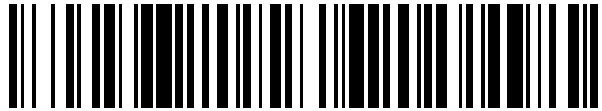


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 516 742**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.03.2010 E 10002872 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.07.2014 EP 2366892**

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

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
31.10.2014

73 Titular/es:

**NORDEX ENERGY GMBH (100.0%)
Langenhorner Chaussee 600
22419 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

FISCHER, GUNTER

74 Agente/Representante:

ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María

ES 2 516 742 T3

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

DESCRIPCIÓN

Pala de rotor para una instalación de energía eólica.

- 5 La invención se refiere a una pala de rotor para una instalación de energía eólica con un eje longitudinal, una punta de pala, una raíz de pala, un canto anterior, un canto posterior, un lado de presión, un lado de aspiración y una sección dispuesta ortogonalmente con respecto al eje longitudinal que varía desde la raíz de la pala hacia la punta de la pala, que en la raíz de pala es sustancialmente circular y que en el centro de la pala de rotor está formada por un perfil aerodinámico. Este tipo de palas de rotor se utilizan particularmente para instalaciones de energía eólica con un rotor de dos o tres palas con eje horizontal. Éstas están unidas en su raíz de pala mediante un buje del rotor. Para ello, en la raíz de pala de la pala del rotor puede estar conformada una brida de fijación y el ángulo de paso de la pala puede estar realizado de forma ajustable con la ayuda de un accionamiento de paso.

15 Las palas de rotor conocidas representan un compromiso entre la forma aerodinámica óptima, los requisitos al dimensionamiento de su resistencia y el afán por una técnica racional de fabricación. Particularmente, el grosor relativo de los perfiles aerodinámicos empleados se tiene que elegir desde puntos de vista de resistencia. Para ello, en la zona exterior especialmente importante aerodinámicamente de las palas de rotor se tiene que trabajar con un grosor de pala relativamente pequeño, menor que el 30 % de la profundidad de perfil, a menudo entre un 18 y un 15 % de la misma. La zona interior de las palas de rotor que se encuentra más próxima hacia el buje tiene un papel aerodinámico menos decisivo, de tal forma que para lograr una resistencia suficiente se puede desviar en mayor medida del óptimo aerodinámico e implementar un grosor de pala relativamente grande. Por lo tanto, el perfil aerodinámico se transforma hacia la raíz de pala en una sección sustancialmente circular. Para mejorar la capacidad aerodinámica de las palas de rotor en la zona interior, en el estado de la técnica son conocidos diferentes suplementos.

25 Del documento WO02/08600A1 se conoce el uso de una pieza montada de forma nervada que se extiende en dirección longitudinal a lo largo del canto posterior de la pala de rotor. La pieza montada se encuentra principalmente en una zona cilíndrica de unión de la pala de rotor, que une una sección de pala de rotor dispuesta más hacia afuera provista de un perfil aerodinámico, con el buje. De este modo la zona de unión en otro caso aerodinámicamente no eficaz también contribuye a la capacidad productiva del rotor.

35 Del documento DE102006017897B4 se conoce una pala de rotor para una instalación de energía eólica con un dispositivo sobrepuesto sobre el lado de presión, próximo a la raíz de pala. El dispositivo sobrepuesto conocido se extiende sustancialmente en dirección longitudinal de la pala de rotor. Una denominada superficie de soplado sobrepuesta del dispositivo sobrepuesto conocido comienza en el lado de presión en un punto del perfil, en el que una tangente apoyada sobre el perfil discurre en un intervalo de ángulo comprendido entre -20° y $+20^\circ$ con respecto a la dirección de soplado sobrepuesta. La superficie de soplado sobrepuesta discurre aproximadamente en el ángulo de esta tangente hasta un canto posterior del dispositivo sobrepuesto diferente del canto posterior de la pala de rotor, a continuación del cual se sitúa la superficie posterior del dispositivo sobrepuesto, que lleva de nuevo al lado de presión del perfil. De los documentos EP2138714A1 y EP2141358A1 también se conocen dispositivos sobrepuestos comparables.

45 Del documento WO2004/097215A1 se conoce una pala de rotor para una instalación de energía eólica, que está especialmente concebida para una instalación de energía eólica sin engranajes. Este tipo de instalaciones de energía eólica presentan un buje con un diámetro relativamente grande. En esta pala de rotor conocida el perfil aerodinámico de la pala de rotor se prolonga sustancialmente hasta el buje, lo que, debido al gran grosor de perfil próximo al buje requerido por motivos de resistencia, da lugar a una profundidad de perfil muy grande. Una recirculación de la sección de perfil posterior orientada hacia el buje se evita haciendo que el perfil esté guiado muy próximo al buje a lo largo de toda su profundidad.

50 A través del documento WO2009/130500A2 se ha dado a conocer una pala de rotor para una instalación de energía eólica, que presenta dos secciones a lo largo de su dirección longitudinal, que actúan de forma diferente. Se distingue entre un perfil principal y un perfil auxiliar, que presentan diferentes ángulos de paso. El perfil auxiliar se encuentra próximo a la punta de la pala y presenta un ángulo de paso, que para determinadas condiciones de viento, da lugar a un frenado del rotor. El ángulo de paso se reduce hacia la raíz de la pala en una sección longitudinal, que está dispuesto en la zona de transición entre el perfil principal y el perfil auxiliar. En una sección longitudinal interior, el ángulo de paso crece hacia la raíz de la pala.

El documento WO2010/013024A2 muestra una pala de rotor para una instalación de energía eólica con una pieza

montada, que presenta un bastidor y una envoltura. La pieza montada aumenta la profundidad de perfil en una sección longitudinal de la pala de rotor dispuesta próxima a la raíz de pala.

Partiendo de ello, el objeto de la invención es el de poner a disposición una pala de rotor para una instalación de energía eólica, que presente una mejor capacidad productiva particularmente en la zona interior del rotor.

Este objetivo se resuelve mediante la pala de rotor para una instalación de energía eólica con las características de la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes situadas a continuación se indican conformaciones ventajosas.

10

La pala de rotor para una instalación de energía eólica de acuerdo con la invención tiene un eje longitudinal, una punta de pala, una raíz de pala, un canto anterior, un canto posterior, un lado de presión, un lado de aspiración y una sección dispuesta ortogonalmente con respecto al eje longitudinal que varía desde la raíz de la pala hacia la punta de la pala, que en la raíz de pala es sustancialmente circular y que en el centro de la pala de rotor está formada por un perfil aerodinámico. Un plano de referencia imaginario dispuesto en posición fija con respecto a la pala de rotor contiene el eje longitudinal de la pala de rotor. En una o en cada sección está definido un ángulo α_3 entre este plano de referencia y una recta, que une el eje longitudinal con el canto posterior, que describe la posición del canto posterior en la sección. El ángulo α_3 aumenta en una primera sección longitudinal de la pala de rotor a medida que decrece la distancia de separación con respecto a la raíz de pala, y decrece en una segunda sección longitudinal, que está dispuesta más próxima a la raíz de pala que la primera sección longitudinal, a medida que decrece la distancia de separación con respecto a la raíz de pala.

Al igual que cualquier pala de rotor para una instalación de energía eólica, la pala de rotor de acuerdo con la invención está dimensionada de tal forma que para una determinada relación entre velocidad periférica en la punta de la pala y velocidad del viento, es decir, para la denominada velocidad específica nominal, y un ángulo de paso predeterminado, se hace posible una extracción óptima de potencia del viento. Cuando se hace funcionar la pala de rotor a la velocidad específica nominal, el aire circula en cada posición longitudinal de la pala de rotor en una dirección de soplado definida. Ésta se denomina dirección de soplado nominal. En el canto posterior confluyen por lo general el lado de aspiración y el de presión en un ángulo agudo. En palas de rotor con un denominado "canto posterior grueso", en la parte posterior del perfil se encuentra una sección rectilínea, que está dispuesta sustancialmente perpendicular con respecto a la dirección de soplado nominal, y conforma una superficie posterior de la pala de rotor. En este caso, el canto posterior de la pala de rotor se forma por definición mediante los puntos medios de las secciones rectilíneas que forman el "canto posterior grueso". El canto anterior de la pala de rotor es el canto anterior de la pala de rotor más alejado del canto posterior. En el canto anterior se debe de diferenciar aquel punto en la zona anterior de la pala de rotor en el que el aire soplado se divide en un flujo de aire que circula a lo largo del lado de presión y otro a lo largo del lado de aspiración. Este es el punto de remanso. La posición del punto de remanso depende, en contraposición a la posición del canto anterior, de las condiciones de funcionamiento de la pala de rotor, particularmente del ángulo de paso. La raíz de pala es sustancialmente circular y puede estar provista de una brida de fijación para la fijación a un buje del rotor. El lado de presión identifica la superficie de la pala de rotor que se encuentra entre el canto anterior y el posterior, sobre la que se genera por lo general una sobrepresión durante el funcionamiento. Correspondientemente, el lado de aspiración identifica aquella superficie de la pala de rotor en el canto anterior y el canto posterior, en la que se genera por lo general una presión negativa durante el funcionamiento. El eje longitudinal de la pala de rotor está definido como recta a través del punto central de la sección circular en la raíz de pala, que está orientada perpendicularmente con respecto a esta sección circular.

45

El perfil aerodinámico en el centro de la pala de rotor es básicamente igual que un perfil del plano de sustentación de un avión. Presenta por lo general un lado de aspiración convexo, una sección anterior de lado de presión convexa y una sección posterior del lado de presión también convexa o cóncava. Las dos denominadas secciones de lado de presión se convierten por lo general la una en la otra con curvatura constante, es decir, sin un pandeo, en el que varíe de forma brusca la dirección de una tangente.

50

El plano de referencia imaginario contiene el eje longitudinal de la pala de rotor, se extiende por lo tanto en la dirección longitudinal de la pala de rotor. Los ángulos α_3 medidos con respecto a este plano dependen de la elección del plano de referencia, pero no varían con una variación del ángulo de paso, dado que la posición del plano de referencia es fija con respecto a la pala de rotor. El plano de referencia no está torcido o curvado. Para elegir el plano de referencia de forma unívoca, se puede fijar una segunda dirección que se encuentra en el plano, es decir, la dirección de una cuerda de la pala de rotor en una posición longitudinal determinada.

55

En lo que sigue y en la descripción del ejemplo de realización, se elige como segunda dirección una dirección

perpendicular al eje longitudinal y dispuesta sobre el eje del rotor, en donde el ángulo de paso presenta una extracción óptima de potencia del viento en el modo de funcionamiento a carga parcial. El ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial es aquel ángulo de paso mediante el cual se hace funcionar preferentemente la pala de rotor en el modo de funcionamiento a carga parcial. Éste da lugar a una
 5 extracción óptima de potencia del viento, particularmente para la velocidad específica nominal. A medida que aumenta la velocidad del viento, aumenta la potencia extraída en el modo de funcionamiento a carga parcial. Cuando se alcanza la potencia máxima, no se puede seguir aumentando la potencia. Si continúa aumentando la velocidad del viento, se produce por lo tanto un empeoramiento del rendimiento aerodinámico por el aumento del ángulo de paso. Se puede realizar una regulación de la potencia mediante el mando del ángulo de paso, y la
 10 instalación se encuentra en el denominado modo de funcionamiento con regulación de paso o funcionamiento a plena carga. El ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial consiste en una magnitud definida de forma unívoca, que se tiene en cuenta en la construcción de la pala de rotor.

El plano de referencia que se obtiene de la segunda dirección elegida se corresponde con el plano del rotor, es
 15 decir, sustancialmente el plano barrido por la pala de rotor en la rotación alrededor del eje del rotor. Esta observación aplica de forma estricta en todo caso sólo para una pala de rotor dispuesta perpendicularmente con respecto al eje del rotor. En la práctica, el eje longitudinal de la pala de rotor también puede estar ligeramente inclinado hacia el eje del rotor con respecto a esta perpendicular, de tal forma que la pala de rotor no rota en un plano, sino en un cono. No obstante, tanto ahora como en lo sucesivo, cuando se hable del “plano del rotor”, siempre
 20 se referirá a aquel plano que contiene al eje longitudinal de la pala de rotor en la posición de giro actual de la pala de rotor y a una segunda dirección, que está dispuesta perpendicularmente con respecto al eje longitudinal de la pala de rotor y perpendicular con respecto al eje del rotor.

La invención descansa sobre la idea de que se producen pérdidas aerodinámicas particularmente en aquella zona
 25 próxima a la raíz de la pala, en la que varía rápidamente la profundidad del perfil. Este es el caso en las geometrías de pala de rotor tradicionales próximas a la raíz de pala, donde se completa la transición de un perfil aerodinámico a la sección sustancialmente circular cerca de la raíz de pala. En esta zona de transición se produce una recirculación de las zonas del canto posterior de la pala de rotor que apuntan hacia el eje del rotor debido a una caída de presión entre el lado de presión y el lado de aspiración. Esto da lugar por un lado a la formación de una turbulencia
 30 inevitable, que está acompañada de una resistencia inducida, y por otro lado a pérdidas de sustentación, que reducen el momento de torsión proporcionado por el rotor.

En la invención se actúa en contra de una recirculación de las denominadas zonas de canto posterior de la pala de rotor situadas próximas a la raíz de pala, haciendo que el ángulo α_3 se reduzca en una segunda sección longitudinal
 35 situada relativamente cerca de la raíz de pala. Este ángulo α_3 decreciente está en contraposición al ángulo creciente α_3 en la primera sección longitudinal, dispuesta más hacia el exterior. De forma conocida, la dirección de soplado varía a medida que se reduce la distancia de separación con respecto a la raíz de pala, puesto que la relación entre la velocidad de rotación y la velocidad del viento se reduce hacia la raíz de pala. En las palas de rotor tradicionales, la dirección de la cuerda y por lo tanto también el ángulo α_3 sigue a la dirección de soplado que gira cada vez más
 40 hacia la raíz de pala desde el plano del rotor hacia el eje del rotor, para que el perfil siempre esté orientado de forma óptima con respecto a la dirección de soplado. En la invención se difiere en la segunda sección longitudinal de esta orientación “óptima”. Mediante el ángulo α_3 que decrece en la segunda sección longitudinal hacia la raíz de la pala, la sección interior, posterior de la pala de rotor adquiere una curvatura, que actúa en contra de una recirculación del canto posterior cerca de la raíz de pala.

45 Dicho de una forma simplificada, el efecto logrado es comparable con el conocido “winglets” (dispositivo de punta alar) de la construcción aeronáutica, esto es, una superficie en los extremos exteriores del plano sustentador perpendicular a la dirección longitudinal de los planos sustentadores, que impide parcialmente una recirculación de las puntas del plano sustentador. Las condiciones de flujo en una pala de rotor son en todo caso más complicadas
 50 debido al movimiento de rotación, de tal forma que, por lo general, no se pueden transferir los conocimientos de la construcción aeronáutica. Además, la geometría particular de la pala de rotor no se encuentra en la punta de la pala, sino próxima a la raíz de la pala.

En una conformación, el ángulo α_3 aumenta de forma monótona en la primera sección longitudinal y/o decrece de
 55 forma monótona en la segunda sección longitudinal. Preferentemente, el ángulo α_3 aumenta de forma estrictamente monótona en la primera sección longitudinal y/o decrece de forma estrictamente monótona en la segunda sección longitudinal. El ángulo α_3 aumenta o decrece además preferentemente de forma constante, es decir, no de forma brusca. El canto posterior de la pala de rotor adquiere de este modo una trayectoria uniforme, lo que resulta ventajoso aerodinámicamente.

- En la invención, la primera sección longitudinal comienza en una primera sección, que está dispuesta próxima a la punta de la pala, y se extiende hasta una segunda sección, que está separada de la raíz de pala menos del 25 % de la longitud de la pala de rotor. La segunda sección también puede estar distanciada de la raíz de pala menos del 20 % o incluso menos del 15 % de la longitud de la pala de rotor. La primera sección longitudinal con el ángulo α_3 creciente hacia la raíz de pala se extiende por lo tanto a lo largo de una gran parte de la longitud de la pala de rotor. En esta sección longitudinal, el ángulo de paso de la pala de rotor está adaptado a la dirección de soplado del viento para lograr una sustentación óptima. La segunda sección longitudinal con el ángulo α_3 decreciente se encuentra sólo en la sección longitudinal de la pala de rotor restante, próxima a la raíz de pala.
- En una conformación, la segunda sección longitudinal delimita con una segunda sección directamente junto a la primera sección longitudinal, en donde el ángulo α_3 presenta un máximo en la segunda sección. Con este recorrido del ángulo α_3 , el canto posterior de la pala de rotor adquiere una trayectoria curvada uniforme, aerodinámicamente ventajosa.
- En una conformación, la segunda sección longitudinal se extiende en dirección hacia la raíz de pala hasta una tercera sección, que está dispuesta en una posición longitudinal de la pala de rotor, en la que finaliza el perfil aerodinámicamente efectivo de la pala de rotor. En esta tercera sección puede estar completada particularmente la transición de un perfil aerodinámicamente efectivo al perfil circular en la raíz de pala. El canto posterior de la pala de rotor, cuya recirculación se debe de evitar o al menos reducir mediante la invención, comienza, según se observa partiendo de la raíz de pala, precisamente en esta posición longitudinal.
- En una conformación, la tercera sección está dispuesta a una distancia de 0,5 m o más de la raíz de pala. La pala de rotor puede presentar una sección circular entre la raíz de pala y la tercera sección, lo que puede facilitar particularmente el transporte y el montaje de la pala de rotor. En esta zona se puede conducir un cinturón de transporte alrededor de la pala de rotor, sin que se tenga que temer por un daño del perfil aerodinámico.
- En una conformación, está definido un ángulo α_1 en un plano dispuesto perpendicular al plano del rotor y paralelo al eje longitudinal de la pala de rotor entre el plano de rotor y un plano tangencial en el lado de presión en el canto posterior en la tercera sección, cuando la pala de rotor presenta un ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial, y el ángulo α_1 se encuentra comprendido en un intervalo de entre 30° y 90°. El ángulo α_1 está definido en un plano dispuesto perpendicular al plano del rotor y paralelo al eje longitudinal de la pala de rotor. El aire que recircula la pala de rotor por el lado de presión en la zona de la tercera sección circula en la zona del canto posterior a lo largo del plano tangencial. El ángulo α_1 es importante para la capacidad de la pala de rotor para actuar en contra de una recirculación del canto posterior en el lado de la raíz de pala. Los ensayos han demostrado que con un ángulo α_1 comprendido en el intervalo entre 30° y 90° se puede lograr el efecto deseado.
- En una conformación, está definido un ángulo α_2 en el plano del rotor entre el eje longitudinal de la pala de rotor y la proyección de una tangente en el canto posterior de la pala de rotor en la tercera sección sobre el plano de rotor, cuando la pala de rotor presenta un ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial, y el ángulo α_2 se encuentra comprendido en un intervalo de entre 25° y 90°. El ángulo α_2 es también significativo para el desarrollo del flujo de aire en la zona del canto posterior próxima a la raíz de pala. Los ensayos han demostrado que con un ángulo α_2 comprendido en el intervalo mencionado se pueden lograr buenos resultados.
- En la invención, una sección posterior del lado de presión en la segunda sección longitudinal está curvada dos veces de forma cóncava. Curvada dos veces de forma cóncava significa que existe una curvatura cóncava en dos direcciones diferentes, por ejemplo, una primera curvatura cóncava que da lugar a una trayectoria curvilínea de la sección del lado de presión en un plano de sección, y una segunda curvatura cóncava, que da lugar a una trayectoria curvilínea de la sección del lado de presión en un plano de sección dispuesto perpendicular con respecto al plano del rotor y paralelo al eje longitudinal. Una sección en el lado de presión curvada dos veces de forma cóncava es particularmente muy adecuada para evitar una recirculación del canto posterior en el lado de la raíz de pala.
- En una conformación, está conformado un ángulo agudo entre un plano tangencial en el lado de presión próximo al canto posterior en la tercera sección y un plano tangencial en el lado de aspiración próximo al canto posterior en la tercera sección. De este modo, el aire circula de forma plana en la zona del canto posterior según las condiciones de flujo de Kutta, y se evita una recirculación del canto posterior.
- En una conformación, una sección posterior del lado de presión en la segunda sección longitudinal, situada enfrente

de la sección curvada dos veces de forma cóncava del lado de presión, discurre prácticamente de forma rectilínea en dirección de la sección de la pala de rotor. Particularmente esta sección del lado de aspiración puede estar curvada de forma cóncava sencilla. Una trayectoria rectilínea en dirección de la sección es según los cálculos de modelos aerodinámicamente especialmente ventajosa, además fácil de fabricar y ventajosa desde puntos de vista de resistencia.

A continuación se describe más detalladamente la invención en base a dos ejemplos de realización representados en figuras. Muestran:

- 10 la fig. 1 una vista desde arriba sobre el lado de aspiración de una pala de rotor de acuerdo con la invención,
la fig. 2 una vista desde arriba sobre el lado de aspiración de una pala de rotor tradicional según el estado de la técnica,
- 15 la fig. 3 una vista en perspectiva de un corte de la pala de rotor de la fig. 1,
la fig. 4 otra vista en perspectiva de un corte de la pala de rotor de la fig. 1,
- la fig. 5 una vista desde arriba sobre el canto posterior de un corte de la pala de rotor de la fig. 1,
20 la fig. 6 una vista desde arriba que se corresponde con la fig. 5, con otros puntos destacados,
la fig. 7 una vista desde arriba sobre el lado de presión de un corte de la pala de rotor de la fig. 1,
- 25 la fig. 8 una vista desde arriba sobre el lado de aspiración de un corte de la pala de rotor de la fig. 1,
la fig. 9 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 2 metros del eje del rotor,
- 30 la fig. 10 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 2,5 metros del eje del rotor,
la fig. 11 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 3 metros del eje del rotor,
- 35 la fig. 12 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 3,5 metros del eje del rotor,
- la fig. 13 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 4 metros del eje del
40 rotor,
la fig. 14 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 5 metros del eje del rotor,
- 45 la fig. 15 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 6 metros del eje del rotor,
la fig. 16 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 7 metros del eje del
rotor,
- 50 la fig. 17 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 8 metros del eje del rotor,
- la fig. 18 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 9 metros del eje del
55 rotor,
la fig. 19 una sección a través de la pala de rotor de la fig. 1 en un plano de corte distanciado 10 metros del eje del rotor,

la fig. 20 la sección de las figuras 9 a 19 en una representación conjunta,

la fig. 21 una representación de las líneas de flujo en un plano de sección a través de la pala de rotor según la fig. 13,

5

la fig. 22 una sección a través de otro ejemplo de realización de una pala de rotor de acuerdo con la invención con una pieza montada en forma de cubeta.

En todas las figuras se emplean los mismos símbolos de referencia para las mismas partes.

10

En la fig. 1 está representada la pala de rotor en su conjunto en una vista desde arriba sobre el lado de aspiración. Ésta presenta una longitud de apenas 50 metros desde la punta de pala 10 hasta la raíz de pala 12. La pala de rotor presenta una sección circular en la raíz de pala 12. La raíz de pala 12 presenta una brida de fijación circular, no representada en las figuras, que se fija a un buje de rotor. La raíz de pala 12 se encuentra situada de este modo a 15 una distancia de aproximadamente 1,5 m del eje del rotor.

La pala de rotor presenta un perfil aerodinámico en su sección a lo largo de la mayor parte de su longitud, particularmente en el centro 14 de la pala de rotor. El canto anterior 16 de la pala de rotor se encuentra en la representación de la fig. 1 sustancialmente en el borde derecho de la pala de rotor representada, el canto posterior 20 18 está formado por el borde izquierdo de la pala de rotor.

En una sección longitudinal de la pala de rotor está dispuesta una pieza montada 20, que forma el canto posterior 18 en esta sección longitudinal. La forma de la pieza montada 20 se describe en detalle más adelante.

25 La fig. 2 muestra una pala de rotor tradicional según el estado de la técnica, que se puede completar con una pieza montada 20 para obtener una pala de rotor de acuerdo con la invención según la fig. 1. En tanto la invención se realiza mediante la unión de la pieza montada 20 con una pala de rotor tradicional, por ejemplo según la fig. 2, la pala de rotor tradicional representa en el uso lingüístico de esta solicitud los componentes restantes de la pala de rotor. La pieza montada 20 se puede, por ejemplo, pegar y/o atornillar con estos componentes restantes.

30

Una comparación entre las figuras 1 y 2 muestra que la pala de rotor de acuerdo con la invención con pieza montada 20 según la fig. 1 se diferencia, entre otros, en la trayectoria de su profundidad de perfil de la pala de rotor tradicional según la fig. 2. En la pala de rotor tradicional según la fig. 2, la profundidad de perfil crece inicialmente de forma monótona partiendo de la punta de pala 10 en dirección hacia la raíz de pala 12, hasta alcanzar una profundidad 35 máxima de perfil en la posición longitudinal identificada como 22. Comenzado en la posición longitudinal 22, la profundidad de perfil vuelve a decrecer hacia la raíz de pala 12, en donde el perfil aerodinámico se convierte, en una tercera sección identificada como 24, en la sección circular, que presenta también en la zona de la raíz de pala 12. La transición de la profundidad de perfil se produce de forma continua a lo largo de una curva permanentemente diferenciable. En la invención según la fig. 1, la profundidad de perfil presenta desde la punta de pala 10 hasta la 40 posición longitudinal 22 con profundidad máxima de perfil, la misma trayectoria que en la fig. 2. Desde la posición longitudinal 22 hasta la raíz de pala se mantiene en cambio la profundidad de perfil prácticamente constante en la sección longitudinal 26, para reducirse a continuación hasta la sección circular. La transición desde el perfil aerodinámico al perfil circular se produce de nuevo en la tercera sección 24, en donde la profundidad de perfil varía en esta posición mediante la conformación de un pandeo. La curva que describe el canto posterior 18 no es por lo 45 tanto permanentemente diferenciable en este punto.

La sección longitudinal 26 con profundidad de perfil constante se extiende aproximadamente a lo largo de una zona entre una primera distancia de separación de un 10 % de la longitud de la pala de rotor a la raíz de pala y una 50 segunda distancia de separación de aproximadamente un 20 % de la longitud de la pala de rotor a la raíz de pala.

50

En la vista en perspectiva de la fig. 3 se puede reconocer con mayor precisión la forma de la pieza montada. El corte representado de la pala de rotor comienza en la raíz de pala 12 y muestra aproximadamente el tercio del lado de la raíz de pala de la pala de rotor. La representación procede, al igual que las de las figuras 4 a 8, de un cálculo de modelo aerodinámico, en el que el buje del rotor se representa mediante una esfera 28. Una parte de esta esfera 28 55 está representada en las figuras 3 a 8, si bien no forma parte de la pala de rotor. En la fig. 3 se observa la sección circular de la pala de rotor en la zona de la raíz de pala 12 y permite vislumbrar en el borde derecho de la figura el perfil aerodinámico de la pala de rotor, que se corresponde sustancialmente con aquél de un plano sustentador de un avión. La cara de la pala de rotor que se encuentra arriba en la representación es el lado de aspiración 30, el lado de presión 32 se encuentra en la parte inferior y en la fig. 3 sólo se puede ver parcialmente.

La pieza montada 20 forma una parte del lado de aspiración 30 y una parte del lado de presión 32. Para ello, la pieza montada 20 comprende una superficie que completa el lado de aspiración 34 de curvatura convexa sencilla, así como una superficie que completa el lado de presión 36 de curvatura convexa doble. La superficie que completa el lado de aspiración 34 y la superficie que completa el lado de presión 36 convergen en el canto posterior 18 formando un ángulo agudo. La superficie que completa el lado de aspiración 34 se convierte mediante una línea curvada 38 en las partes del lado de aspiración 30 formadas por los componentes restantes de la pala de rotor. La superficie que completa el lado de presión 36 se convierte mediante otra línea curvada 40 en las partes del lado de presión 32 formadas por los componentes restantes de la pala de rotor.

10

Visto desde la raíz de pala 12, la pieza montada 20 comienza en un punto 42, en el que convergen las líneas curvadas 38 y 40, así como el canto posterior 18. La pieza montada 20 finaliza en otro punto 44, en el que las líneas curvadas 38 y 40 así como el canto posterior 18 vuelven a converger otra vez. El punto 42 forma el extremo en el lado de la raíz de pala de la pieza montada 20. El punto 44 forma el extremo en el lado de la punta de pala de la pieza montada 20. En 46, los componentes restantes de la pala de rotor presentan un canto posterior grueso, es decir, en esta zona el canto posterior de los componentes restantes de la pala de rotor está formado por una superficie dispuesta sustancialmente perpendicular con respecto a la dirección de soplado. Sin embargo, esta superficie 20 no conforma el canto posterior 18 de la pala de rotor en la zona de la pieza montada 20, que está formado por la pieza montada 20.

20

En lugar de con la ayuda de una pieza montada 20, la geometría de pala de rotor de acuerdo con la invención se puede tener ya en cuenta para la construcción de una nueva pala de rotor. En este caso, las cubiertas superior e inferior se pueden fabricar, por ejemplo, en una única pieza con una superficie que completa el lado de aspiración 34 y una superficie que completa el lado de presión 36.

25

La fig. 4 muestra otra vista en perspectiva del corte de pala de rotor de la fig. 3. Se puede reconocer especialmente bien la pieza en el lado de la raíz de pala de la superficie que completa el lado de aspiración 34, que termina en punta en el punto 42, que marca el extremo de la pieza montada 20 en el lado de la raíz de pala. También se puede reconocer que la línea curvada 38, que marca la transición de la superficie que completa el lado de aspiración 34 hacia las piezas del lado de aspiración 30 formadas por los componentes restantes de la pala de rotor, está dispuesta relativamente muy atrás con respecto a la profundidad de perfil. Se encuentra situada en cualquier posición longitudinal de la pala de rotor claramente por detrás de la localización del grosor máximo del perfil.

En la vista desde arriba de la fig. 5, se puede reconocer el canto posterior 18 de la pala de rotor. En tanto esté formada por la pieza montada 20, la superficie que completa el lado de aspiración 34 que conduce hacia el canto posterior 18 discurre perpendicular con respecto al plano del dibujo, de tal forma que desaparece detrás del canto posterior 18. En cambio, la superficie que completa el lado de presión 36 es bien reconocible. También se puede reconocer el extremo en el lado de la raíz de pala de la pieza montada 20 en el punto 42, así como el extremo en el lado de la punta de pala de la pieza montada 20 en el punto 44. En la representación de la fig. 5, el plano del dibujo discurre perpendicular con respecto al plano del rotor, en donde es requerido un ángulo de paso de la pala de rotor que se corresponda con el ángulo de paso para el modo de funcionamiento a carga parcial. El ángulo α_1 dibujado se mide en el plano del dibujo, esto es, en un plano dispuesto perpendicular con respecto al plano del rotor y paralelo al eje longitudinal de la pala de rotor. Está definido entre el plano del rotor, cuya dirección está indicada mediante 48, y el plano tangencial 50. El plano tangencial 50 está apoyado contra el lado de presión y concretamente contra el canto posterior 18 en la tercera sección 24, es decir, sustancialmente en el punto 42. El ángulo α_1 se encuentra comprendido ventajosamente en un intervalo de entre 30° y 90°. En el ejemplo de realización representado, toma un valor de aproximadamente 45°.

La fig. 6 muestra la misma vista que la fig. 5, si bien se destaca la trayectoria del canto posterior 18. En la proyección sobre el plano de dibujo representado, es decir, un plano dispuesto perpendicular con respecto al plano del rotor y paralelo con respecto al eje longitudinal de la pala de rotor, el canto posterior 18 aumenta partiendo desde la punta de pala 10 inicialmente de forma estrictamente monótona, hasta que alcanza un máximo en una segunda sección 52, y decrece a continuación de forma estrictamente monótona hacia la raíz de pala 12 hasta la tercera sección 24. En la zona comprendida entre la segunda sección 52 y la tercera sección 24, el recorrido del canto posterior 18 y con ello la orientación de la cuerda, no sigue siempre la dirección de soplado que gira siempre cada vez más en dirección hacia el eje del rotor. Un canto posterior que sigue a esta dirección de soplado giratoria adoptaría aproximadamente la trayectoria mostrada en 54, tal y como es el caso, por ejemplo, en la pala de rotor conocida del documento WO2004/097215 discutido en la introducción.

La fig. 7 muestra otra vista desde arriba sobre el corte de la pala de rotor de acuerdo con la invención representado en las figuras anteriores. El plano del dibujo es el plano del rotor, en donde de nuevo es requisito un ángulo de paso con un valor correspondientemente optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial. La vista se orienta hacia el lado de presión 32 de la pala de rotor. Es bien reconocible la sección longitudinal 26 en la que la profundidad de perfil de la pala de rotor es constante.

El ángulo α_2 dibujado se mide en el plano del dibujo, es decir, en el plano del rotor. Está definido entre el eje longitudinal de la pala de rotor, que discurre paralelo a la línea 56, y la proyección de la tangente 58 en el canto posterior de la pala de rotor en la tercera sección 25 sobre el plano del rotor. El ángulo α_2 se encuentra comprendido ventajosamente en un intervalo de entre 25° y 90°. En el ejemplo de realización representado, el ángulo α_2 toma un valor de aproximadamente 45°. A diferencia de una pala de rotor tradicional según la fig. 2, el canto posterior 18 desemboca en la zona de la tercera sección 24 formando un ángulo en la sección cilíndrica, en el lado de la raíz de pala de la pala de rotor, no en una curva permanentemente diferenciable.

La fig. 8 representa mediante una vista desde arriba sobre el lado de aspiración 32 particularmente los planos de sección elegidos para las figuras 9 a 19. Las secciones mostradas en estas figuras cubren sustancialmente la sección longitudinal de la pala de rotor provista con la pieza montada 20, en donde la pala de rotor presenta un perfil particular. La sección de la fig. 9 discurre en la posición longitudinal de la tercera sección 24 anteriormente mencionada, es decir, en el extremo del lado de la raíz de pala de la pieza montada 20. Las demás secciones de las figuras 10 a 19 presentan una distancia de separación creciente con respecto a la raíz de pala, en donde la sección de la fig. 19 está dispuesta próxima al extremo en el lado de la punta de pala de la pieza montada 20, es decir, próxima al punto 44. En el punto 44, donde la pieza montada 20 y con ello la sección longitudinal de la pala de rotor finaliza con el perfil particular, el grosor de perfil relativo toma un valor de un 60 % o menos. El punto 44 está separado además de la raíz de pala 12 una distancia de separación de un 10 % o más de la longitud de la pala de rotor.

La sección longitudinal de la pala de rotor con el perfil particular comienza en la tercera sección 24 a una distancia de separación de la raíz de pala 12 de al menos 0,5 metros, en el ejemplo a una distancia de separación de aproximadamente 1 metro. En la fig. 8 también se puede reconocer la línea curvada 38, en la superficie para completar el lado de aspiración 34 se convierte en las piezas del lado de aspiración 30 formadas por los componentes restantes de la pala de rotor.

Las características del perfil particular en la zona de toda la sección longitudinal mencionada se describen en primer lugar en base a la figura 11. En la sección de la fig. 11 está indicada la posición del eje longitudinal 60 de la pala de rotor aproximadamente en el centro de la sección representada, así como la del canto posterior 18. El canto posterior 18 y el eje longitudinal 60 se unen entre sí mediante una recta 62. El canto anterior 16 de la pala de rotor está marcado en la sección mediante una cruz. Además también está indicado el punto de remanso anterior 64 del perfil, así como la dirección de soplado nominal 66, que está identificada mediante una línea que apunta al punto de remanso anterior 64. También está indicado el plano del rotor 68 como plano de referencia. El plano de rotor 68 comprende al eje longitudinal 60 y está orientado perpendicular con respecto al eje de rotor 70 dibujado a trazo discontinuo. Se entiende que el eje del rotor 70 está situado fuera del plano de corte representado.

El perfil representado en la fig. 11 presenta una sección convexa del lado de aspiración 72, que se extiende desde el canto anterior 16 hasta un punto de pandeo en el lado de aspiración 74. Una sección para completar el lado de aspiración 76 discurre en línea recta desde el punto de pandeo 74 hacia el canto posterior 18. El lado de presión del perfil está formado por una sección convexa del lado de presión 78, que se extiende desde el canto anterior 16 hasta un punto de giro en el lado de presión 80, y desde una sección cóncava para completar el lado de presión 82, que se extiende desde el punto de giro en el lado de presión 80 hasta el canto posterior 18.

Una tangente apoyada en la zona del canto posterior 18 contra la sección cóncava que completa el lado de presión 82 está orientada sustancialmente en la dirección del plano del rotor 68. En la dirección del plano del rotor 68 discurre también la sección que completa el lado de aspiración 76. Los extremos de la sección que completa el lado de aspiración 76 y de la sección que completa el lado de presión 82 que delimitan con el canto posterior 18, forman un ángulo agudo entre sí.

El ángulo α_3 está definido entre el plano del rotor 68 como plano de referencia y la recta 62. La posición del canto posterior 18 en la sección se describe mediante el ángulo α_3 .

Las características mencionadas también están presentes en las secciones restantes de las figuras 9 a 19, y

5 provistas de los mismos símbolos de referencia. En la fig. 12 está dibujada además una cuerda 84, que discurre desde el canto anterior 16 hacia el canto posterior 18. También está representada la proyección del punto de giro en el lado de presión 80 hacia la cuerda 84. La distancia de separación 86 medida a lo largo de la cuerda del punto de giro del lado de presión 80 con respecto al canto anterior 16, identificada mediante 86, toma un valor en la posición longitudinal de la pala de rotor mostrada en la fig. 12 de aproximadamente un 75 % de la profundidad de perfil.

10 El ángulo α_3 adopta aproximadamente los siguientes valores en las posiciones longitudinales de las secciones mostradas en las figuras 9 a 19: fig. 9: $-22,5^\circ$, fig. 10: -2° , fig. 11: 8° , fig. 12: 13° , fig. 13: $15,5^\circ$, fig. 14: 16° , fig. 15: 12° , fig. 16: 7° , fig. 17: $3,5^\circ$, fig. 18: 2° , fig. 19: 0° . Aproximadamente en la posición longitudinal de la sección de la fig. 14, el ángulo α_3 adopta de este modo un valor máximo. Esta posición longitudinal se corresponde con la segunda sección 52. Partiendo de una posición longitudinal no representada próxima a la punta de pala, el ángulo α_3 aumenta por lo tanto de forma monótona creciente hacia la raíz de pala hasta la posición longitudinal de la segunda sección 52, alcanza en la segunda sección 52 un máximo y decrece a continuación de forma estrictamente monótona hasta la tercera sección 24.

15 La sección de la fig. 19 se encuentra en una posición longitudinal de la pala de rotor próxima al extremo del lado de la punta de pala de la pieza montada 20. En esta posición, el grosor relativo del perfil toma un valor de aproximadamente un 50 %.

20 En las fig. 17, 18 y 19 se puede reconocer también el "grosso canto posterior" de los componentes restantes de la pala de rotor y provisto del símbolo de referencia 46. Se puede diferenciar del canto posterior 18 de la pala de rotor.

25 En la fig. 20 están representadas las secciones de las figuras 9 a 19 con eje longitudinal 60 superpuesto. En esta representación se puede reconocer la transición de una sección aproximadamente circular, tal y como está representada en la fig. 9, a la sección de la fig. 19, que se corresponde ya ampliamente con un perfil aerodinámico a modo de plano de sustentación. También se puede reconocer la dirección de soplado nominal 66 que gira con una distancia de separación que se reduce cada vez más desde la raíz de pala en dirección hacia el eje del rotor 70. Este giro de la dirección de soplado nominal 66 está representada mediante la flecha 85. Asimismo, de la representación de la fig. 20 se puede deducir la trayectoria curvada del canto posterior 18, que en la sección de la fig. 14 ha alcanzado un máximo.

35 La fig. 21 muestra una corriente de aire que se forma en un plano de sección alrededor de la pala de rotor durante el funcionamiento. Se puede reconocer bien el punto de remanso anterior 64, en el que se divide el aire en una parte que fluye por el lado de aspiración y otra por el lado de presión. En la zona del lado de presión el flujo se apoya en su mayor grado contra el perfil. En el canto posterior 18, fluye de forma plana en la dirección del plano del rotor, de nuevo en el ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial. Por encima de la sección rectilínea para completar el lado de aspiración 76, comenzando aproximadamente a partir del punto 86 de la sección convexa del lado de aspiración 72, se desatan corrientes y se produce la formación de una zona de turbulencias 88. La línea de división de flujo 90 divide la zona de turbulencias 88 de la corriente en la zona 92 que vuelve a discurrir de forma laminar a una mayor distancia de separación de la sección para completar el lado de aspiración 76. La línea de división de flujo 90 discurre aproximadamente paralela con respecto a la sección para completar el lado de aspiración 76 y al plano del rotor.

45 En la fig. 22 está mostrado otro ejemplo de realización de una pala de rotor en una sección. La sección presenta las características anteriormente mencionadas, que están identificadas con los mismos símbolos de referencia que en el primer ejemplo de realización. La pieza montada 20, que presenta la sección para completar el lado de aspiración 76 y la superficie para completar el lado de presión 82, está formada por un componente en forma de cubeta. El componente en forma de cubeta tiene un grosor uniforme, de tal forma que la sección para completar el lado de aspiración 76 y la superficie para completar el lado de presión 82 se encuentran a una distancia constante de separación entre sí. La transición de la pieza montada 20 a los componentes restantes de la pala de rotor discurre en el punto de giro en el lado de presión 80 con curvatura constante, en el punto de pandeo en el lado de aspiración 74 mediante la formación de un pandeo orientado hacia el interior.

REIVINDICACIONES

1. Pala de rotor para una instalación de energía eólica con un eje longitudinal (60), una punta de pala (10), una raíz de pala (12), un canto anterior (16), un canto posterior (18), un lado de presión (32), un lado de aspiración (30) y una sección dispuesta ortogonalmente con respecto al eje longitudinal (60) que varía desde la raíz de la pala (12) hacia la punta de la pala (10), que en la raíz de pala (12) es sustancialmente circular y que en el centro (14) de la pala de rotor está formada por un perfil aerodinámico, y un plano de referencia imaginario dispuesto de forma fija con respecto a la pala de rotor, que comprende el eje longitudinal (60) de la pala de rotor, en donde en una sección está definido un ángulo α_3 entre el plano de referencia y una recta (62), que une el eje longitudinal (60) con el canto posterior (18), y describe la posición del canto posterior (18), en donde el ángulo α_3 aumenta en una primera sección longitudinal de la pala de rotor a medida que se reduce la distancia de separación con respecto a la raíz de pala (12) y en una segunda sección longitudinal, que está dispuesta más próxima a la raíz de pala (12) que la primera sección longitudinal, se reduce a medida que se reduce la distancia de separación con respecto a la raíz de pala (12), en donde la primera sección longitudinal comienza en una primera sección y se extiende a lo largo de una mayor parte de la longitud de pala de rotor hasta una segunda sección (52), que está separada de la pala de rotor (12) menos que el 25 % de la longitud de la pala de rotor, y una sección posterior del lado de presión (32) en la segunda sección longitudinal presenta una primera curvatura cóncava en un plano de sección a través de la pala de rotor, caracterizada porque la sección posterior del lado de presión (32) está curvada dos veces en la segunda sección longitudinal con una segunda curvatura cóncava en un plano de corte, que está dispuesto perpendicular con respecto al plano del rotor (60) y paralelo al eje longitudinal (60).
2. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según la reivindicación 1, caracterizada porque la segunda sección longitudinal delimita directamente con la primera sección longitudinal en la segunda sección (52), en donde el ángulo α_3 presenta un máximo en la segunda sección (52).
3. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según la reivindicación 1 o 2, caracterizada porque la segunda sección longitudinal se extiende en dirección hacia la raíz de pala (12) hasta una tercera sección (24), que está dispuesta en una posición longitudinal de la pala de rotor, en la que finaliza el perfil aerodinámicamente efectivo de la pala de rotor.
4. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según la reivindicación 3, caracterizada porque la tercera sección (24) está dispuesta a una distancia de separación de 0,5 m o más de la raíz de pala (12).
5. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según la reivindicación 3 o 4, caracterizada porque la pala de rotor para una instalación de energía eólica presenta una velocidad específica nominal y se hace funcionar preferentemente en un modo de funcionamiento a carga parcial con un ángulo de paso óptimo predeterminado, que para la velocidad específica nominal da lugar a una extracción óptima de potencia del viento, y porque en la tercera sección (24) está definido un ángulo α_1 en un plano dispuesto perpendicular al plano del rotor y paralelo al eje longitudinal (60) de la pala de rotor entre el plano del rotor (48) y un plano tangencial (50) en el lado de presión (32) en el canto posterior (18), cuando la pala de rotor presenta el ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial, y porque el ángulo α_1 está comprendido en el intervalo entre 30° y 90°.
6. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según una de las reivindicaciones 3 a 5, caracterizada porque la pala de rotor para una instalación de energía eólica presenta una velocidad específica nominal y se hace funcionar preferentemente en un modo de funcionamiento a carga parcial con un ángulo de paso óptimo predeterminado, que para la velocidad específica nominal da lugar a una extracción óptima de potencia del viento, y porque en la tercera sección (24) está definido un ángulo α_2 en el plano del rotor entre el eje longitudinal (60) de la pala de rotor y la proyección sobre el plano de rotor de una tangente (58) en el canto posterior (18) de la pala de rotor, cuando la pala de rotor presenta el ángulo de paso optimizado para el modo de funcionamiento a carga parcial, y porque el ángulo α_2 está comprendido en el intervalo entre 25° y 90°.
7. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según una de las reivindicaciones 3 a 6, caracterizada porque está conformado un ángulo agudo entre un plano tangencial en el lado de presión (32) en el canto posterior (18) en la tercera sección (24) y un plano tangencial en el lado de aspiración (30) en el canto posterior (18) en la tercera sección (24).
8. Pala de rotor para una instalación de energía eólica según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizada porque una sección posterior del lado de aspiración (30) en la segunda sección longitudinal, que está enfrentada a la sección con doble curvatura cóncava del lado de presión (32), discurre aproximadamente de forma

rectilínea en la dirección de la sección de la pala de rotor.

Fig. 1

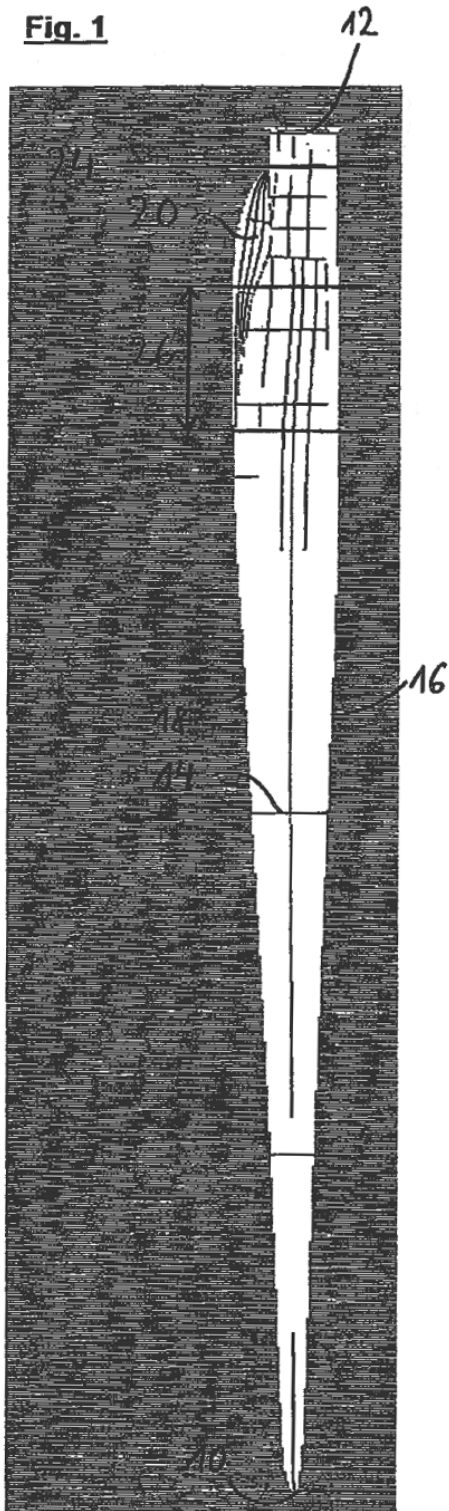
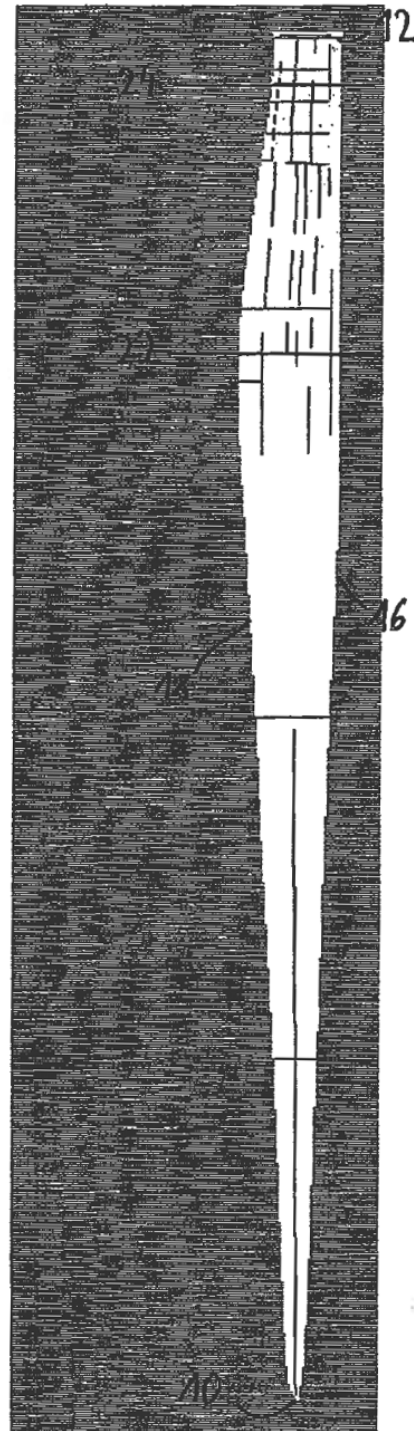
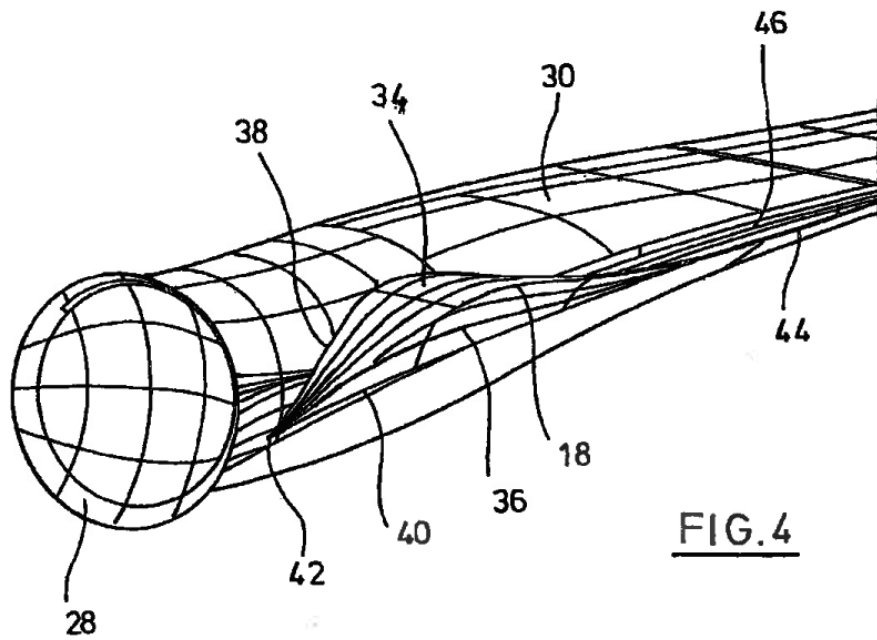
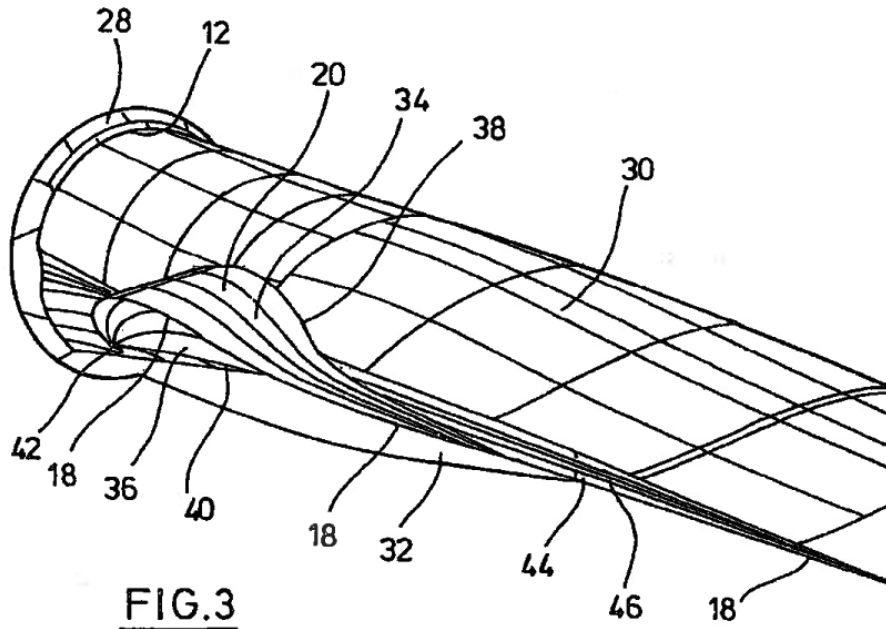


Fig. 2





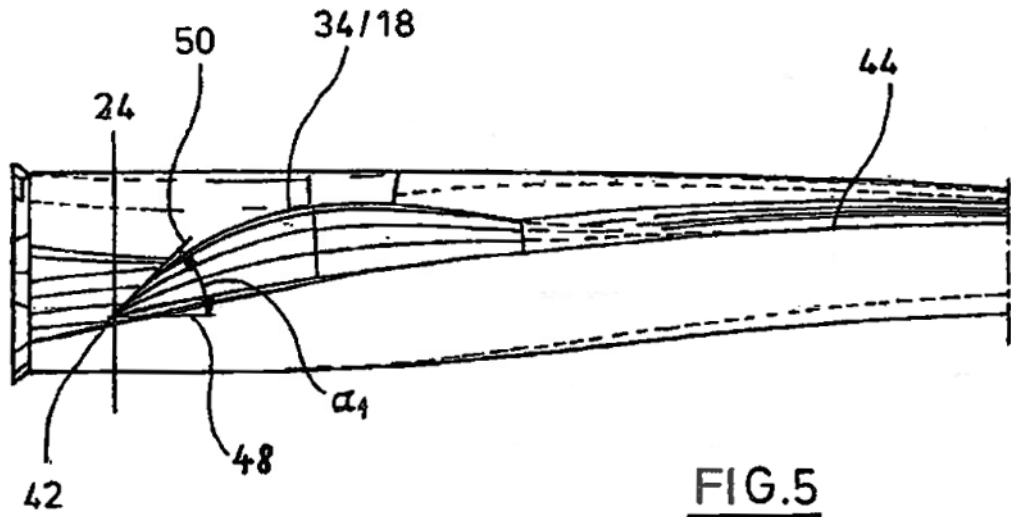


FIG. 5

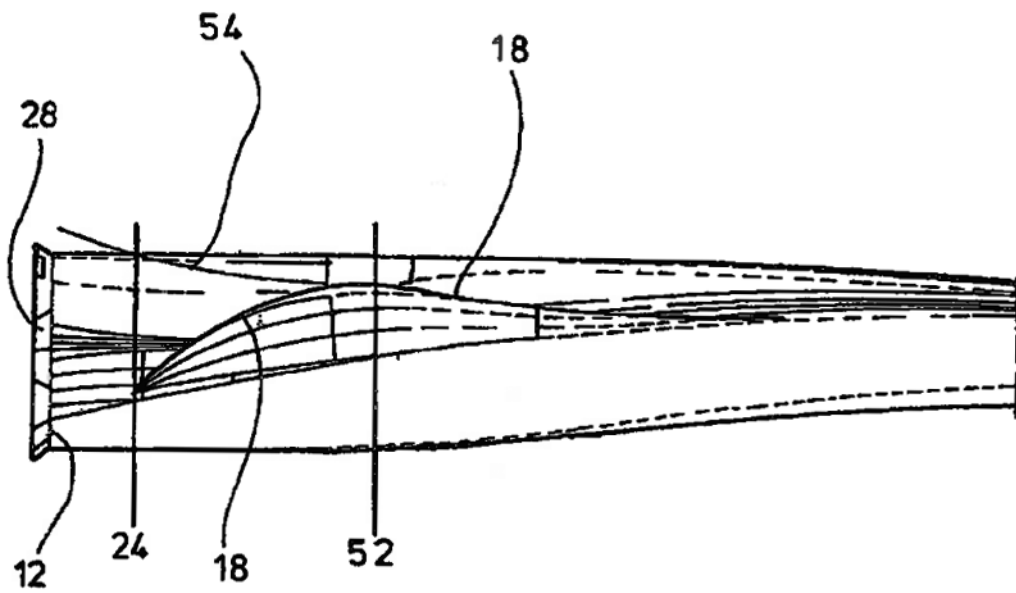


FIG. 6

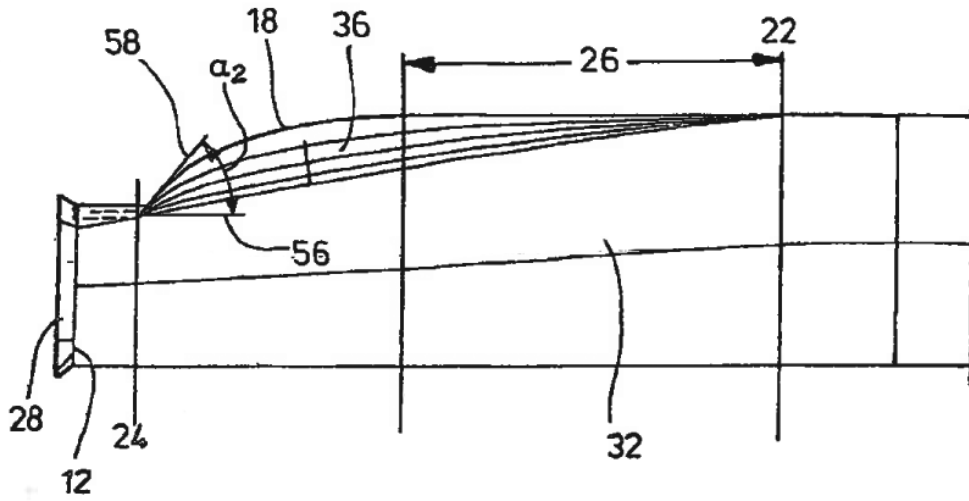


FIG. 7

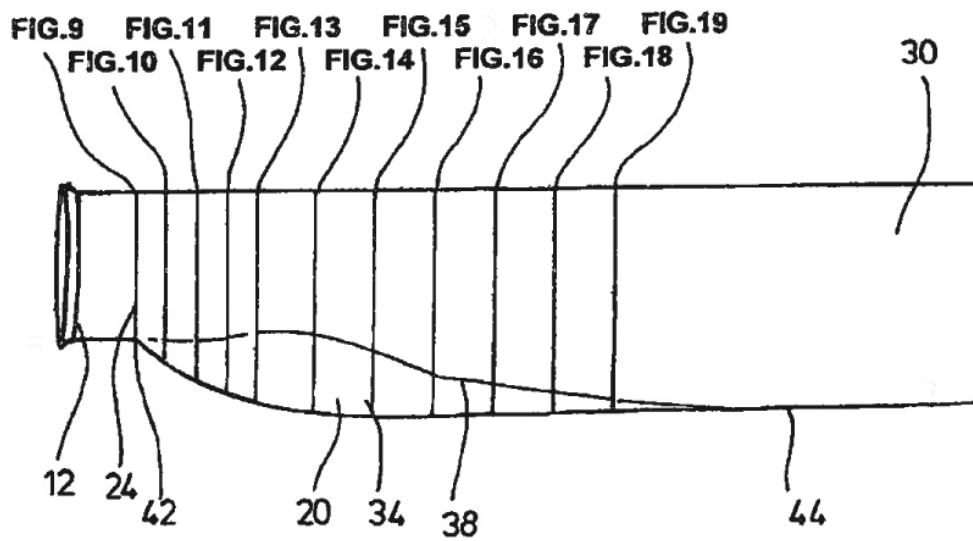


FIG. 8

Fig. 9

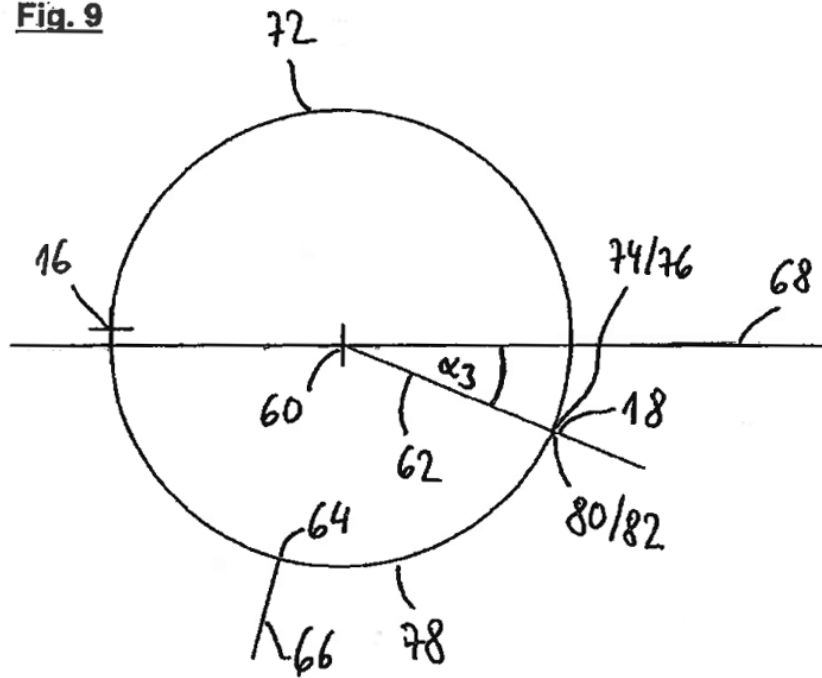


Fig. 10

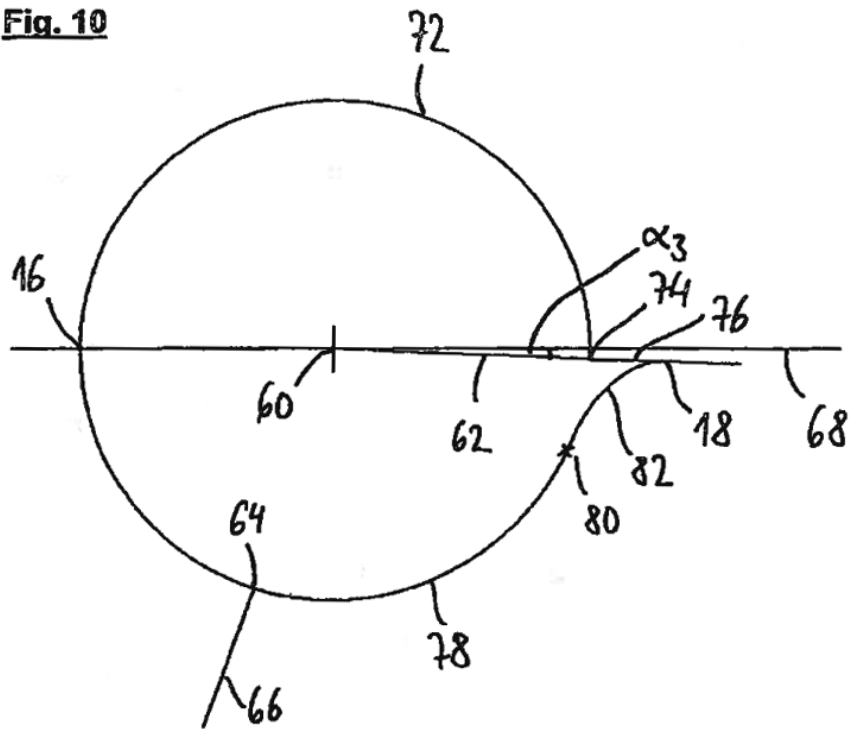


Fig. 11

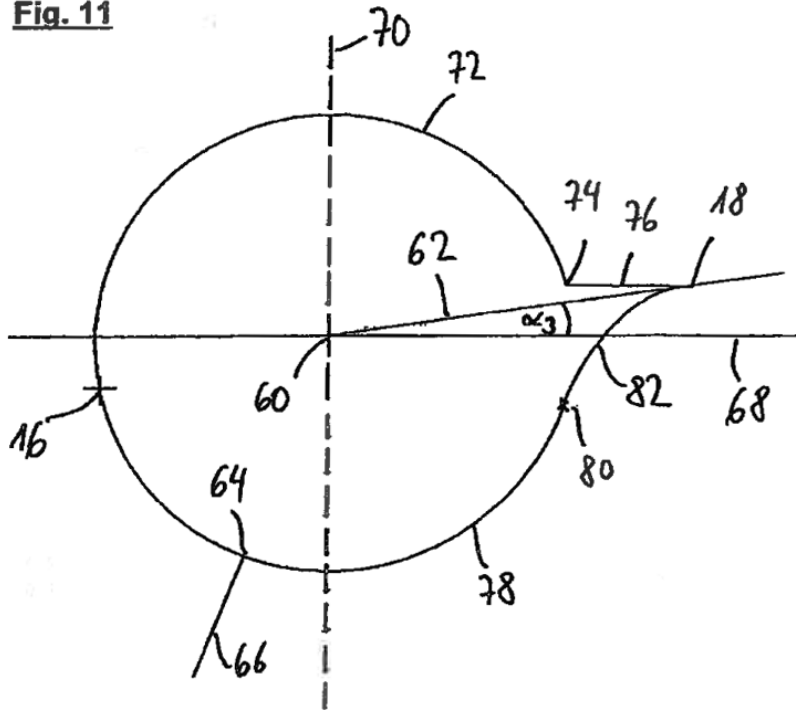


Fig. 12

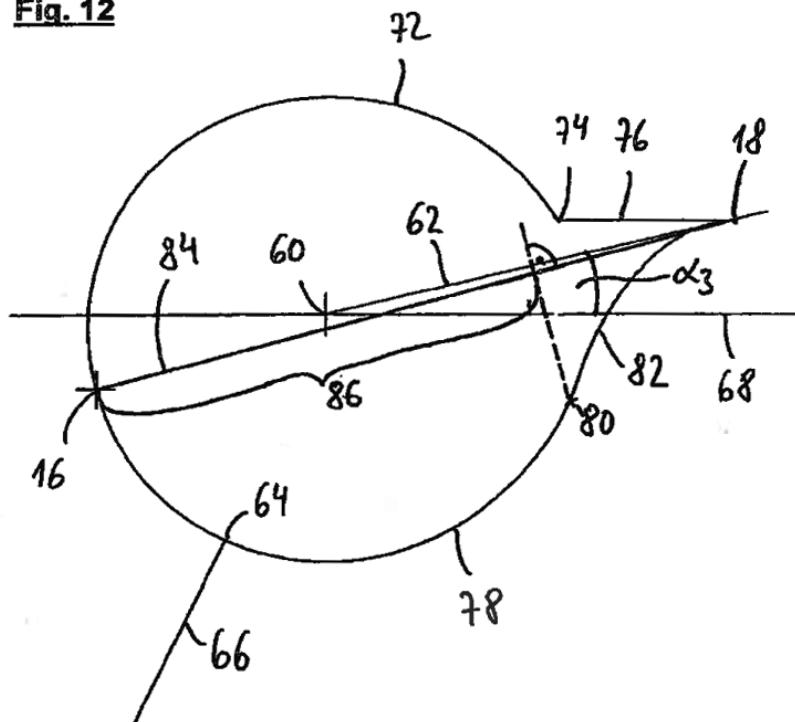


Fig. 13

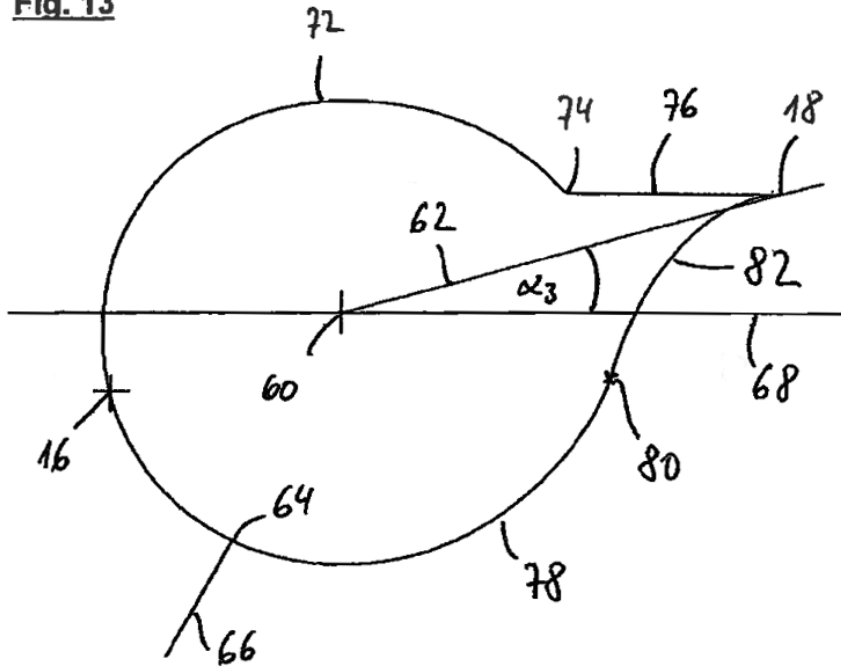


Fig. 14

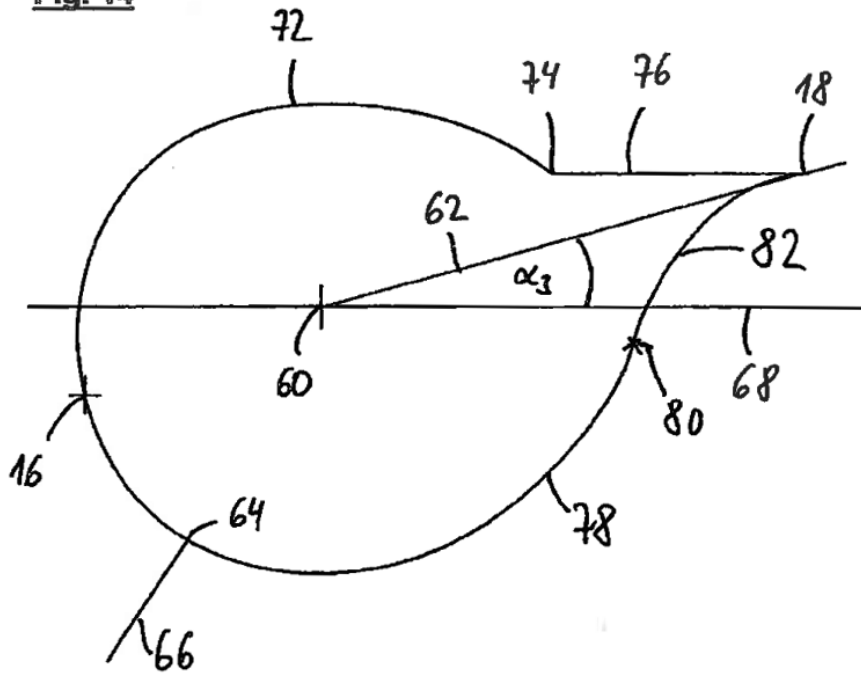


Fig. 15

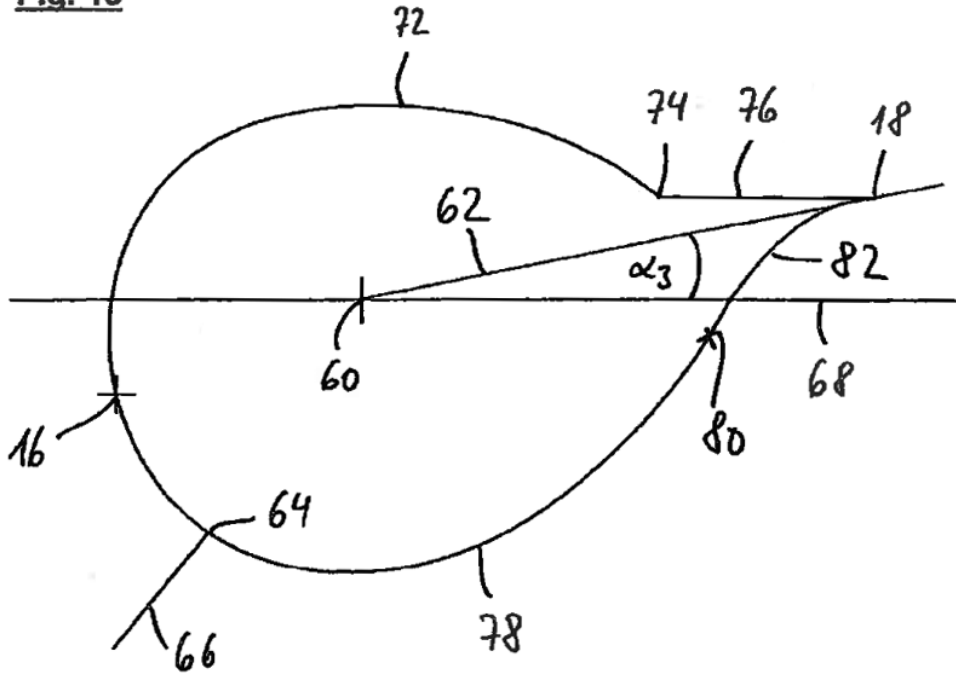


Fig. 16

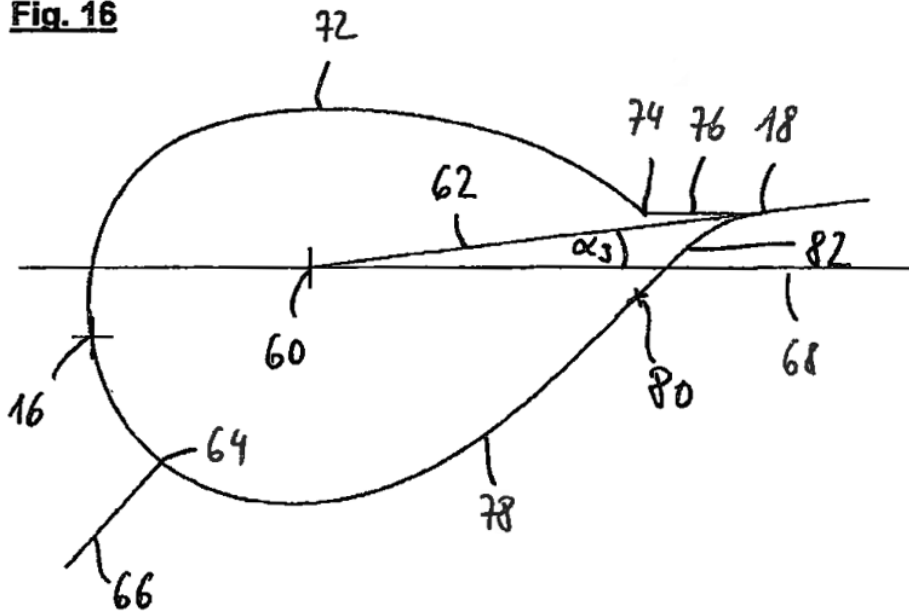


Fig. 17

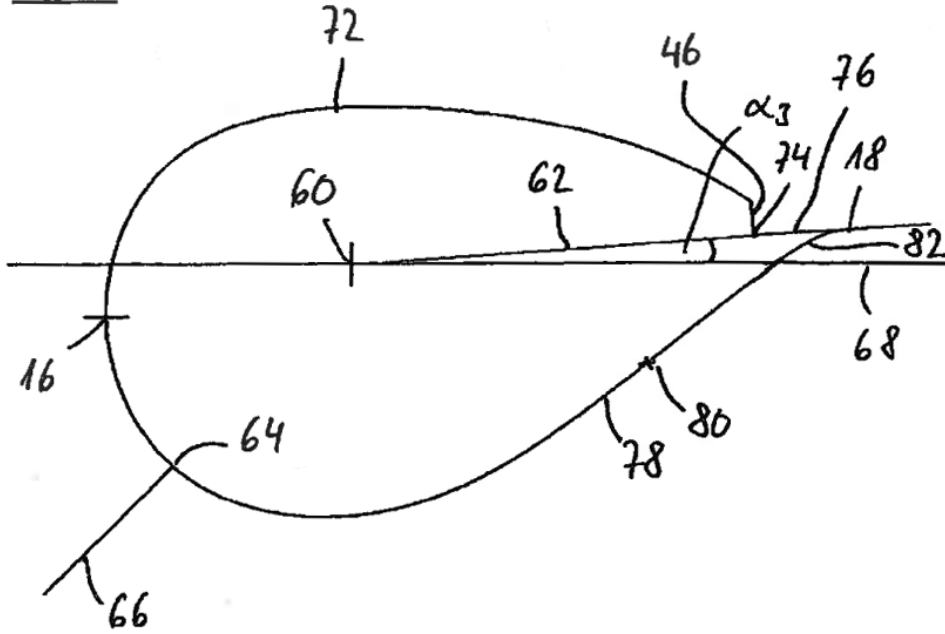


Fig. 18

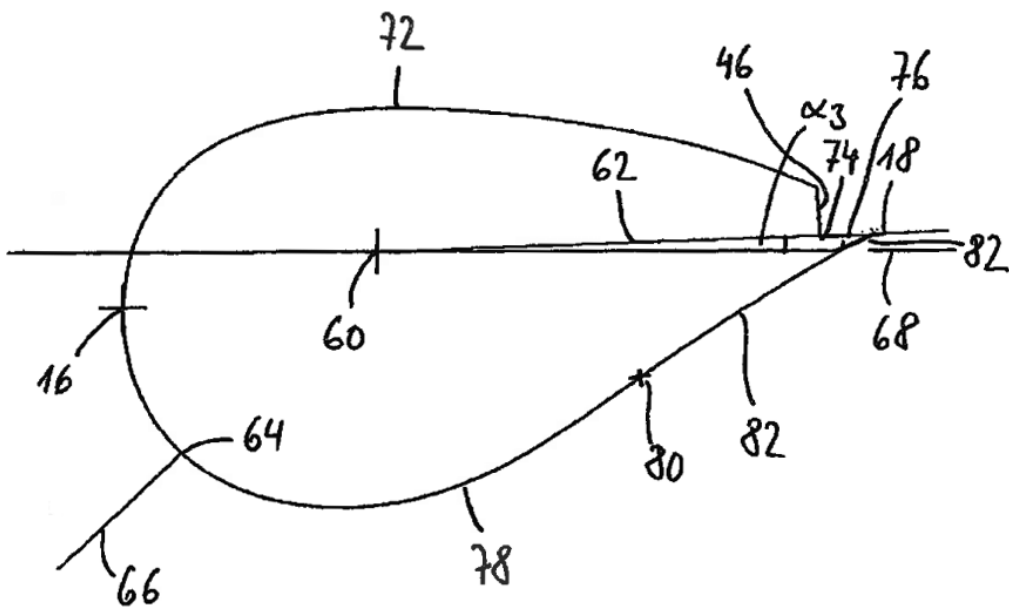


Fig. 19

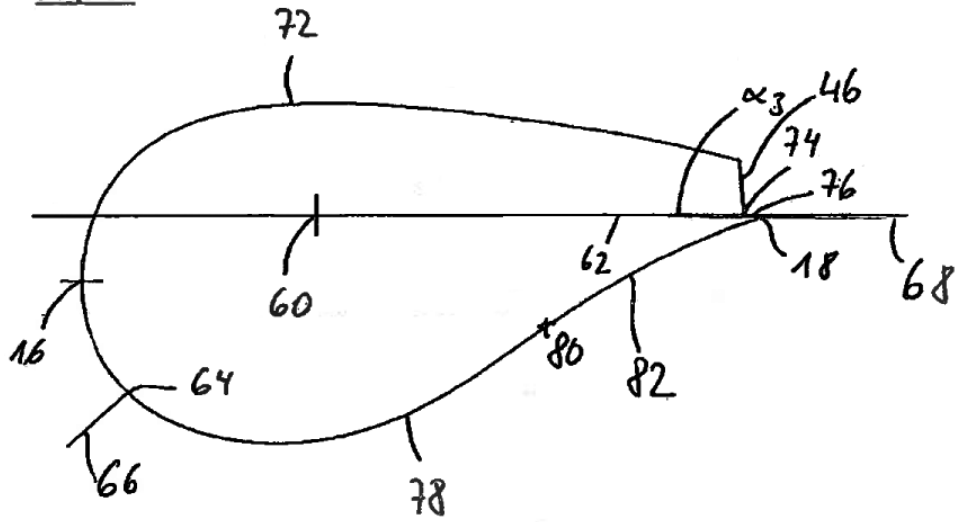


Fig. 20

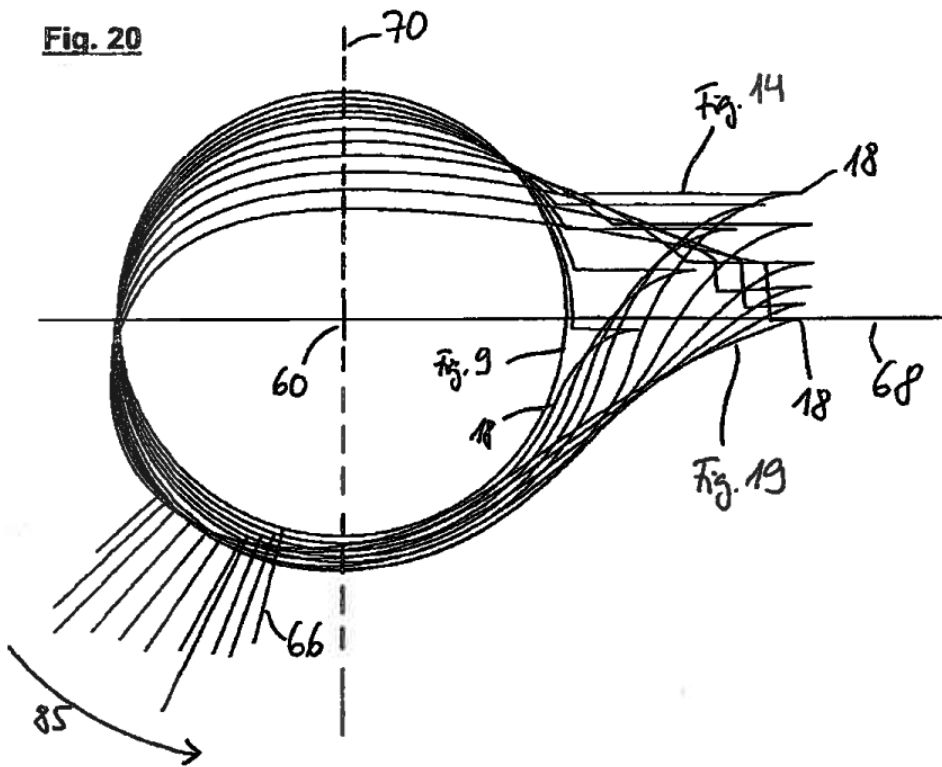


Fig. 21

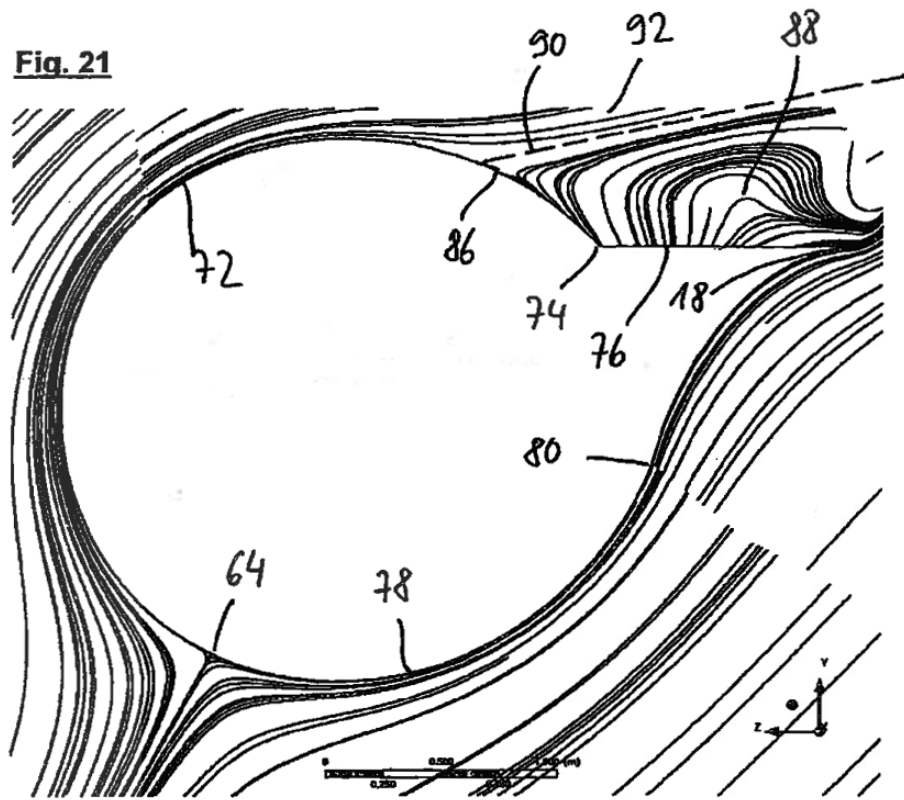


Fig. 22

