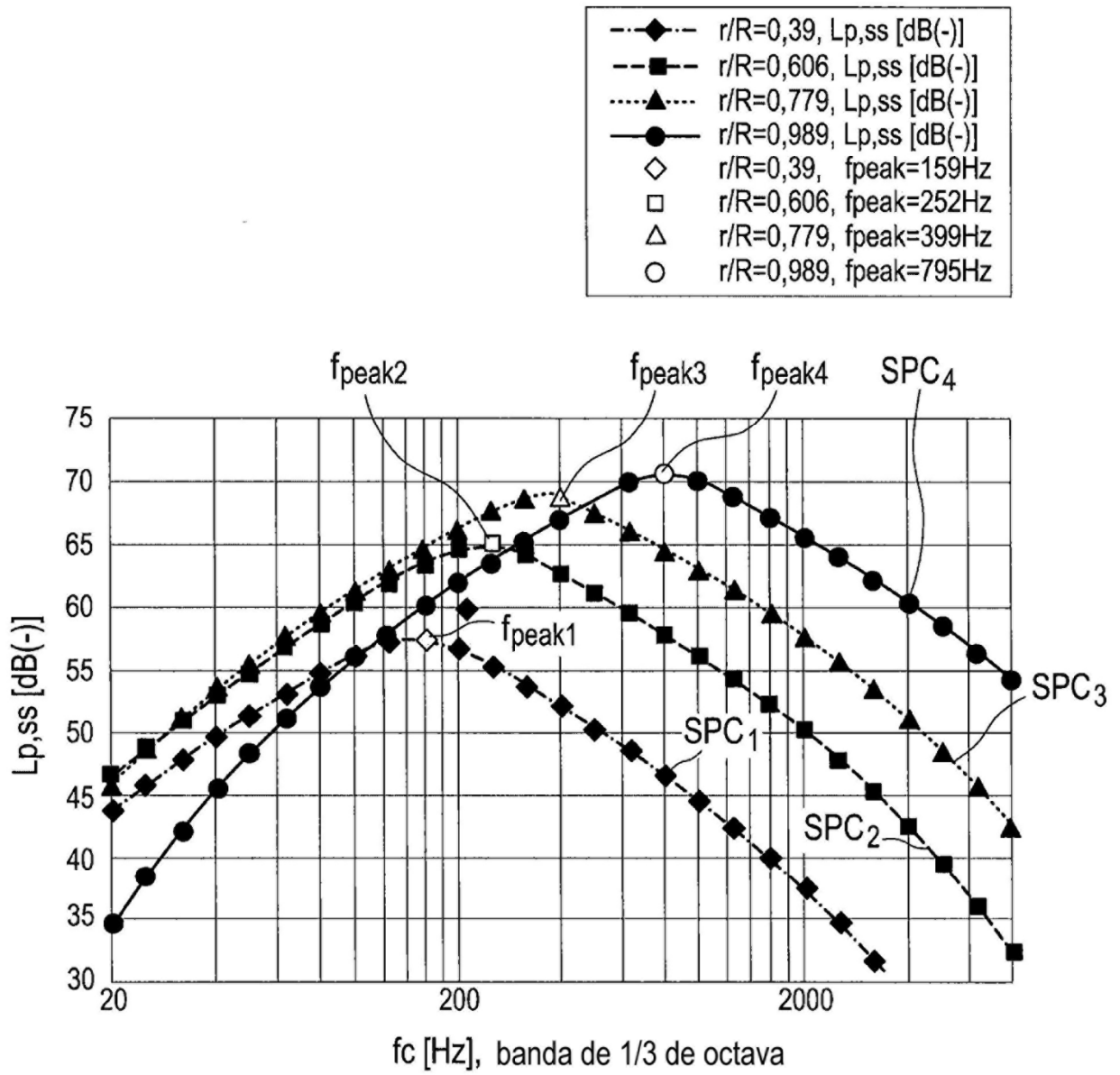


Fig. 6

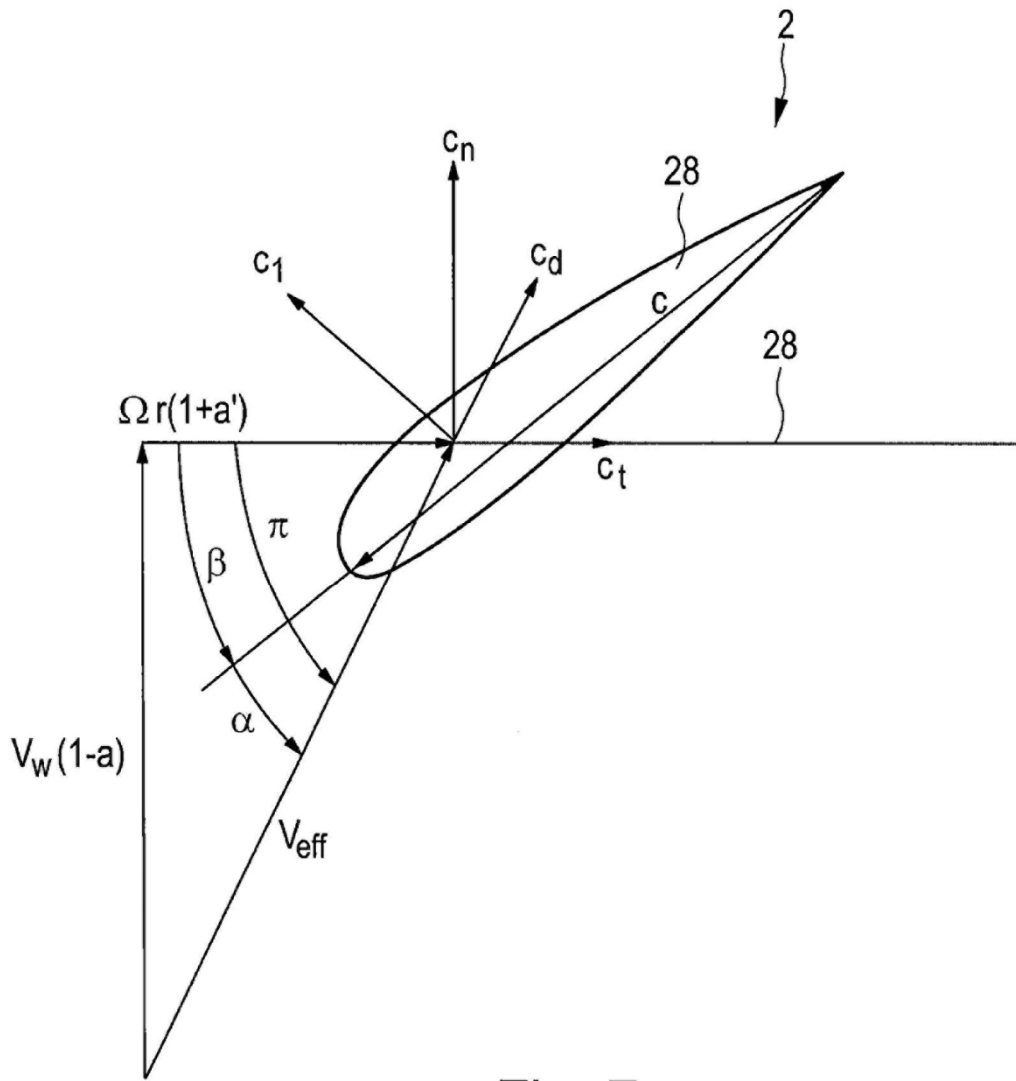


Fig. 7

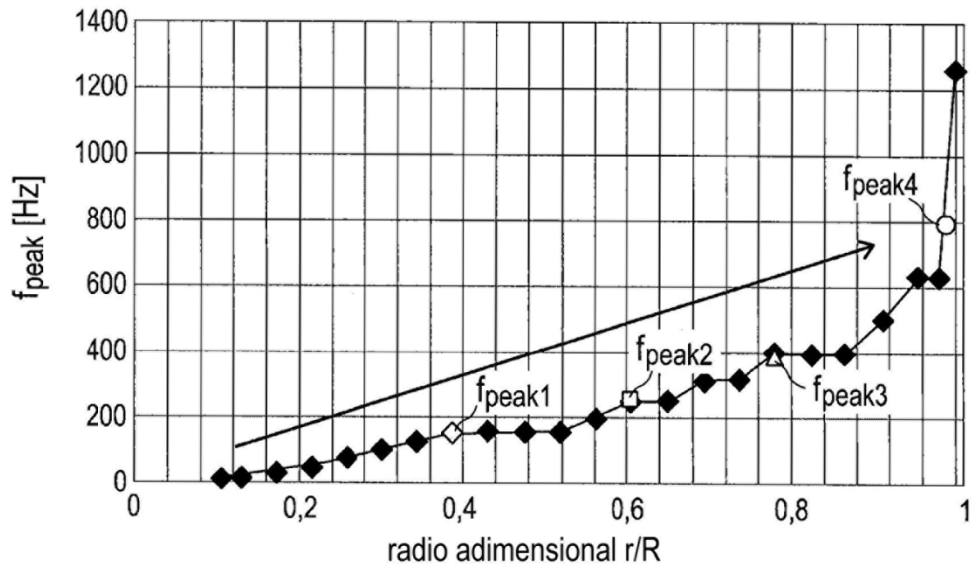


Fig. 8

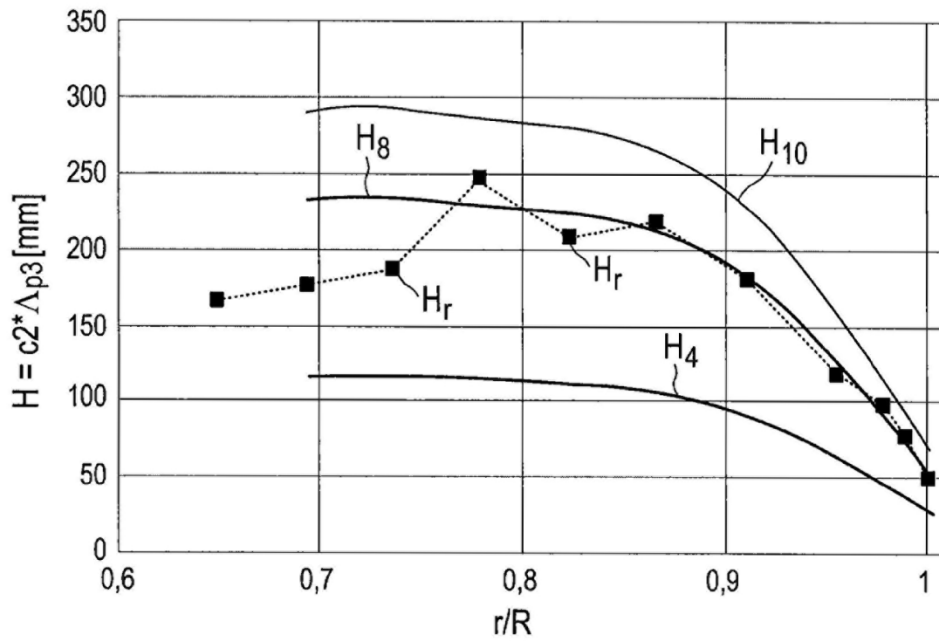


Fig. 9

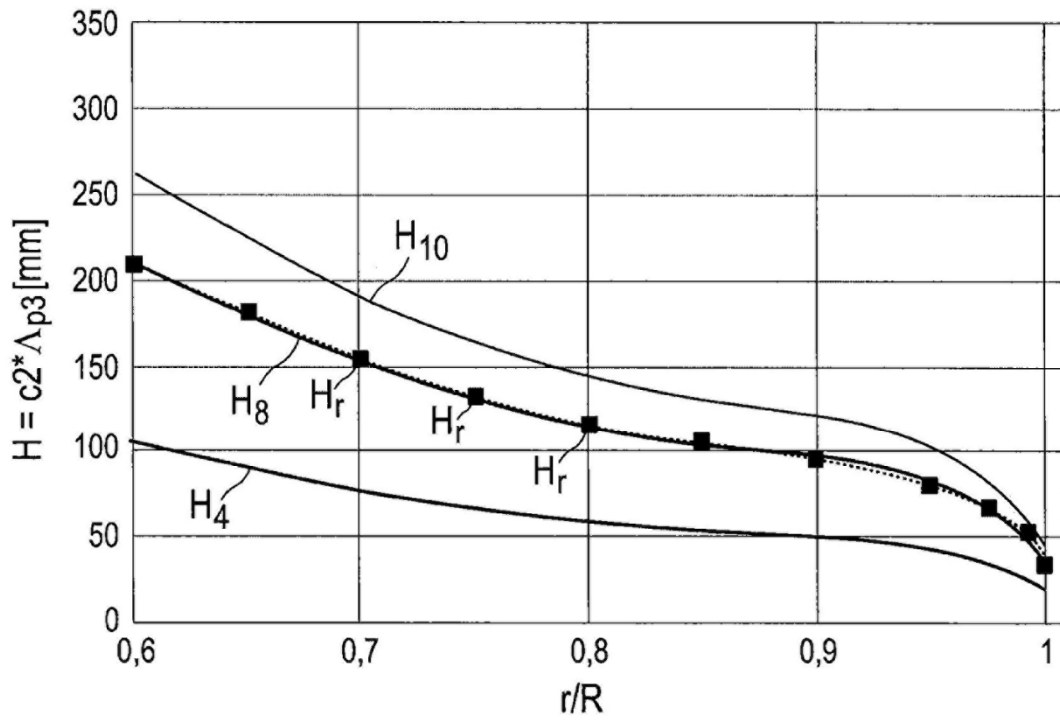


Fig. 10

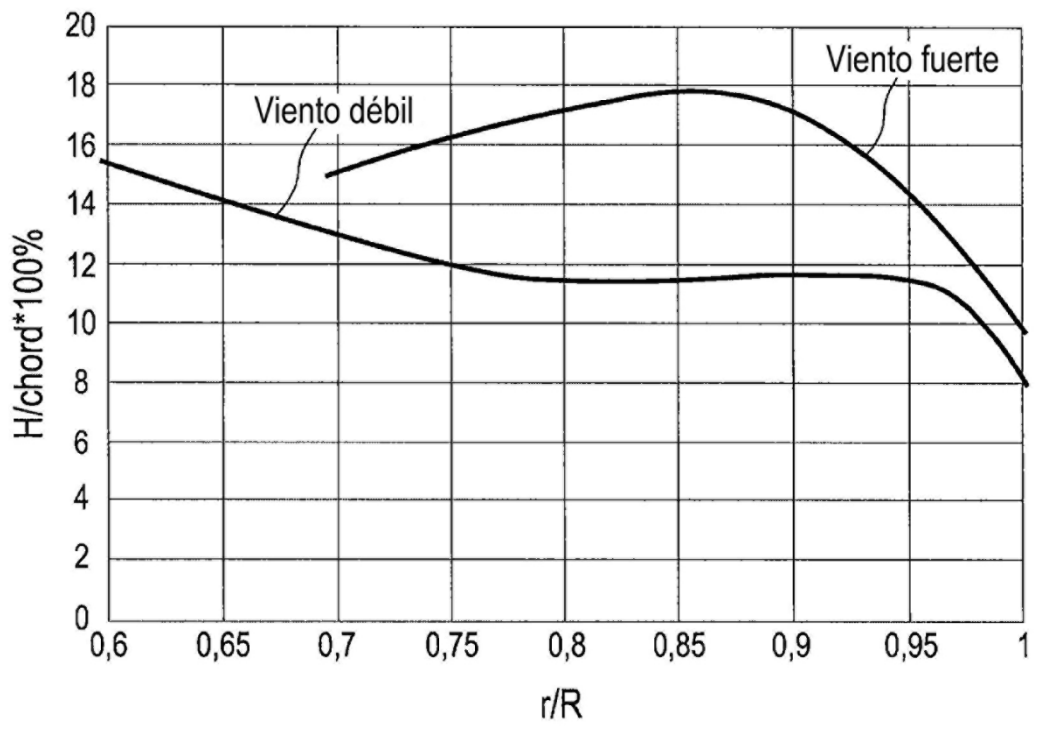


Fig. 11



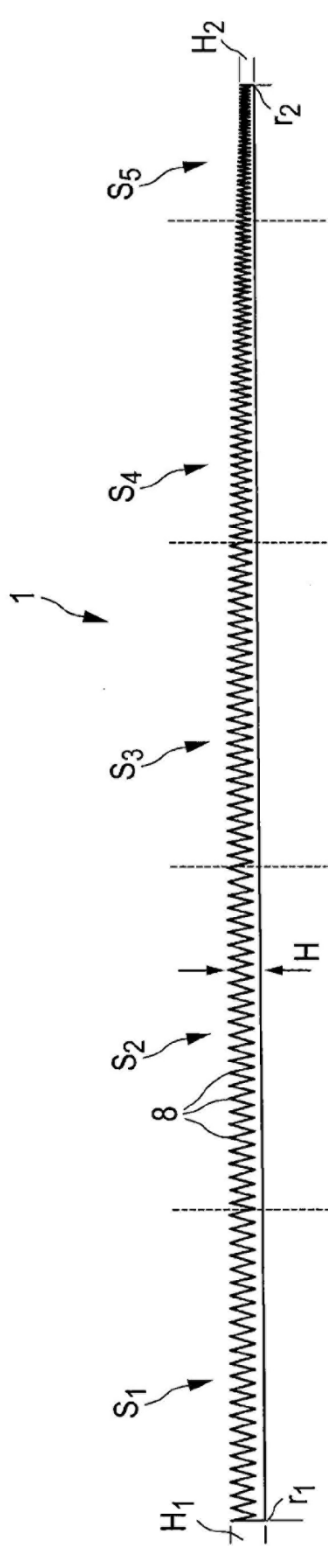


Fig. 12a

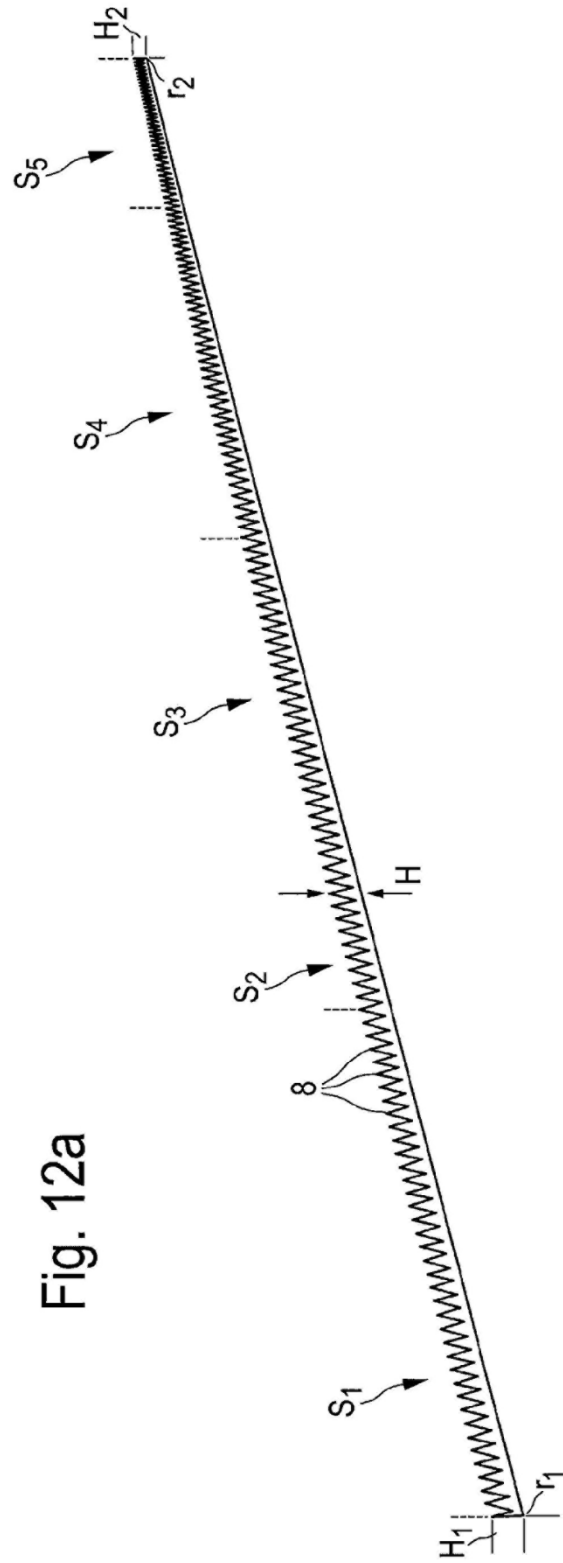


Fig. 12b

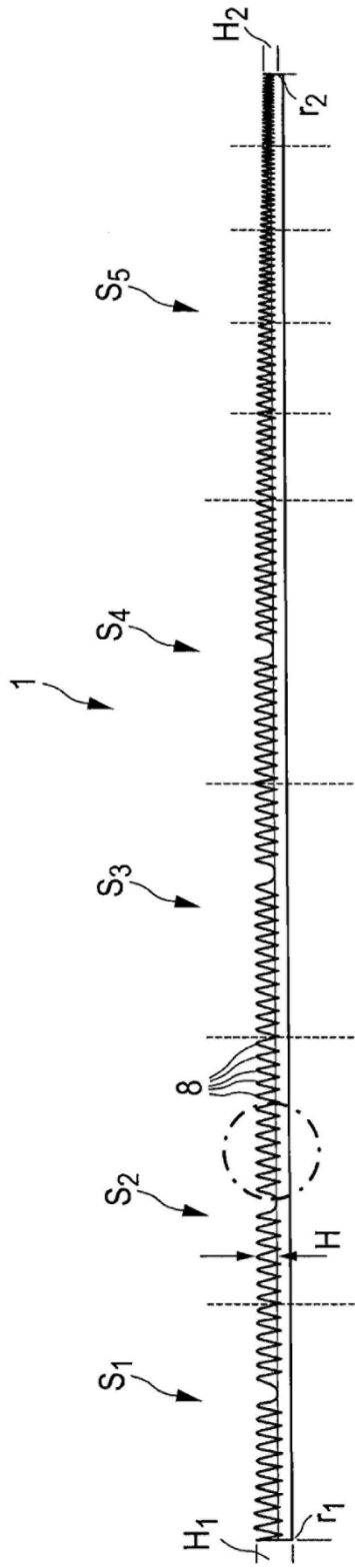


Fig. 13a

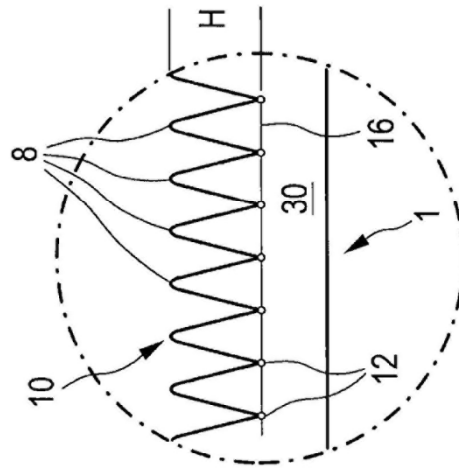


Fig. 13b