

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 926 230**

51 Int. Cl.:

G01S 7/481 (2006.01)

G01S 7/4911 (2010.01)

G01S 7/4912 (2010.01)

G01S 17/34 (2010.01)

G01S 17/58 (2006.01)

G01S 17/95 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.03.2018 PCT/EP2018/057050**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.09.2018 WO18172369**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.03.2018 E 18714737 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.06.2022 EP 3612860**

54 Título: **Dispositivo de medición lidar**

30 Prioridad:

22.03.2017 DE 102017106226

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

24.10.2022

73 Titular/es:

**METEK METEOROLOGISCHE MESSTECHNIK
GMBH (100.0%)
Fritz-Straßmann-Str. 4
25337 Elmshorn, DE**

72 Inventor/es:

**PETERS, GERHARD;
BRINKMEYER, ERNST y
BOLLIG, CHRISTOPH**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 926 230 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

Dispositivo de medición lidar

5 La invención se refiere a un dispositivo de medición lidar así como a un procedimiento para la determinación de la velocidad de partículas en un volumen de medición. Con ayuda del dispositivo descrito así como del procedimiento se realiza la medición de una velocidad del viento en un volumen de medición alejado con una fuente de luz láser de onda continua de banda estrecha. La luz emitida por la fuente de luz láser de onda continua se acopla en una rama de medición y una rama de referencia, donde al menos una parte de la luz acoplada en la rama de medición se emite
10 al menos parcialmente a través de un equipo emisor en dirección al volumen de medición de tal manera que la luz emitida se dispersa y/o se refleja al menos parcialmente por las partículas en el volumen de medición, de modo que al menos una parte de la luz dispersada y/o reflejada se recibe por un equipo receptor. Esta luz dispersa o bien reflejada recibida se superpone de manera coherente finalmente con la luz que abandona la rama de referencia y la radiación de luz resultante se dirige a un detector para la generación de una señal de detector característica de la
15 radiación de luz resultante. En una unidad de evaluación se determina la velocidad de las partículas en el volumen de medición teniendo en cuenta la señal de detector.

En general, se conocen desde hace muchos años procedimientos de medición basados en el suelo para la determinación de la velocidad del viento y la dirección del viento para diferentes intervalos de altitud de la atmósfera,
20 por ejemplo, para la supervisión de emisores de contaminantes industriales, para la predicción del tiempo, así como para la investigación atmosférica y climática. En este contexto, por ejemplo, se utilizan los llamados sistemas de medición sodar para la medición del viento, donde aprovechan el efecto Doppler en las ondas sonoras que se retrodispersan desde la atmósfera. Debido al aprovechamiento cada vez más importante de la energía eólica en los últimos años, se ha abierto un nuevo campo de aplicación significativo para tales procedimientos de medición para la
25 medición de la velocidad y de la dirección del viento en áreas alejadas del equipo de medición real. Además de los conocidos sistemas sodar, los llamados sistemas de medición lidar, en los cuales se aprovecha luz en lugar de sonido y que son parcialmente superiores al sodar, se utilizan recientemente para tales mediciones.

Lidar (siglas en inglés para "Light Detection and Ranging") es un procedimiento similar al radar para la medición óptica
30 de la distancia y la velocidad, así como para la medición de parámetros atmosféricos. Los sistemas lidar para la medición de la atmósfera emiten radiación láser y detectan la luz retrodispersada desde la atmósfera. A partir del tiempo de recorrido de luz de las señales, se calcula la distancia al lugar de la dispersión. En particular, las nubes y las partículas de polvo en el aire dispersan la luz láser y posibilitan una selección de alta resolución y una medición de la distancia de las nubes y las capas de aerosol.

35 Aparte de eso, con los sistemas de medición lidar es posible determinar la velocidad del viento que prevalece en un lugar alejado del dispositivo de medición a través de la medición de la luz que se dispersa o bien refleja en partículas movidas por el viento. Este tipo de medición se puede aprovechar en particular para medir la velocidad del viento que prevalece delante de un aerogenerador a una distancia de hasta unos pocos 100 m y adaptar parámetros técnicos de
40 regulación del aerogenerador sobre la base de la velocidad del viento medida. Con ello se pretende, por un lado, garantizar un aprovechamiento lo más eficaz posible de un aerogenerador y, por otro lado, sobrecargas de la instalación debido a eventos de viento especiales. De esta manera, por ejemplo, en caso de ráfagas de viento extremas, las medidas de emergencia se pueden iniciar a tiempo para evitar en gran medida un daño del aerogenerador.

45 Los sistemas de medición lidar conocidos para la determinación de las velocidades del viento se basan en la detección y evaluación del desplazamiento de frecuencia Doppler de la luz dispersa provocado por la dispersión de la luz láser en las partículas movidas por el viento en comparación con la luz emitida (cf.: C. Weitkamp, *LIDAR-range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, Springer 2005).

50 Por lo general, el desplazamiento de frecuencia Doppler se determina interferométricamente mediante la superposición de la luz dispersa recibida por el dispositivo de medición con luz que se acopla por la fuente de luz láser a través de una segunda trayectoria óptica dentro del dispositivo de medición. Para este propósito, los dispositivos de medición lidar conocidos utilizan fuentes de luz láser altamente coherentes que emiten luz con longitudes de coherencia de
55 varios 100 m, en las que el ancho de banda de la frecuencia está en el rango de sub MHz.

Para garantizar en cada caso la resolución espacial requerida o bien deseada, en principio se conocen dos maneras de proceder diferentes. Una primera variante técnica prevé utilizar fuentes de láser de onda continua, que se enfocan en el área objetivo en cada caso deseada con la ayuda de un sistema óptico adecuado, por ejemplo, una lente o un
60 telescopio. Una solución técnica correspondiente se describe en el documento WO 2005/1142531. Si se desea modificar el área de enfoque deseada, esto se consigue con la ayuda de elementos mecánicos que, sin embargo, suelen ser relativamente complejos y caros. Aparte de eso, tales elementos de ajuste conllevan el riesgo de

perturbaciones adicionales, sobre todo en el funcionamiento a largo plazo.

Una segunda variante técnica para lograr y modificar la resolución espacial deseada se basa en el aprovechamiento de fuentes láser pulsadas. En este caso, la determinación espacial se realiza mediante una medición del tiempo de recorrido de los pulsos láser. De esta manera, con un pulso, cuyo ancho de pulso determina la resolución espacial, que para pulsos con una anchura de 200 ns es, por ejemplo, 30 m, se pueden medir sucesivamente varios intervalos de medición a través del sistema de medición. En este sentido, los intervalos de medición individuales medidos sucesivamente pueden representar en cada caso secciones parciales del volumen de medición en conjunto a examinar.

10

Sin embargo, debido a la iluminación, que se realiza en cada caso solo por un corto tiempo, de un único intervalo de medición a través de un pulso, se producen malas relaciones señal/ruido. Aparte de eso, la resolución de frecuencia y con ello también la resolución de la velocidad del viento está limitada debido a los anchos de pulso cortos.

15 A partir de los sistemas de medición descritos anteriormente, se conoce a partir del documento WO 2014/072514 otra solución técnica para la detección de la velocidad del viento en un área espacial alejada, que logra una modificación de la resolución espacial con medidas técnicas alternativas. Lo esencial para esta solución técnica es que, en lugar de las fuentes de luz láser comúnmente utilizadas, se utilice una fuente de luz de banda estrecha, que se modula con un patrón de fase definido. En primer lugar, debido al uso de una fuente láser de onda continua, se necesita una potencia de emisión relativamente baja en comparación con el lidar pulsado. Además, la resolución espacial no tiene que sopesarse con la resolución de velocidad, como en un lidar de pulso, sino que ambos parámetros se pueden seleccionar de forma independiente entre sí dentro de amplios límites. En comparación con el lidar de onda continua enfocado (CW-LIDAR, por sus siglas en inglés), esta solución ofrece, aparte de eso, la ventaja de que la resolución espacial no se vuelve más gruesa a medida que aumenta la distancia, sino que más bien es independiente de la distancia.

20 Un componente esencial del dispositivo de medición lidar descrito es un modulador, que se basa, por ejemplo, en el efecto electro-óptico en un material adecuado y asegura la modulación de fase deseada de la frecuencia de la luz emitida por un diodo láser. Este modulador representa, con respecto al dispositivo de medición, un componente relativamente caro, que, aparte de eso, requiere un control así como un suministro de energía adecuados.

25 El problema con los sistemas de medición lidar conocidos hasta ahora es que una resolución espacial solo se puede garantizar o bien con un esfuerzo comparativamente grande y componentes parcialmente susceptibles a fallas, o por el contrario se necesitan componentes optoelectrónicos comparativamente caros. Esto hace que sea considerablemente más difícil proporcionar dispositivos de medición lidar fiables y al mismo tiempo económicamente interesantes, en particular para el aprovechamiento de la energía eólica. Además, con los dispositivos de medición lidar conocidos, a menudo no es posible distinguir de manera satisfactoria un desplazamiento Doppler positivo originado por diferentes movimientos de las partículas en el intervalo de medición de un desplazamiento Doppler negativo. A menudo, se deben utilizar otros aparatos de medición de manera complementaria al dispositivo de medición lidar.

30 Además, Seiichi Kakuma describe: " Frequency-modulated continuous-wave laser radar using dual vertical-cavity surface-emitting laser diodes for real-time measurements of distance and radial velocity" (XP036152994) un "radar láser FMCW" para la medición de la distancia de partículas, así como la velocidad radial. Lo esencial de la solución descrita es que la fuente de luz láser dispone de dos emisores de superficie (VCSEL), cuya frecuencia puede modificarse en cada caso en un rango de 850 GHz, donde, durante la medición, se aumenta linealmente la frecuencia del un láser y se reduce la frecuencia del otro láser. Para la variación de las frecuencias, en este caso las corrientes de inyección se modulan sincronizadamente.

35 Philip Mitchell y col.: " Development of a High Speed Wideband Frequency Tunable Infra-Red Laser Source for Real Time Wind Array Sensing Applications" (XP040560240) revela una fuente de luz láser para una determinación de las velocidades del viento, donde asimismo a través de una variación en la corriente de inyección se puede provocar una modificación en la frecuencia de la luz emitida.

40 Teniendo en cuenta las soluciones técnicas conocidas por el estado de la técnica para la detección de la velocidad, así como la dirección de movimiento de partículas que se encuentran en un volumen de medición alejado, con la ayuda de un sistema de medición lidar y los problemas explicados anteriormente, el objetivo de la invención se basa en perfeccionar un sistema de medición lidar de tal manera que, con la ayuda de una estructura relativamente simple, sea posible una medición de velocidad altamente precisa de partículas que se mueven en el intervalo de medición alejado. La solución técnica a indicar debe posibilitar en este sentido, sobre todo, un ajuste comparativamente sencillo así como una regulación de la resolución espacial. Aparte de eso, se debe garantizar que también se pueda determinar de forma fiable una dirección de movimiento de las partículas en el intervalo de medición con medios sencillos, en

particular sin que se necesiten obligatoriamente equipos de medición adicionales o bien componentes complejos.

El objetivo mencionado anteriormente se logra con un dispositivo según la reivindicación 1, así como con un procedimiento según la reivindicación 14 4-3. Usos particularmente adecuados de la invención están indicados en las 5 reivindicaciones 12 y 13, 11 y 12. Formas de realización ventajosas de la invención son objeto de las reivindicaciones dependientes y se explican con más detalle en la siguiente descripción con referencia parcial a los ejemplos de realización.

La invención se basa en un dispositivo de medición lidar para la determinación de la velocidad de partículas en un 10 volumen de medición con una fuente de luz láser de onda continua de banda estrecha que emite luz, que se modula en su frecuencia óptica y luego se acopla en una rama de medición y en una rama de referencia. La luz acoplada en la rama de medición se emite al menos parcialmente a través de un equipo emisor en dirección al volumen de medición de tal manera que la luz emitida se dispersa y/o refleja al menos parcialmente por las partículas en el volumen de medición, de modo que al menos una parte de la luz dispersada y/o reflejada se recibe por un equipo receptor. Además, 15 la luz recibida se superpone de manera coherente con la luz que abandona la rama de referencia y la radiación de luz resultante de ello se dirige a un detector para la generación de una señal de detector característica de la radiación de luz resultante. En una unidad de evaluación, teniendo en cuenta la señal de detector, se determina finalmente la velocidad de las partículas en los intervalos de medición individuales del volumen de medición. Con

20 Bio invención aoihnot oioh de un equipo de control, la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser se varía de manera predeterminada y en la unidad de evaluación se efectúa un análisis espectral de la señal de detector teniendo en cuenta la modificación de frecuencia o bien la modulación de frecuencia predeterminada para el cálculo de la velocidad de las partículas en los intervalos de medición individuales del volumen de medición. Con respecto a la descripción de la invención, los términos modulación de frecuencia o bien modificación de frecuencia deben 25 entenderse como equivalentes.

En la evaluación de la radiación recibida se determina y evalúa en cada caso un desplazamiento de frecuencia Doppler entre la radiación que entra en el respectivo intervalo de medición y la radiación recibida, dispersada o bien reflejada. Es esencial para la invención que, a diferencia de las soluciones técnicas conocidas, la frecuencia de la luz emitida 30 por la fuente de luz láser se modifique o bien se module. Debido a la modulación de la frecuencia con ayuda de una función conocida, es posible seleccionar la resolución espacial y determinar específicamente la distancia entre el dispositivo de medición y el respectivo intervalo de medición a medir con las partículas contenidas en él.

Esto se consigue mediante el hecho de que, debido a la modificación de la frecuencia de la luz emitida, se logra una 35 ampliación y deformación espectral de la luz al menos en su mayor parte monocromática, donde el ancho de banda determina la longitud de coherencia. Por eso, es posible realizar diferentes longitudes de coherencia y, con ello, resoluciones espaciales con la misma fuente de luz láser. Como fuente de luz láser se utiliza una fuente de luz láser de banda estrecha, que es preferentemente luz con un ancho de banda que es inferior a 1 MHz, preferentemente inferior a 100 kHz, de manera especialmente preferente inferior a 10 kHz. El dispositivo de medición contiene 40 preferentemente un amplificador óptico, que puede encontrarse detrás de la fuente láser antes de la división en ramas de medición y de referencia o en la rama de medición.

De manera ventajosa, la alimentación de corriente de la fuente de luz láser se modula directamente, lo cual en última instancia conduce a una variación de la frecuencia de la radiación de luz emitida y, con ello, del espectro de densidad 45 de potencia. Debido a la solución técnica utilizada, es decir, a la modulación de frecuencia de la luz emitida, se puede realizar una medición de alta precisión de la velocidad de las partículas que se mueven en un volumen de medición alejado sin el uso de componentes comparativamente caros.

Según una forma de realización especial de la invención, la fuente de luz láser está realizada como un diodo láser que 50 emite al menos aproximadamente luz monocromática. En este sentido, de manera preferente, la corriente de inyección del diodo láser se varía con la ayuda de un equipo de control realizado adecuadamente o bien con la ayuda de la señal de control generada por el equipo de control. Esta variación de la corriente de alimentación conduce, por un lado, a una variación normalmente insignificante de la potencia de salida y, por otro lado, a una variación deseada de la frecuencia óptica o bien de la longitud de onda de la luz emitida.

55 De esta manera, por ejemplo, en un láser DFB que emite luz en un intervalo de longitud de onda de 1530 a 1570 nm, preferentemente de 1550 nm, es posible lograr una modificación de la frecuencia óptica por modificación de la corriente de inyección en el intervalo de 0,5 a 1 GHz/mA. Sin embargo, tales láseres generalmente tienen un ancho de línea de 1 ... 3 MHz, que al menos no es muy adecuado para la aplicación descrita. Si se necesitan anchos de línea más 60 pequeños, por ejemplo, de 50-100 kHz, se pueden utilizar de manera ventajosa los llamados láseres de cavidad extendida (ECL, por sus siglas en inglés), que disponen de un coeficiente de ajuste que es mayor que 0,1 GHz/mA.

En lugar de implementar la modulación de frecuencia prevista mediante una modulación de la corriente de inyección, también se pueden utilizar diodos láser especiales con intervalos de sintonización de frecuencia y electrodos de ajuste separados.

- 5 En un perfeccionamiento especial, además de la modulación de frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser, la unidad de evaluación está realizada de tal manera que, en la evaluación de la señal de detector generada, se tiene en cuenta, por un lado, la función de frecuencia conocida y, por otro lado, un valor de desplazamiento temporal adicional. El valor de desplazamiento temporal se elige de tal manera que el resultado de la función corresponde a la señal de detector, que se produciría si se eligiera una rama de referencia, que presenta, con respecto a la rama de referencia real, un tiempo de recorrido modificado en torno al valor de desplazamiento temporal y, por lo tanto, también una longitud de trayectoria óptica modificada correspondientemente.

15 Esta configuración se basa en el reconocimiento de que la señal de detector no solo contiene la información necesaria para la evaluación sobre partículas en el intervalo de medición correspondiente a la longitud de trayectoria óptica real de la rama de referencia y a la longitud de coherencia, que representa solo una parte del área iluminada en conjunto, sino también en cada caso ya información sobre partículas en otras áreas iluminadas que, en la medición llevada a cabo momentáneamente, no corresponden al intervalo de medición seleccionado o bien a la resolución espacial seleccionada.

- 20 De manera ventajosa, se utiliza una fuente de luz láser de onda continua, cuya luz emitida presenta, debido a la modulación de frecuencia, una longitud de coherencia en un intervalo de 0,1 a 100 m. Resulta especialmente adecuada una longitud de coherencia en un intervalo de 1 a 100 m y resulta muy especialmente adecuada en un intervalo de 1 a 50 m. Al seleccionar la fuente de luz láser o bien al determinar la longitud de coherencia, debe tenerse en cuenta que la interferencia coherente en el detector solo es posible para la luz dispersa de partículas o bien solo para la luz reflejada de objetos para los que la longitud de trayectoria óptica de la rama de medición dentro de la longitud de coherencia coincide con la longitud de trayectoria óptica de la rama de referencia. Por esta razón, una longitud de coherencia muy limitada proporciona una alta resolución espacial que se puede ajustar mediante la elección de la longitud de coherencia. Por el contrario, la luz dispersa que llega a la disposición de detector, que emana de partículas que se encuentran fuera del intervalo de coherencia, únicamente conduce a un fondo de banda ancha en la señal de detector, lo cual puede conducir a una pequeña reducción de la relación señal-ruido, pero no afecta a la resolución espacial. Si el intervalo de coherencia es menor que la extensión máxima del volumen de medición, únicamente se mide una sección parcial, a saber, el respectivo intervalo de medición, y mediante desplazamiento del intervalo de coherencia, por ejemplo, con la ayuda de un equipo presente opcionalmente para la modificación de la longitud de trayectoria óptica de la rama de referencia, que se realiza preferentemente con medios computacionales, se puede conseguir una resolución espacial determinada por su longitud óptica, la longitud de coherencia. La resolución espacial es, de manera ventajosa, independiente de la distancia del intervalo de medición investigado en cada caso.

40 La invención se caracteriza porque el equipo de control está realizado de tal manera que la variación de la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser se realiza sobre la base de una señal de control generada por el equipo de control, que corresponde a una señal de pseudo-ruido originada por una función de frecuencia predeterminada. De esta manera, es posible modular la frecuencia de la luz emitida de la manera deseada y, en este sentido, en particular adaptar el espectro de densidad de potencia óptica a la manera deseada. Dado que se conoce la función de frecuencia utilizada en cada caso en el equipo de control, la respectiva fuente de luz láser se puede utilizar para la realización de diferentes longitudes de coherencia y, con ello, diferentes resoluciones espaciales.

45 En un perfeccionamiento especial de la invención, la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz de onda continua se varía de tal manera que presenta una parte lineal en el tiempo, esta última generada, por ejemplo, por una parte aproximadamente lineal en el tiempo en la corriente de inyección de diodos láser. Esto se puede combinar con la evolución de pseudo-ruido descrita anteriormente.

50 Esta medida permite de manera preferente un reconocimiento de signo en el desplazamiento de frecuencia originado por el efecto Doppler entre la frecuencia de la luz emitida y la de la luz recibida.

55 La señal derivada de la luz dispersada o bien reflejada recibida no contiene la información sobre la frecuencia de la luz, sino sobre la diferencia con respecto a la frecuencia de una luz de referencia que se dirigió por la fuente de luz láser a través de la rama de referencia. De esta diferencia se deduce, teniendo en cuenta el efecto Doppler, la velocidad de las partículas que se mueven en el volumen de medición. En el caso más simple, la luz de referencia se desvía del emisor y luego tiene la misma frecuencia que la luz emitida.

60 En este contexto, sin embargo, debe tenerse en cuenta que, dependiendo de la dirección de movimiento de las partículas en el volumen de medición hacia el lidar o alejándose del lidar, la diferencia de frecuencia puede tener un signo positivo o negativo. Debido a la modulación prevista según la invención de la frecuencia de la luz emitida por la

fuelle de luz láser, es concebible de manera preferente superponer la frecuencia de la luz con otra seña dependiente del tiempo lineal, de modo que también la frecuencia de emisión de la luz emitida en relación con el volumen de medición cambia linealmente. En este sentido, de manera ventajosa, está previsto que una diferencia entre la frecuencia de emisión y una frecuencia de la luz dispersada y/o reflejada recibida por el equipo receptor se seleccione de tal manera que, a pesar de un desplazamiento Doppler, originado por el movimiento de las partículas, de la frecuencia de la luz recibida, en comparación con la frecuencia de emisión, no se modifica un signo de la diferencia. En cuanto la diferencia entre la frecuencia de emisión y la frecuencia de recepción se selecciona de manera adecuada, especialmente grande, el desplazamiento Doppler ya no puede modificar el signo de la diferencia y se da claridad con respecto a la dirección de movimiento de las partículas en el volumen de medición.

10

En el diseño descrito anteriormente de la modulación de frecuencia lineal, la resolución de frecuencia puede deteriorarse de una manera no deseada. Esto se puede evitar mediante la limitación correspondiente de la inclinación de la modulación de frecuencia lineal. El signo eventualmente cambiante de la diferencia entre la frecuencia de emisión y la frecuencia de recepción puede detectarse mediante una modulación de frecuencia triangular y un análisis separado del ramal ascendente y descendente. En un ramal aparece la suma y en el otro ramal la diferencia entre desplazamiento Doppler y desplazamiento de frecuencia relacionado con el tiempo de recorrido.

15

En otra forma de realización especial de la invención, la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser de onda continua se modifica o bien se modula linealmente hacia arriba y hacia abajo. El desplazamiento de frecuencia resultante de la seña recibida con respecto a la seña de emisión depende a su vez de la distancia del intervalo de medición o bien del área de volumen, en la que tiene lugar la dispersión en las partículas, y del desplazamiento Doppler. La resolución de frecuencia se determina, como en el procedimiento descrito anteriormente, con modulación de frecuencia estocástica y lineal superpuesta por la inclinación de la modulación y la resolución espacial. La resolución espacial se genera en este caso de una manera conocida mediante enfoque, en particular con la ayuda de elementos ópticos ajustables de manera adecuada. Debido a la modulación triangular de la seña de emisión, en la evaluación de las frecuencias diferenciales en el ramal ascendente y descendente, como se describió anteriormente, también se puede determinar de manera preferente el signo del desplazamiento de frecuencia. En este sentido, la modulación triangular, en comparación con los procedimientos conocidos que prevén la determinación de la dirección del viento con un aparato de medición adicional, en particular con una veleta de viento, o la determinación de la proporción de distancia sobre la base de una medición separada, representa un procedimiento particularmente rentable para lograr una claridad en la determinación de la dirección de movimiento de las partículas en el volumen de medición. Otra ventaja de la modulación triangular es que mediante la evaluación de las frecuencias diferenciales en el ramal ascendente y descendente se puede derivar no solo el desplazamiento Doppler, sino también la distancia efectiva exacta del foco. Dependiendo de si el desplazamiento Doppler provoca o no un cambio de signo de las frecuencias diferenciales, el desplazamiento Doppler es igual a la mitad de la diferencia (suma) de las frecuencias diferenciales y la distancia del foco es igual a un cuarto de la velocidad de la luz multiplicada por la suma (diferencia) de las frecuencias diferenciales. Es fácil de decidir cuál es el caso, ya que se conoce la distancia aproximada del foco.

20

25

30

35

40

45

50

Un perfeccionamiento especial de la invención se caracteriza porque en la rama de medición se utiliza un conmutador óptico, por ejemplo, un modulador acústico-óptico. A este respecto, las longitudes de pulso deben seleccionarse de tal manera que sean más largas de lo que corresponde a la resolución espacial deseada, de modo que la resolución espacial esté determinada además por la modulación de frecuencia de la fuente láser. En este modo de funcionamiento, la seña de detector ya no está disponible en todo momento. Sin embargo, en determinados casos de aplicación resultan ventajas, por ejemplo, cuando no se pueden suprimir suficientemente los reflejos internos de la estructura de medición, cuando una superficie incoherente fuerte debido a un fuerte esparcidor fuera del volumen de medición empeora considerablemente la relación seña/ruido o cuando las propiedades especiales del amplificador óptico en el funcionamiento por impulsos permiten esperar una clara ventaja. Las ventajas de un sistema de medición realizado según la invención con láser pulsado consisten en que se pueden lograr alcances más largos en comparación con un funcionamiento no pulsado, sin la limitación de sistemas pulsados normales con respecto a la resolución espacial y la resolución de velocidad.

55

Un perfeccionamiento especial de la invención se caracteriza porque la luz emitida por la fuente de luz láser se transmite antes de la ramificación de la rama de medición y de referencia a un amplificador óptico, en particular a un amplificador de fibra de erbio. Aparte de eso, para el equipo de medición realizado según la invención se usan preferentemente fibras que conservan la polarización. Siempre que no se utilicen tales fibras, en general es concebible prever, en particular en la rama de referencia, al menos un elemento que polariza la luz, preferentemente un regulador de polarización.

60

Un equipo de medición lidar realizado según la invención, como se describe anteriormente, es especialmente adecuado para la detección de la velocidad del viento y/o de una dirección del viento que prevalece en el lado de barlovento de un aerogenerador. En este contexto, es concebible además que un equipo de medición lidar correspondiente se monte en el extractor centrífugo de un aerogenerador y, por tanto, la velocidad y la dirección del

viento del viento que fluye hacia el aerogenerador ya se puedan detectar a una distancia suficiente para, por un lado, permitir un funcionamiento efectivo del aerogenerador y, por otro lado, evitar daños en el aerogenerador, por ejemplo, a través de ráfagas de viento repentinas, sobre todo mediante el ajuste del paso de las palas del rotor para reducir la carga o mediante la introducción de una desconexión de emergencia.

5

Además, la invención se refiere también a un procedimiento para la determinación de la velocidad de partículas en un volumen de medición, en el que se emite luz con una fuente de luz láser de onda continua de banda estrecha y se acopla en una rama de medición y una rama de referencia. La luz acoplada en la rama de medición se emite al menos parcialmente a través de un equipo emisor en dirección al volumen de medición de tal manera que la luz emitida se dispersa y/o refleja al menos parcialmente por las partículas en el volumen de medición. Al menos una parte de la luz dispersada y/o reflejada se recibe por un equipo receptor del equipo de medición lidar, se superpone de forma coherente con la luz que abandona la rama de referencia y la radiación de luz resultante se dirige a un detector para la generación de una señal de detector característica de la radiación de luz resultante. Por último, en una unidad de evaluación, teniendo en cuenta la señal de detector, se determina la velocidad de las partículas en el volumen de medición. Con

Mi equipo de control se varía una frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser de una manera predeterminada, y en la unidad de evaluación se efectúa un análisis espectral de la señal de detector teniendo en cuenta la modulación de frecuencia predeterminada para el cálculo de la velocidad de las partículas en los intervalos de medición individuales del volumen de medición.

De manera ventajosa, como fuente de luz láser se utiliza un diodo láser, cuya corriente de inyección se varía sobre la base de una señal de control adecuada.

Sobre la base de una variación correspondiente de la frecuencia de la luz emitida por el diodo láser, es posible modificar la resolución espacial del equipo de medición lidar sin que se tenga que utilizar otra fuente de luz láser o sin necesidad de un ajuste mecánico.

El procedimiento realizado según la invención se caracteriza porque la variación de la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser se realiza sobre la base de una señal de control generada por el equipo de control, que corresponde a una señal de pseudo-ruido Rauoohoigni originada específicamente por una función de frecuencia predeterminada.

A continuación, la invención se explica más en detalle sin limitación de la idea inventiva general mediante ejemplos de realización con referencia a las figuras. A este respecto, muestran:

- La figura 1: estructura principal de un equipo de medición lidar realizado según la invención;
- La figura 2: evolución del espectro de densidad de potencia eléctrica en función de la frecuencia;
- La figura 3: evolución de una frecuencia modulada a lo largo de un período de tiempo;
- La figura 4: evolución de la corriente de inyector modulada a lo largo de un período de tiempo.

En la figura 1 está representado esquemáticamente un equipo de medición lidar realizado según la invención. El equipo de medición lidar dispone de una fuente de luz láser de onda continua 1 con una potencia de salida de 10 mW, que emite luz con una longitud de onda de 1550 nm. La luz emitida por la fuente de luz láser 1 se acopla, por un lado, con la ayuda de un acoplador de fibra óptica, que asume la función de un divisor de haz 2, en una rama de medición 3 definida al menos parcialmente por fibra óptica y, por otro lado, en una rama de referencia 4 definida completamente por fibra óptica.

En el caso de las fibras ópticas utilizadas, se trata preferentemente de fibras monomodo con baja amortiguación y un radio de campo de 5 μm ventajosamente. Se utilizan preferentemente fibras que conservan la polarización, denominadas fibras PM.

Al final de la rama de medición 3 y de la rama de referencia 4 está dispuesto otro acoplador de fibra óptica 5 para la unión de la luz de la rama de medición 3 y de la rama de referencia 4. La luz abandona la rama de referencia 4 se superpone de forma coherente con la luz recibida y la radiación de luz resultante se dirige al detector 6. Según este ejemplo de realización, el detector dispone de dos fotodetectores separados, que están realizados preferentemente como detectores InGaAs. Con ayuda del detector 6 se generan señales características para la radiación detectada, donde se sustraen las dos señales una de la otra en un elemento de sustracción 14 para la eliminación de perturbaciones (detección equilibrada). La señal diferencial se alimenta finalmente a través de un convertidor analógico-digital 12 a una unidad de evaluación 11, en la que se evalúa la señal diferencial para la detección de la presencia y/o el movimiento de partículas.

En caso de que no se utilicen fibras PM, en la rama de referencia 4 está previsto un regulador de polarización de fibra óptica ajustable y una trama de desviación, por ejemplo, en forma de una sección enrollada de la fibra.

La rama de medición presenta sucesivamente como amplificador 8 un amplificador de fibra de erbio con una potencia de salida preferente de 1 W y un circulador 7 óptico. Desde el circulador 7 se transmite la luz acoplada en la rama de medición 3 a través de una sección de fibra de una lente de emisión y recepción 10 con una distancia focal de, por ejemplo, 250 mm y desde aquí se enfoca en dirección al volumen de medición a medir o bien al respectivo intervalo de medición.

10 La radiación dispersada o bien reflejada en partículas en el volumen de medición entra al menos parcialmente de nuevo en la lente de emisión y recepción 10 del equipo de medición lidar. En el ejemplo de realización aquí representado, el equipo emisor y el dispositivo receptor están combinados en la lente emisora y receptora 10. La luz dispersada y/o reflejada recibida a través de ella se acopla a continuación a través del circulador 7 en la sección restante unida a fibras de la rama de medición 3.

15 La fuente de luz láser de onda continua 1 dispone de un diodo láser 9 y está acoplada a un equipo de control 13 que varía de manera adecuada la corriente de inyección del diodo láser 9, de modo que también se modifica la frecuencia de la luz emitida por el diodo láser. En el equipo de control 13 está depositada en cada caso, en función de la resolución espacial deseada, una función de frecuencia, de modo que la luz emitida por la fuente de luz láser 1 está modificada, en particular ampliada y deformada, en comparación con la luz emitida habitualmente por el diodo láser 9 mediante la modulación como función de la función de frecuencia en el espectro de densidad de potencia óptica. Por lo tanto, con la ayuda del equipo de control 13 se modifica la frecuencia de la luz emitida sobre la base de una función de frecuencia adecuada que define una señal de pseudo-ruido. Al tener en cuenta diferentes valores de desplazamiento en el tiempo durante la evaluación por la unidad de evaluación, la detección de partículas y su movimiento se pueden realizar por separado de forma puramente calculada sin modificar la estructura descrita para diferentes intervalos de medición distanciados a diferentes distancias de la lente 10.

Es esencial para la invención que la frecuencia de la luz emitida por una fuente de luz láser 1 se varíe específicamente, de modo que, a diferencia de las soluciones técnicas conocidas por el estado de la técnica, no se necesita ningún modulador de fase para la fuente de luz láser y, en lo sucesivo, ningún modulador óptico acústico (AOM, por sus siglas en inglés).

Para lograr una modulación de frecuencia adecuada, de modo que se pueda prescindir del modulador de fase utilizado según el estado de la técnica y, sin embargo, se obtenga una modulación de la frecuencia de la luz emitida que obtenga el mismo efecto que la modulación de fase 8(t) que se emplea en sistemas de medición conocidos, debe modificarse la frecuencia instantánea del diodo láser según

$$f_{\text{mom}}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt}$$

donde $\Theta(t)$ corresponde al valor de la respectiva fase. Para ello es necesaria una modulación de la corriente de inyección

$$\delta i_{\text{mod}}(t) = \frac{1}{\gamma_{\text{tun}}} f_{\text{mom}}(t) = \frac{1}{2\pi\gamma_{\text{tun}}} \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt}$$

No obstante, esto conduce a una modulación no deseada de la potencia de salida del láser

$$\delta P_{0,\text{mod}}(t) = \beta \cdot \delta i_{\text{mod}}(t) = \frac{\beta}{2\pi\gamma_{\text{tun}}} \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt}$$

donde $\beta = dP_0/di$ designa la llamada eficiencia de la pendiente (*slope efficiency*), para la cual se puede tomar como valor orientativo 0,2 mW/mA.

De la potencia de salida del láser $P_0 + \delta P_{0,\text{mod}}$, una parte ρ se acopla a la rama LO, donde la variación, relacionada con la modulación, de la potencia de emisión es irrelevante:

$$P_{LO} + \delta P_{LO}(t) = \rho (P_0 + \delta P_{0,mod}(t)) = \rho P_0 + \rho \beta \cdot \delta i_{mod}(t) = \rho P_0 + \frac{\rho \cdot \beta}{2 \pi \gamma_{tun}} \cdot \frac{d \Theta(t)}{dt}$$

Con una recepción equilibrada ideal, la variación en la potencia de LO no se nota. Con una recepción equilibrada real, se recibe en la salida una señal de CA de

5

$$\delta i_{Det} = \varepsilon \cdot \mathcal{R} \cdot \delta P_{LO}(t) = \frac{\varepsilon \cdot \mathcal{R} \cdot P_{LO} \cdot \beta}{2 \pi \gamma_{tun} \cdot P_0} \cdot \frac{d \Theta(t)}{dt}$$

con la sensibilidad de reacción de fotodiodo vigente para el detector "R= 1 A/W. Para la comparación se obtiene para una señal útil (ecualizada) de la potencia P_{signal} una corriente de detector con el valor efectivo

$$i_{signal,eff} = \mathcal{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{P_{signal} \cdot P_{LO}}$$

10

Para una comparación aproximada, el valor efectivo cuadrado de $f_{mom}(t)$ se estima con

$$\overline{f_{mom}^2(t)} = \frac{1}{2} f_{max}^2$$

15 De ello se desprende lo siguiente

$$\frac{(\overline{\delta i_{Det}})^2}{(\overline{i_{signal,eff}})^2} \cong \left(\frac{\varepsilon \mathcal{R} P_{LO} \beta \cdot f_{max}}{\gamma_{tun} \cdot P_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{\mathcal{R}^2 \cdot P_{signal} \cdot P_{LO}} = \left(\frac{\varepsilon \beta \cdot f_{max}}{\gamma_{tun} \cdot P_0} \right)^2 \cdot \frac{P_{LO}}{P_{signal}}$$

Con

20

$c = 0.01$; $\beta = 0.2 \text{ m W / mA}$, $\gamma_{tun} = 100 \text{ MHz / mA}$, $P_0 = 20 \text{ m W}$, $f_{maji} =$; $P_{LO} = 100 \text{ cW}$ resulta de esto

$$\frac{(\overline{\delta i_{Det}})^2}{(\overline{i_{signal,eff}})^2} \cong \frac{10^{-14} \text{ W}}{P_{signal}}$$

25 Esta comparación deja claro que, con un valor efectivo de este tipo, el sustrato de ruido inducido por la modulación es insignificante. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que la señal es de banda estrecha, por ejemplo, 100 kHz, mientras que el ruido inducido por la modulación es de banda ancha y se centra en el intervalo de frecuencia de muy baja frecuencia, como está representado en la figura 2.

30 En la modulación de fase, conocida por el estado de la técnica, con modulador de fase electro-óptico, se utiliza la fase predeterminada $O(t)$ para la ecualización. El modulador de fase se controla con una señal proporcional a la fase. En este sentido, puede producirse un error de escala, de modo que la fase impresa en la señal óptica es $\dot{O}(t) = z7 \dots 1, - O(t)$. En este contexto, se sabe que los valores de $\eta_{scale} = 0.9 \dots 1.1$ no son críticos.

35 En la modulación directa, prevista según la invención, de la fuente de luz láser con la ayuda de una función de frecuencia adecuada, se imprime a la corriente de inyección una señal de modulación según

$$\delta i_{mod}(t) = \frac{1}{\gamma_{tun}} f_{mom}(t) = \frac{1}{2 \pi \gamma_{tun}} \cdot \frac{d \Theta(t)}{dt}$$

40 . En este caso, también se producirá un error de escala, para el que se aplicará lo siguiente

$$\delta \tilde{i}_{\text{mod}}(t) = \eta_{\text{scale}} \cdot \frac{1}{2\pi\gamma_{\text{tun}}} \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi\gamma_{\text{tun}}} \cdot \frac{d(\eta_{\text{scale}}\Theta(t))}{dt}$$

de modo que los efectos sean los mismos. De ello resulta inmediatamente que el equipo de medición lidar según la invención, en el que se efectúa una modulación de frecuencia directamente en la fuente de luz láser, es realizable, de modo que se puede prescindir del modulador de fase utilizado hasta ahora.

Como ya se ha demostrado en las realizaciones anteriores, por el estado de la técnica se conoce someter la onda óptica emitida por una fuente de luz láser con la ayuda de un modulador de fase a una modulación de fase $\Theta(t)$ predeterminada y desplazar la frecuencia óptica en un brazo de interferómetro por un modulador acústico-óptico (AOM) en f_{AOM} . Un objetivo de punto en reposo en la distancia z proporciona entonces una señal del detector

$$u(t) \propto \exp \left\{ j \left[2\pi f_{\text{AOM}} t + \Theta \left(t - \frac{2z}{c} \right) - \Theta(t) \right] \right\} \quad (1)$$

Si el objetivo se mueve a la velocidad v en la dirección $+z$, entonces se produce adicionalmente un desplazamiento Doppler

$$f_{\text{Doppler}} = -\frac{2}{\lambda} v \quad \text{auf.}$$

$$u(t) \propto \exp \left\{ j \left[2\pi f_{\text{AOM}} t + 2\pi f_{\text{Doppler}} t + \Theta \left(t - \frac{2z}{c} \right) - \Theta(t) \right] \right\} \quad (2)$$

Esta señal se puede multiplicar para la ecualización con la función conocida

$$h(t; z) \propto \exp \left\{ -j \left[\Theta \left(t - \frac{2z}{c} \right) - \Theta(t) \right] \right\} \quad (3)$$

La señal ecualizada para la posición z es entonces puramente sinusoidal:

$$u_{\text{ent}}(t) = u(t) \cdot h(t; z) \propto \exp \left\{ j \left[2\pi f_{\text{AOM}} t + 2\pi f_{\text{Doppler}} t \right] \right\} \quad (4)$$

En el espectro, proporciona una línea estrecha en $f_{\text{AOM}} + f_{\text{Doppler}}$.

5 Sin embargo, si se utiliza esta función de ecualización $h(t; z)$, el objetivo se encuentra en el lugar $z_1 < z - \frac{\Delta z_{LC}}{2}$ o $z_2 > z + \frac{\Delta z_{LC}}{2}$, de modo que el espectro de densidad de potencia eléctrica es amplio. La anchura depende de $\Theta(T)$.

Asimismo, el tamaño Δz_{LC} depende del patrón de fase $e(t)$ y se denomina resolución espacial, debido a la "baja coherencia" inducida por modulación. Patrones de fase correspondientes, por ejemplo, para $\Delta z_{LC} = 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}$ se pueden encontrar numéricamente a través de un procedimiento especial de iteración. Objetivos en el intervalo

$$\left[z - \frac{\Delta z_{LC}}{2}, z + \frac{\Delta z_{LC}}{2} \right] \quad (5)$$

ofrecen así aproximadamente un espectro estrecho a la frecuencia $f_{\text{aom}} + f_{\text{Doppler}}$ con una anchura $\delta f = \frac{q}{T}$ que está

dada esencialmente por el tiempo de medición T. Fuera de este intervalo se obtiene un amplio espectro.

Según otra forma de realización de la invención, la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser, en particular un diodo láser, se modifica de dos maneras. En este contexto, tiene lugar una modulación estocástica de la frecuencia y, además, la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser se modifica en línea de tiempo. En este sentido, se aplica:

$$f_{laser} = f_{laser,0} + \Gamma \cdot t \quad (6)$$

10 de modo que se obtiene una señal de detector según

$$u(t) \propto \exp \left\{ j \left[2\pi \Gamma \cdot \frac{2z}{c} \cdot t + 2\pi f_{Doppler} t + \Theta \left(t - \frac{2z}{c} \right) - \Theta(t) \right] \right\} \quad (7)$$

A diferencia de la ecuación (2), ahora toma el lugar de la frecuencia constante f_{AOM} la frecuencia dependiente del sitio e inducida por chirrido

$$f_{chirp}(z) = \Gamma \cdot \frac{2z}{c}$$

Si se ecualiza con $h(t;z)$ según la ecuación (3), entonces se obtiene un resultado correspondiente a la ecuación (4):

$$u_{out}(t) = u(t) \cdot h(t;z) \propto \exp \left\{ j \left[2\pi \Gamma \cdot \frac{2z}{c} \cdot t + 2\pi f_{Doppler} t \right] \right\} \quad (8)$$

Dado que la tasa de chirrido Γ y el lugar z están predeterminados y, con ello, son conocidos, se puede determinar la frecuencia Doppler $f_{Doppler}$ a partir de ellos.

Si a su vez se modifica el lugar del objetivo, pero se mantiene la función de ecualización $h(t;z)$, entonces se obtiene

en los márgenes $z \pm \frac{\Delta z_{LC}}{2}$ frecuencias inducidas por chirrido modificadas por la resolución espacial

$$f_{chirp} \left(z \pm \frac{\Delta z_{LC}}{2} \right) = \Gamma \cdot \frac{2z}{c} \pm \Gamma \cdot \frac{\Delta z_{LC}}{c} = f_{chirp}(z) \pm \frac{\delta f_{chirp}}{2} \quad (9)$$

30 Dentro del intervalo

$$\left[z - \frac{\Delta z_{LC}}{2}, z + \frac{\Delta z_{LC}}{2} \right]$$

se emborrona con ello la frecuencia en el espectro por $5f_{chirp}$.

Para no deteriorar significativamente la resolución Doppler en comparación con la solución conocida por el estado de la técnica que utiliza un modulador acústico-óptico (AOM), se debe aplicar lo siguiente

$$\delta f_{chirp} \leq \delta f$$

(10)

De ello se desprende lo siguiente

40

$$\Gamma \cdot \frac{2 \Delta z_{LC}}{c} \leq \delta f \quad \Rightarrow \quad \Gamma \leq \frac{c}{2 \Delta z_{LC}} \cdot \delta f$$

(11)

$$\Gamma = \frac{c}{2 \Delta z_{LC}} \cdot \delta f \quad \Gamma$$

Si se selecciona el máximo posible Γ y se llevan a cabo mediciones con $T=1T$ y $T=-1T$, lo cual corresponde a una modulación de frecuencia triangular, entonces se obtienen líneas espectrales después de la eualización en las frecuencias

5

$$f_- = \left| |\Gamma| \cdot \frac{2z}{c} - f_{Doppler} \right| = \left| \frac{z}{\Delta z_{LC}} \cdot \delta f - f_{Doppler} \right| \quad \text{und} \quad (12)$$

$$f_+ = \left| -|\Gamma| \cdot \frac{2z}{c} - f_{Doppler} \right| = \left| \frac{z}{\Delta z_{LC}} \cdot \delta f + f_{Doppler} \right|$$

Por lo tanto, para la frecuencia Doppler se aplica

10

$$f_{Doppler} = - \frac{f_+^2 - f_-^2}{4 \cdot \frac{z}{\Delta z_{LC}} \cdot \delta f} \quad (13)$$

Si una de las frecuencias $f_{ic} < 5 f$ y, por eso, no puede determinarse, entonces se aplicará de nuevo de manera que $f_{Doppler}$ también pueda determinarse a partir de en cada caso la otra:

15

Si

$$f_- > f_+ \quad \text{so ist} \quad f_{Doppler} > 0 \quad \rightarrow \quad f_{Doppler} = f_- - \frac{z}{\Delta z_{LC}} \cdot \delta f \quad (14a)$$

20 Si

$$f_- < f_+ \quad \text{so ist} \quad f_{Doppler} < 0 \quad \rightarrow \quad f_{Doppler} = \frac{z}{\Delta z_{LC}} \cdot \delta f - f_+ \quad (14b)$$

A continuación se indican algunos ejemplos de cálculo concretos

25

$$\begin{aligned} \Delta z_{LC} &= 10m, \quad \delta f = 0.5 \text{ MHz}, \quad q = 2 \\ \Rightarrow T &= 4 \mu s, \quad \Gamma = 7.5 \cdot 10^{12} \text{ Hz/s} = 7.5 \text{ MHz}/\mu s, \\ \Gamma \cdot T &= 30 \text{ MHz}, \quad \Delta i_{tot} = \Gamma \cdot T / \gamma_{lum} = 37.5 \mu A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (i) \quad z &= 10m, \quad f_{Doppler} = 10 \text{ MHz} \Rightarrow f_+ = 9.5 \text{ MHz}, \quad f_- = 10.5 \text{ MHz} \\ (ii) \quad z &= 50m, \quad f_{Doppler} = 10 \text{ MHz} \Rightarrow f_+ = 7.5 \text{ MHz}, \quad f_- = 12.5 \text{ MHz} \\ (iii) \quad z &= 100m, \quad f_{Doppler} = 10 \text{ MHz} \Rightarrow f_+ = 5 \text{ MHz}, \quad f_- = 15 \text{ MHz} \\ (iv) \quad z &= 20m, \quad f_{Doppler} = 1 \text{ MHz} \Rightarrow f_+ = 0 \text{ MHz}, \quad f_- = 2 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (15)$$

Para la modulación de frecuencia de la corriente de alimentación de la fuente de luz láser, en particular de la corriente de inyección de un diodo láser, son importantes las siguientes consideraciones. De esta manera, se puede 5 realizar una modulación de frecuencia adecuada y el chirrido de frecuencia lineal.

Con un patrón de fase predeterminado $\Theta(t)$ para la realización de una resolución espacial Δz_{LC} y un chirrido de frecuencia lineal deseado (Chirprate17), la modulación de fase total de la onda óptica debe ascender a

$$\Theta_{tot}(t) = \Theta(t) + \frac{1}{2} 2\pi \Gamma \cdot t^2$$

10

y la modulación de frecuencia y la modulación de corriente asociadas

$$f_{tot}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Theta_{tot}(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt} + \Gamma \cdot t$$

$$\delta i_{mod}(t) = \frac{1}{\gamma_{lum}} f_{tot}(t) = \frac{1}{2\pi \gamma_{lum}} \cdot \frac{d\Theta(t)}{dt} + \frac{\Gamma}{\gamma_{lum}} \cdot t$$

15

En las figuras 3 y 4 se muestran en cada caso a modo de ejemplo mediciones que demuestran los cálculos anteriores. La figura 3 muestra, en este sentido, la evolución de la frecuencia f_{tot} en MHz y la figura 4 muestra la corriente de inyección modulada δi_{mod} en μA en cada caso durante un período de 4 μs ($\Gamma = 7.5 \text{ MHz}/\mu s$; $\gamma_{lum} = 800 \text{ MHz}/mA$)

20 Lista de referencias

- 1 Fuente de luz láser
- 2 Divisor de haz
- 3 Rama de medición
- 25 4 Rama de referencia
- 5 Acoplador de fibra óptica
- 6 Detector
- 7 Circulador
- 8 Amplificador
- 30 9 Diodo láser
- 10 Lente
- 11 Unidad de evaluación
- 12 Convertidor digital analógico
- 13 Unidad de control
- 35 14 Elemento de sustracción

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de medición lidar para la determinación de la velocidad de partículas en un volumen de medición con una fuente de luz láser de onda continua de banda estrecha (1), que emite luz, que se acopla en una
5 rama de medición (3) y una rama de referencia (4), donde la luz acoplada en la rama de medición (3) se emite al menos parcialmente a través de un equipo emisor en la dirección del volumen de medición de tal manera que la luz emitida se dispersa y/o se refleja al menos parcialmente por las partículas en el volumen de medición y que al menos una parte de la luz dispersada y/o reflejada se recibe por un equipo receptor, con la luz que abandona la rama de referencia (4) se superpone de manera coherente y la radiación de luz resultante de ello se dirige a un detector (6)
10 para la generación de una señal de detector característica de la radiación de luz resultante, donde en una unidad de evaluación (11), teniendo en cuenta la señal de detector, se determina la velocidad de las partículas en el volumen de medición,
donde con un equipo de control (13) se varía la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser (1) y la unidad de evaluación (11) está concebida para determinar la velocidad de las partículas en al menos un intervalo de medición
15 del volumen de medición sobre la base de un análisis espectral de la señal de detector teniendo en cuenta la modulación de frecuencia predeterminada
caracterizado porque el equipo de control (13) está configurado para generar una señal de control que corresponde a una señal de pseudo-ruido originada por una función de frecuencia predeterminada y que se basa en la variación de la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser (1).
20
2. Equipo de medición lidar según la reivindicación 1,
caracterizado porque el equipo de control (13) modifica una intensidad de corriente de la corriente de alimentación para la fuente de luz láser (1) para la variación de la frecuencia de la luz emitida.
- 25 3. Equipo de medición lidar según la reivindicación 1 o 2,
caracterizado porque la fuente de luz láser (1) presenta un diodo láser (9) cuya corriente de inyección se modifica para la variación de la frecuencia de la luz emitida.
4. Equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 3,
30 **caracterizado porque** la modulación de frecuencia se selecciona de tal manera que la fuente de luz láser (1) emite luz con una longitud de coherencia de 0,1 a 100 m.
5. Equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 4,
caracterizado porque la fuente de luz láser (1) emite luz con una longitud de coherencia de 1 a 50 m.
35
6. Equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 5,
caracterizado porque la unidad de control (13) de la fuente de luz láser imprime una señal adicional de tal manera que a la frecuencia de la luz emitida se le añade una parte lineal en el tiempo adicional.
- 40 7. Equipo de medición lidar según la reivindicación 6,
caracterizado porque la modificación lineal en el tiempo de la frecuencia de la luz emitida se selecciona de tal manera que, a pesar de un desplazamiento Doppler, originado por el movimiento de las partículas, de la frecuencia de la luz recibida, no se modifica el signo de la diferencia con respecto a la frecuencia de emisión.
- 45 8. Equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 7,
caracterizado porque el equipo de control (13) modifica la intensidad de corriente de tal manera que la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser (1) varía de manera lineal hacia arriba y hacia abajo.
9. Equipo de medición de lidar según una de las reivindicaciones 1 a 8,
50 **caracterizado porque** la unidad de control (13) está realizada de tal manera que se pulsa la luz emitida, donde se seleccionan las longitudes de pulso de tal manera que son más largas de lo que corresponde a la resolución espacial deseada, de modo que la resolución espacial está determinada además por la modulación de frecuencia de la fuente de luz láser.
- 55 10. Equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 9,
caracterizado porque en la rama de medición (3) está dispuesto un conmutador óptico, en particular un modulador óptico acústico.
11. Equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 9,
60 **caracterizado porque** en la rama de referencia (4) está dispuesto al menos un elemento que polariza la luz.
12. Uso de un equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 11 para la detección de una

velocidad del viento y/o una dirección del viento en el lado de barlovento de un aerogenerador.

13. Uso de un equipo de medición lidar según una de las reivindicaciones 1 a 11 para la detección de una velocidad del viento y/o una dirección del viento en el lado de barlovento de un aerogenerador, donde el equipo de medición está fijado en el extractor centrífugo del aerogenerador.

14. Procedimiento para la determinación de la velocidad de partículas en un volumen de medición, en el que se emite luz con una fuente de luz láser de onda continua de banda estrecha (1) y se acopla en una rama de medición (3) y en una rama de referencia (4), en el que la luz acoplada en la rama de medición (3) se emite al menos parcialmente a través de un equipo emisor en la dirección del volumen de medición de tal manera que la luz emitida se dispersa y/o se refleja al menos parcialmente por las partículas en el volumen de medición y que al menos una parte de la luz dispersada y/o reflejada se recibe por un equipo receptor, con la luz que abandona la rama de referencia (4) se superpone de manera coherente y la radiación de luz resultante de ello se dirige a un detector (6) para la generación de una señal de detector característica de la radiación de luz resultante, y en el que en una unidad de evaluación (11), teniendo en cuenta la señal de detector, se determina la velocidad de las partículas en el volumen de medición, donde con un equipo de control (13) se varía la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser (1) y en la unidad de evaluación (11), para el cálculo de la velocidad de las partículas en al menos un intervalo de medición del volumen de medición, se efectúa un análisis espectral de la señal de detector teniendo en cuenta la modulación de frecuencia predeterminada, **caracterizado porque** la variación de la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser (1) se realiza sobre la base de una señal de control generada por el equipo de control (13), que corresponde a una señal de pseudo-ruido originada por una función de frecuencia predeterminada.

15. Procedimiento según la reivindicación 14, **caracterizado porque** la variación de la frecuencia de la luz emitida por la fuente de luz láser (1) se realiza sobre la base de una señal de control generada por el equipo de control (13) que contiene una parte lineal en el tiempo.

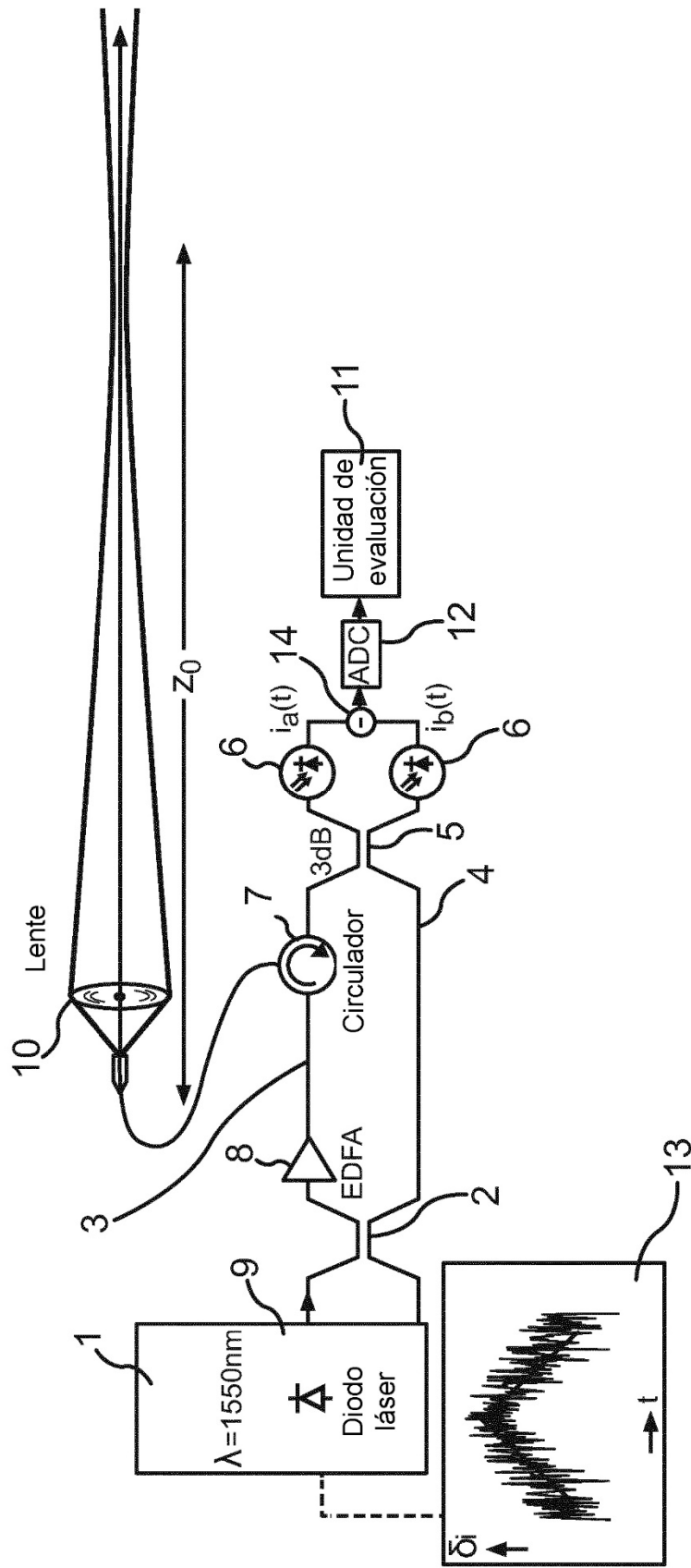


Fig.1

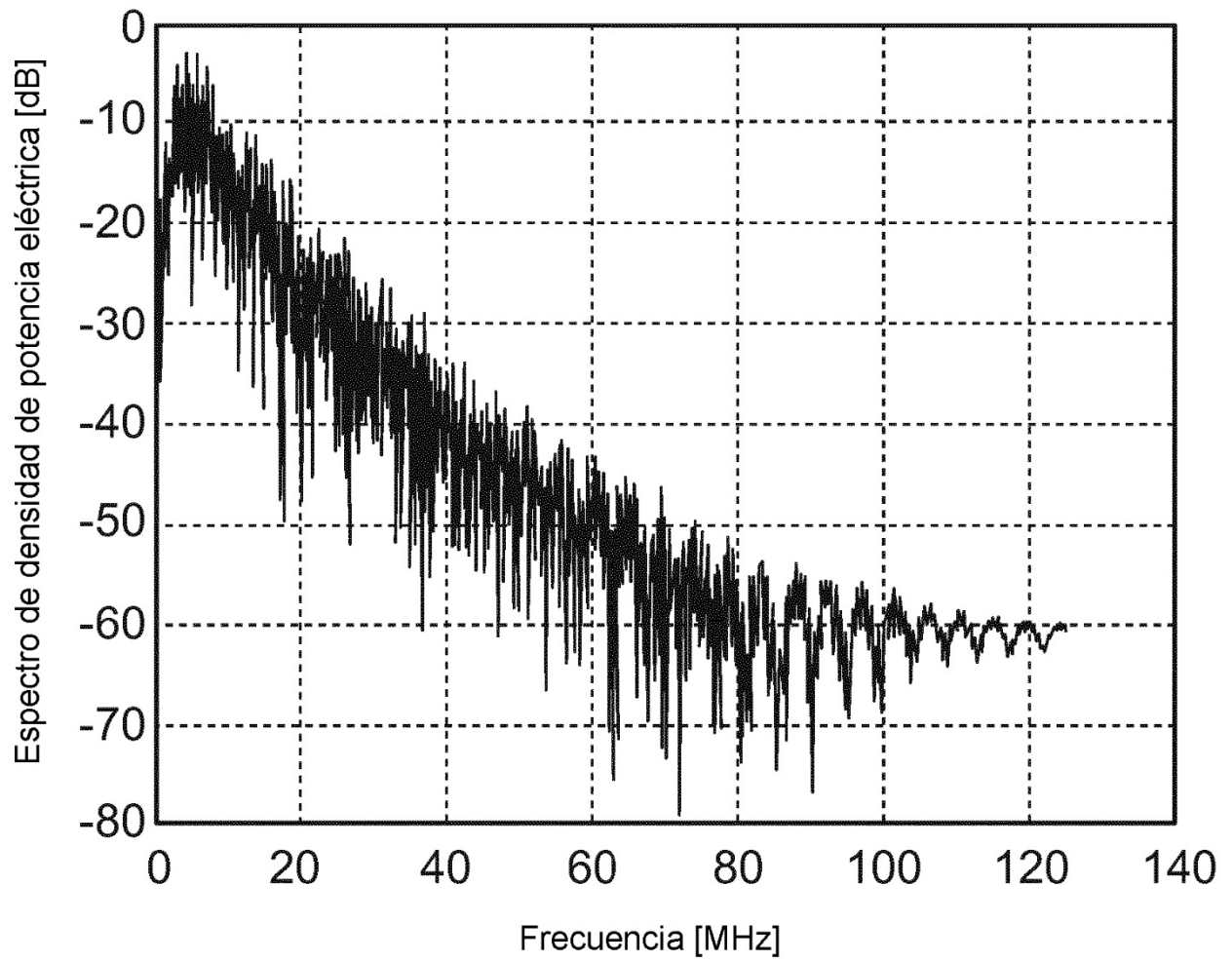


Fig.2

