

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 851 001**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02 (2006.01)

G01B 11/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.03.2018 PCT/EP2018/056958**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.11.2018 WO18215114**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.03.2018 E 18713592 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.12.2020 EP 3631355**

54 Título: **Dispositivo de cizallografía y procedimiento para el control de material no destructivo por medio de cizallografía**

30 Prioridad:
23.05.2017 DE 102017111250

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.09.2021

73 Titular/es:
**VSE AG (100.0%)
Heinrich-Böcking-Straße 10-14
66121 Saarbrücken, DE**

72 Inventor/es:
BUERAKOV, WASSILI

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 851 001 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 cizallografía y procedimiento para el control de material no destructivo por medio de cizallografía

El objeto se refiere a un dispositivo de cizallografía, así como a un procedimiento para el control de material no destructivo por medio de cizallografía. El objeto se ajusta igualmente al análisis de oscilación no destructivo.

5 Los crecientes requisitos y reivindicaciones en la calidad de componentes, en especial en el sector de aviación, de construcción de automóviles, de energía eólica o de energía solar, como también la industria de la construcción, aumentan simultáneamente los requisitos en los procedimientos para el control de material no destructivo. El control de material deberá ser posible sobre todo durante la producción continua, así como más tarde con fines de mantenimiento durante el funcionamiento. Una identificación de defectos, o bien puntos débiles lo más
10 prematura posible contribuye decisivamente a la reducción de costes y a una prolongación de la durabilidad de una construcción.

Son preferentes métodos de medición que pueden detectar defectos en la superficie, sin contacto, de manera no destructiva y con alta resolución. Los procedimientos conocidos emplean en especial técnica ultrasónica, técnica de rayos X, termografía, interferometría de moteado, vibrometría láser, tomografía computarizada o también
15 técnica de tetrahercios.

Precisamente la interferometría de moteado posibilita un control de material de gran superficie, sin contacto. La resolución espacial de la técnica de medición de moteado es muy elevada en este caso, de modo que son identificables ya irregularidades mínimas sobre la superficie del material, así como en el interior del material. Entre los procedimientos de medición de moteado más importantes cuentan la ESPI (Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie) y la ESPSI (Elektronische Speckle-Pattern-Shearing-Interferometrie).
20

Por ejemplo, el documento DE19856400 A1 describe un procedimiento de cizallamiento para la medición no destructiva de objetos, en el que la radiación reflejada por el objeto se refracta en una cuña óptica en menos de cuatro interfases. Concretamente se considera más detalladamente la interferometría de cizallamiento.

En el sector de la técnica de medición de moteado, en especial mediante empleo de un desplazamiento de fases espacial se puede realizar un control de materiales. En este caso se realiza en especial un desplazamiento de fases espacial con un elemento de cizallamiento, y el interferograma obtenido se transforma por medio de una transformada de Fourier para la extracción matemática de informaciones de fase en una zona espectral. No obstante, las disposiciones de medición conocidas hasta la fecha, basadas en diferentes tipos de interferómetro (por regla general interferómetro de Michelson o Mach-Zehnder) para el desplazamiento de fases espacial tienen el inconveniente de que se deben accionar con láseres de potencia elevada. Esto radica sobre todo en el bajo rendimiento lumínico, ya que, en último término, en el sensor lumínico (detector) se puede registrar menos de 50 % de la intensidad lumínica recibida por la estructura. Además, los resultados obtenidos son rara vez de suficiente calidad, de modo que no son evaluables en la mayor parte de los casos.
30

Por este motivo, el objeto tomaba como base la tarea de poner a disposición un procedimiento de medición de moteado, en el que se pudieran obtener interferogramas de calidad suficientemente elevada con baja potencia de la radiación empleada, así como una estructura sencilla y robusta, con ayuda de desplazamiento de fases espacial. Esta tarea se soluciona concretamente mediante un dispositivo de cizallografía según la reivindicación 1, así como un procedimiento según la reivindicación 12.
35

Concretamente se ha identificado que la cizallografía basada en el desplazamiento de fases espacial se puede optimizar en relación con la estructura óptica por medio de un dispositivo obturador adicional y la sustitución de un interferómetro clásico por un elemento de cizallamiento.
40

En procedimientos de medición interferométricos conocidos, que se basan en el desplazamiento de fases temporal, es necesario elaborar en total al menos seis registros de un objeto de ensayo. Esta necesidad resulta de las circunstancias físicas, ya que la ecuación de base presenta tres magnitudes desconocidas. Entre las magnitudes a determinar cuentan la intensidad del fondo, las modulaciones del periodo de interferencia y la fase relativa. Por consiguiente, se efectúan tres registros del objeto a medir en estado básico, y a continuación otros tres registros tras la carga del objeto de ensayo. Entre los registros se efectúa un desplazamiento de fases, en la mayor parte de los casos por medio de un actuador piezoeléctrico. De este modo se genera un sistema de ecuaciones resoluble constituido por seis ecuaciones y seis incógnitas. Para el aumento de la robustez del desplazamiento de fases temporal se emplea frecuentemente un método con un total de ocho registros y seis desplazamientos de fases. Entre los registros individuales no se debe producir ninguna vibración u otras interferencias durante la medición, ya que de este modo la medición se hace inservible.
45
50

Concretamente se ha identificado que el número de registros se puede reducir hasta dos mediante una modificación de la estructura de medición convencional. También se ha identificado que ambos registros se pueden registrar sucesivamente con muy poco tiempo de diferencia, y se puede efectuar un primer registro en estado básico y un segundo registro tras una modificación de estado del objeto de ensayo.
55

Esta posibilidad se garantiza mejorándose el desplazamiento de fases espacial en relación con la estructura óptica por medio de un dispositivo de difracción adicional. En este caso, el dispositivo de difracción puede estar dispuesto delante o también detrás del elemento de cizallamiento. Mediante el dispositivo de difracción es posible difractar la radiación irradiada por la fuente de radiación, reflejada a través el objeto a medir.

5 En este contexto mencionese que para un control de material interferométrico es necesaria una fuente de radiación coherente. Mediante el elemento de cizallamiento, los rayos reflejados por el objeto a medir se conducen al dispositivo de recepción por vías de radiación de diferente longitud. Mediante estas vías de radiación de diferente longitud, en el sensor del dispositivo de recepción aparece la imagen de interferencia de los rayos que se condujeron desde el objeto de medición al dispositivo de recepción a través del elemento de cizallamiento. En base a la fuente de radiación coherente, los rayos se superponen para dar un interferograma.

10 Mediante el empleo del dispositivo de difracción óptico es posible obtener una separación de la intensidad del fondo de las informaciones de fases buscadas en el intervalo de frecuencias del interferograma. No obstante, debido al dispositivo de difracción y al interferómetro, hasta el momento es necesario equipar la fuente de radiación con una potencia de radiación suficientemente elevada. Mediante el dispositivo de difracción se atenúa una gran parte de la intensidad de radiación, de modo que los interferogramas registrados en el sensor del dispositivo de recepción eran de poco valor informativo hasta el momento.

15 Concretamente, ahora se ha identificado que, en contrapartida a un interferómetro de Michelson, o bien Mach-Zehnder convencional (o también otros interferómetros), la radiación que se divide a través el elemento de cizallamiento y se superpone de nuevo bajo un cierto desplazamiento, se refracta en menos de cuatro interfaces del elemento de cizallamiento mediante una estructura geométrica modificada.

20 Mediante una disposición apropiada del elemento de cizallamiento, el número de refracciones del rayo transmitido se reduce frente a disposiciones convencionales, de modo que el interferograma proporciona resultados convenientemente evaluables. Además, en el elemento de cizallamiento también se puede prescindir de una superficie parcialmente reflectante, ya que los rayos se conducen concretamente de inmediato y casi por completo al dispositivo de recepción a través del elemento de cizallamiento.

25 Mediante una disposición apropiada entre el dispositivo de difracción, el elemento de cizallamiento y el dispositivo de recepción, es posible extraer la fase relativa en la zona espectral del interferograma a través de un filtro apropiado (paso de banda, paso bajo), por ejemplo mediante enmascaramiento. Mediante la disposición espacial de dispositivo de difracción, elemento de cizallamiento y dispositivo de recepción entre sí, en la función espectral del interferograma se obtiene una distancia de frecuencia suficiente entre la muestra de difracción de orden cero (la intensidad del fondo) y la muestra de difracción de primer orden (la información de fases). De este modo, el filtro se puede orientar después de modo que se deje pasar (se enmascare) la muestra de difracción de primer orden.

30 Por consiguiente, mediante el desplazamiento de fases concreto se posibilita una medición rápida y poco sensible a interferencias. Además, la estructura de medición se puede simplificar considerablemente tanto frente a estructuras espaciales como también temporales convencionales para el desplazamiento de fases, ya que se puede suprimir un desplazamiento de fases temporal en contrapartida a métodos de medición convencionales, que se basan en un desfase de tiempo temporal. Se pueden suprimir elementos activos en la estructura de medición y, por consiguiente, un control de estos. En contrapartida a métodos de medición convencionales con desfase de tiempo espacial, la estructura concreta se facilita considerablemente y se puede mejorar la calidad de los resultados de medición.

35 Con ayuda del dispositivo de cizallografía concreto es posible registrar interferogramas casi en tiempo real, y correlacionar estos inteferogramas entre sí en tiempo real para obtener cizallogramas. Con ayuda de procedimientos electrónicos apropiados se puede representar el resultado de la medición casi en tiempo real.

40 Los cizallogramas registrados con ayuda del dispositivo de cizallografía concreto posibilitan un control de material cuantitativo. Los cizallogramas se pueden evaluar cuantitativamente y, por consiguiente, se pueden sacar conclusiones cuantitativas, por ejemplo, sobre propiedades del material. En este caso, el dispositivo de cizallografía concreto se puede emplear en especial en el sector de la producción en serie, de la inspección, del análisis modal, así como para investigación y desarrollo.

45 La correlación de dos interferogramas se puede obtener en especial mediante enmascaramiento de las respectivas funciones espectrales con filtros apropiados. La determinación y superposición de los resultados finales cuantitativos ya durante la medición aumenta la comodidad de uso de forma exponencial.

50 En especial es preferente un análisis de oscilación. Mediante la posibilidad concreta de unir dos inteferogramas casi en tiempo real para dar un cizallograma, se puede efectuar un análisis casi en tiempo real. Si ahora se evalúa una carga por oscilación casi en tiempo real, se pueden elaborar continuamente cizallogramas a partir de interferogramas sucesivos temporalmente (no obligatoriamente de manera inmediata), y se puede valorar el objeto a medir en estado de vibración. Ya que el rendimiento lumínico se aumenta considerablemente mediante la disposición concreta, cámaras de alta velocidad con frecuencias de fotogramas de más de 50 fotogramas por

segundo (fps), en especial con más de 100 fps, en especial más de 500 pfs o más de 1000 pfs, pueden registrar los interferogramas con un contraste suficientemente elevado.

5 Un registro de defectos en el caso de carga dinámica se puede efectuar en especial mediante acoplamiento de ondas elásticas, como por ejemplo ondas de Lamb, en el objeto a medir. Las ondas interaccionan directamente con los defectos y se pueden detectar inmediatamente con la disposición de medición concreta. La amplitud de las ondas de excitación asciende únicamente a algunos 100 nm o menos, en función de la frecuencia de excitación. Por consiguiente, con ayuda de la cizallografía clásica son identificables ondas elásticas, ya que debido a la amplitud reducida no se producen patrones rayados típicos. Mediante el desplazamiento de fases espacial
10 concreto es posible detectar ondas elásticas y de este modo es realizable un control de material no destructivo en un estado de carga dinámico.

En primer lugar, mediante la nueva disposición del elemento de cizallamiento la fuente de radiación es posible con una potencia menor frente a procedimientos convencionales. En especial, la fuente de radiación es un láser de intensidad reducida. Este es en especial una fuente de radiación con una potencia de la clase de láser 1, 1M, 2, 2M o 3R según la norma DIN EN 60825-1:2008-05, en especial un único láser de las citadas clases o también
15 varios láseres cuya potencia total no sobrepase la potencia de las citadas clases.

Mediante el empleo de la fuente de radiación coherente, en el caso de una reflexión en un objeto a medir se produce un denominado patrón de moteado, que es conocido también como granulación de láser.

20 Los rayos incidentes se dispersan por una superficie rugosa en el plano microscópico correspondientemente al principio de Huygens-Fresnelschen en cada irregularidad microscópica en forma de ondas elementales esféricas, o bien circulares, con un desplazamiento de fases correspondiente a la topología. La distribución de la intensidad de la luz dispersada es completamente aleatoria en el plano de la imagen, en superficies sin estructura sistemática. Por consiguiente, cada observador ve un patrón diferente. Este tipo de patrón se describe como el denominado fenómeno de moteado, ya que se emplea un sistema de imagen, por ejemplo el ojo humano o una cámara.

25 El tamaño medio característico de un moteado individual depende de la óptica usada que se utiliza para la generación de una imagen nítida. Los rayos incidentes se superponen a distancia z respecto al plano focal. En este caso no se puede sobrepasar un determinado tamaño de moteado $d_{x,y}$. El diámetro $d_{x,y}$ de moteado depende adicionalmente de la longitud de onda de la radiación utilizada, en especial del láser utilizado. El diámetro de moteado procede de

$$d_{x,y} = 2,44 \frac{\lambda z}{D}$$

30 En este caso, D es el diámetro de apertura del dispositivo de difracción. Por lo tanto, a través de una correspondiente apertura de diafragma D se puede ajustar el tamaño $d_{x,y}$ de moteado necesario.

35 En concreto se utiliza preferentemente un láser de granate de itrio-aluminio dopado con neodimio (ND: láser YAG) con una longitud de onda de 520 nm o un/varios diodo(s) de láser en la zona visible o infrarroja. El diafragma, o bien el diámetro de diafragma D, se ajusta preferentemente de modo que un tamaño de moteado ascienda a tres o cuatro píxeles en el sensor de los dispositivos de recepción.

El índice de Fresnel del diafragma se calcula a partir de

$$F_{\text{Zahl}} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{\lambda \cdot z_{B,K}}$$

40 Siendo D el diámetro del diafragma, λ la longitud de onda de la fuente de radiación y $Z_{B,K}$ la distancia del diafragma B hasta el sensor de imagen (dispositivo de recepción) K. Se ha mostrado que un índice de Fresnel entre 3 y 20 es preferente concretamente para el dispositivo de difracción. En especial es preferente el índice de Fresnel en el intervalo de 10.

Antes de que los rayos difractados a través del dispositivo de difracción incidan sobre el dispositivo de recepción se propone concretamente un elemento de cizallamiento. No obstante, el elemento de cizallamiento es tal que no

se efectúan cuatro o más refracciones de la radiación en el elemento de cizallamiento como convencionalmente, sino que la radiación se refracta en menos de cuatro interfases del elemento de cizallamiento. A través de este menor número de refracciones y el paso de luz optimizado se optimiza la intensidad de radiación en el sensor del dispositivo de recepción.

- 5 Delante del elemento de cizallamiento o en otra zona del paso de luz se puede utilizar un filtro de paso de banda óptico, en especial un filtro espectral, preferentemente un filtro de absorción. El espectro de paso se sitúa en especial en el intervalo de zona de frecuencia de la fuente de radiación.

El dispositivo de recepción tiene generalmente un objetivo, por ejemplo una lente y un sensor de imagen. Concretamente es posible disponer el objetivo del dispositivo de recepción delante o detrás del dispositivo de difracción y el elemento de cizallamiento. Por consiguiente, la radiación reflejada pasa en primer lugar a través de la lente del dispositivo de recepción, después el dispositivo de difracción y a continuación el elemento de cizallamiento, para incidir sobre el sensor del dispositivo de recepción, o en primer lugar a través del dispositivo de difracción y el elemento de cizallamiento y a continuación la lente, para incidir sobre el sensor del dispositivo de recepción.

- 15 Mediante la disposición concreta se deben ajustar únicamente dispositivo de difracción, elemento de cizallamiento y dispositivo de recepción respectivamente. La propensión a averías del sistema se reduce considerablemente y aumenta la calidad de registro, en especial en aplicaciones no estacionarias, móviles.

Además, en contrapartida a dispositivos de cizalografía convencionales no es necesario un divisor de haz, preferentemente en la zona del elemento de cizallamiento. Los rayos pasan desde el dispositivo de difracción únicamente una vez a través del elemento de cizallamiento y en este no se dividen en un plano reflejado parcialmente. Por consiguiente, los rayos no se reflejan a través de un divisor de haz del elemento de cizallamiento, lo que conduce a un rendimiento lumínico acrecentado.

Además, es posible que pueda estar previsto un dispositivo de estabilización del tipo de un objetivo de cámara, en el que no solo está dispuesto el dispositivo de recepción, o bien la lente del dispositivo de recepción, sino también el dispositivo de difracción, así como el elemento de cizallamiento. Por consiguiente, la estabilización a través de este dispositivo actúa no solo sobre el objetivo, o bien la lente del dispositivo de recepción, sino también sobre el dispositivo de difracción, así como el elemento de cizallamiento.

El elemento de cizallamiento está dispuesto preferentemente de modo que al menos una primera parte de la radiación de la fuente de radiación transmitida por el dispositivo de difracción, registrada por el dispositivo de recepción, se refracte en dos interfases del elemento de cizallamiento. Mediante la refracción en únicamente dos interfases del elemento de cizallamiento se aumenta ulteriormente el rendimiento lumínico.

El elemento de cizallamiento es preferentemente un biprisma o una cuña óptica. También se puede utilizar un divisor de haz con desalineación lateral, un desplazador de haz de calcita, un prisma de Wollaston, una disposición de dos o más diafragmas o similares como elemento de cizallamiento.

Según un ejemplo de realización se propone que el elemento de cizallamiento esté dispuesto de modo que al menos una segunda parte de la radiación de la fuente de radiación transmitida por el dispositivo de difracción, registrada por el dispositivo de recepción, se registre por el dispositivo de recepción no refractada por el elemento de cizallamiento. Esto significa que la radiación transmitida por el dispositivo de recepción puede incidir al menos en partes sobre el dispositivo de recepción sin refractar a través del elemento de cizallamiento. Una primera parte de la radiación se refracta a través del elemento de cizallamiento y, por consiguiente, su vía óptica se prolonga frente a la vía óptica de la segunda parte, que no está refractada. Esto conduce a un desplazamiento relativo insignificante de las imágenes registradas del objeto a medir en el plano de la imagen.

Para ampliar la superficie de recepción a analizar se propone también que la radiación que sale de la fuente de radiación se amplíe en primer lugar a través de una lente de aumento. También es posible utilizar uno o varios diodos de láser como fuente de radiación.

Según un ejemplo de realización se propone que el dispositivo de difracción sea un diafragma perforado, un diafragma a franjas o una rejilla óptica. En especial es ventajoso el empleo de un diafragma ranurado. Un sensor de recepción en el dispositivo de recepción es preferentemente un sensor CCD o CMOS. Este es preferentemente rectangular. En el caso de tal sensor se ofrece un diafragma con un orificio, ya que las funciones espectrales que resultan del interferograma se adaptan mejor al factor de forma del sensor.

El dispositivo de recepción dispone preferentemente de al menos un sensor óptico. Este puede ser un sensor CCD o CMOS. Con ayuda de este sensor se puede registrar un interferograma de la radiación reflejada por el objeto a medir. Además del sensor, el dispositivo de recepción comprende una óptica, que está alojada en un objetivo y, por ejemplo, presenta al menos una lente. La lente, o bien el objetivo del dispositivo de recepción puede estar prevista delante o detrás del dispositivo de difracción, como ya se explica anteriormente.

En especial para una aplicación móvil, el dispositivo de difracción, el elemento de cizallamiento y el dispositivo de

recepción están montados en un soporte móvil común. El soporte móvil puede ser, por ejemplo, una cámara o un cuerpo de cámara. El elemento de cizallamiento y el dispositivo de difracción puede estar montados en especial delante o detrás de un objetivo en la cámara. A tal efecto, en el mismo soporte móvil también pueden estar montadas adicionalmente la fuente de radiación, y en caso dado una lente de aumento. En este soporte móvil, los elementos montados en este se pueden fijar de manera estacionaria respectivamente, de modo que antes del uso es posible un ajuste del dispositivo de cizalografía, y este ya no es necesario durante el uso. La orientación (distancia y/o ángulo respectivos) entre dispositivo de difracción, elemento de cizallamiento y dispositivo de recepción se efectúa en especial antes de una medición. Durante la medición, los elementos son fijos respectivamente y durante la medición no se efectúa un calibrado. No obstante, se puede variar la orientación axial de elemento de cizallamiento y dispositivo de difracción alrededor del eje óptico del objetivo. De este modo, elemento de cizallamiento y dispositivo de difracción se pueden girar conjuntamente en 90° alrededor del eje del objetivo. Esto puede ser relevante en especial para el tipo de defecto a medir. Los defectos pueden estar orientados de diferente manera. Mediante giro del elemento de cizallamiento y del dispositivo de difracción se puede efectuar una superposición de los interferogramas en el sentido x o en el sentido y. Incluso en el caso de tal giro, la distancia de los elementos entre sí puede permanecer inalterada. Por ejemplo, es posible provocar el giro de elemento de cizallamiento y dispositivo de difracción mediante un motor, de modo que un objeto a medir se puede analizar tanto en el sentido x como también en el sentido y según defectos, sin que sea necesaria una intervención manual en la disposición. Esto puede ser relevante en especial para un uso móvil.

Con ayuda del dispositivo de cizalografía se pueden registrar varios interferogramas en secuencia temporal. Los interferogramas se pueden correlacionar entre sí y se puede obtener un cizalograma. En el caso de correlación se puede utilizar, por ejemplo, una información de fases de ambos interferogramas, y esta información de fases se puede correlacionar entre sí, por ejemplo, mediante una sustracción sencilla.

En especial mediante el dispositivo de difracción, la información sobre intensidad se separa de la información de fases en la zona espectral. Mediante selección apropiada de la apertura del dispositivo de difracción y/o del elemento de cizallamiento y/o de la distancia del dispositivo de difracción del elemento de cizallamiento y/o el objeto a medir y/o mediante ajuste apropiado de la distancia entre el dispositivo de difracción y el dispositivo de recepción, la información espectral de intensidad y fase se pueden separar entre sí de modo que en la zona espectral se obtiene la información a partir del espectro con ayuda de un filtro apropiado. En especial la apertura del dispositivo de difracción, por ejemplo el diámetro de apertura, así como el ángulo de cizallamiento del elemento de cizallamiento, pueden tener una influencia relevante sobre la distribución espectral de los interferómetros y, por consiguiente, la posibilidad de obtener una separación de las informaciones de fases de las informaciones del fondo mediante filtros apropiados.

A tal efecto se propone elaborar una función espectral a partir del interferograma. Esto se puede efectuar con ayuda de un dispositivo de evaluación. En este caso, un medio apropiado es en especial una transformada de Fourier. En la zona espectral se puede aplicar un filtro sobre la función espectral, de modo que se conserva exclusivamente la información de fases del espectrograma y se elimina, por ejemplo, la información sobre la intensidad del fondo.

Tras el enmascaramiento, el interferograma se puede transformar de nuevo, por ejemplo, en la zona local. Esto se puede efectuar, por ejemplo, por medio de una transformada de Fourier inversa. Para la determinación por píxeles de la información de fases se puede determinar la arcotangente de la parte imaginaria del interferograma retransformado dividida por la parte real del interferograma retransformado. Para la determinación de la fase relativa se efectúa, por ejemplo, una sustracción por píxeles de la información de fases de ambos interferogramas, en especial en diferentes estados de carga. Otros métodos que relacionan ambas informaciones de fases entre sí son posibles, por ejemplo mediante adición.

La modificación de fases relativa calculada está plegada en módulo 2π y está afectada por ruido. Para la eliminación del ruido, un cizalograma se descompone preferentemente en una función de seno y coseno. Ambas proporciones se filtran por separado con un filtro apropiado, por ejemplo un filtro de paso bajo, en especial con un filtro de valor medio o un filtro mediano. Tras la filtración separada de ambos términos, a continuación se efectúa el cálculo de la función arcotangente, dividiéndose el término de seno por el término de coseno. Una diferencia de fases relativa resulta en función de las diferentes cargas entre ambos interferogramas y muestra aproximadamente el alargamiento del objeto a medir, en especial el primer gradiente de deformación en sentido de cizallamiento. Un defecto conduce a una variación en el alargamiento, que se puede recalcular mediante integración, en especial integración numérica, en una información sobre la deformación. Por consiguiente, es posible detectar el alargamiento y/o la deformación del objeto a medir entre el estado no cargado y el estado cargado y, por lo tanto, llegar a una conclusión sobre un defecto en el caso de un alargamiento modificado localmente, o bien una deformación modificada localmente.

Un primer interferograma se registra en un primer estado de carga (por ejemplo sin carga), y un segundo interferograma se registra en un segundo estado de carga. El estado de carga se puede provocar mediante diferentes excitaciones del objeto a medir. El objeto a medir se puede excitar en especial por vía estática, inductiva, óptica, dinámica, hidrostática o por medio de ultrasonido. La excitación óptica se puede efectuar por medio de láser o por medio de emisores de calor.

5 Como ya se ha explicado, el soporte no estacionario, por ejemplo móvil, puede portar el dispositivo de cizallografía. El soporte está montado entonces en una plataforma de inspección, en especial un dron. En especial para el sector de instalaciones eólicas, el dron puede ser un dron volador. Con ayuda del dron volador se puede examinar de manera no destructiva, por ejemplo, una instalación eólica, en este caso por ejemplo sus palas de rotor en el mantenimiento y la inspección, pero al menos tras la entrega y tras el montaje.

Para una evaluación inmediata de los resultados de examen es posible que se instale un dispositivo de comunicación para la transmisión inalámbrica de imágenes del dispositivo de recepción y/o de los resultados de evaluación del dispositivo de evaluación.

10 En este caso, la transmisión se puede efectuar en especial a través de WLAN, Bluetooth, ZigBee o similares. Con ayuda de la plataforma de inspección también es posible verificar tejados de edificios, por ejemplo estadios, centros comerciales o similares. También se pueden verificar torres o puentes en poco tiempo con ayuda del dispositivo de cizallografía concreto en la plataforma de inspección. En este caso, la verificación se puede efectuar en tiempo real, ya que la información de fases, o bien las informaciones de alargamiento o deformación derivadas de esta, se presentan casi en tiempo real. Únicamente se deben registrar dos interferogramas para obtener a partir de estos una información sobre el alargamiento, o bien el desplazamiento del objeto a medir, por medio de los métodos descritos. El cálculo se efectúa preferentemente por vía numérica, y conduce a que se presenten resultados de medición casi en tiempo real con ordenadores convencionales.

En este caso, el dispositivo de recepción puede ser una cámara réflex con un sensor convencional. No es necesario un ajuste o control de componentes.

20 Mediante el uso optimizado del elemento de cizallamiento y del dispositivo de difracción se optimiza el rendimiento de radiación. Por este motivo, según otro aspecto se propone que la fuente de radiación no sobrepase una potencia total de la clase de láser 1, 1M, 2, 2M o 3R según la norma DIN EN 60825-1:2008-05.

25 Con ayuda del dispositivo de cizallografía concreto es posible un desplazamiento de fases espacial. Esto posibilita obtener resultados de medición en tiempo real. Mediante el cálculo de la información de fases con ayuda del paso intermedio a través de la filtración en la zona espectral es posible obtener la información de fases con especial rapidez. Si se efectúa un enmascaramiento de la información de fases, en especial como se ha descrito, a partir de ambos interferogramas se puede calcular el alargamiento en tiempo real. Se requieren únicamente dos registros, o bien interferogramas del mismo objeto a medir en diferentes estados de carga.

30 Es posible depositar una respectiva imagen de referencia, o bien un respectivo interferograma, en una memoria intermedia de un ordenador. A continuación, se puede efectuar una transformación en la zona espectral, en especial por medio de la transformada de Fourier. El siguiente enmascaramiento y la retransformación son igualmente posibles en ordenadores modernos de manera especialmente sencilla, de modo que el registro actual se puede elaborar en cada caso en fracciones de un segundo, y es obtenible la información de fases de un registro respectivo. Mediante la correlación de dos registros a partir de los interferogramas, las informaciones sobre el alargamiento se pueden obtener de manera especialmente sencilla.

A continuación, se explica más detalladamente el objeto por medio de un dibujo que muestra ejemplos de realización. En el dibujo muestran:

- La Fig. 1 una primera estructura esquemática de un dispositivo de cizallografía concreto;
- La Fig. 2 una segunda disposición esquemática de un dispositivo de cizallografía concreto;
- 40 La Fig. 3a un primer elemento de cizallamiento según un ejemplo de realización;
- La Fig. 3b un segundo elemento de cizallamiento según un ejemplo de realización;
- La Fig. 4 un dispositivo de cizallografía sobre un soporte común;
- La Fig. 5 el uso de un dispositivo de cizallografía concreto;
- La Fig. 6a el desarrollo esquemático de un procedimiento para el registro de un cizallograma;
- 45 La Fig. 6b una distribución espectral de un interferograma de un dispositivo de difracción circular;
- La Fig. 7 una interpretación numérica de un cizallograma registrado.

50 La Fig. 1 muestra un dispositivo de cizallografía 2 para el control de material no destructivo de una pieza 4. El dispositivo de cizallografía concreto 2 comprende una fuente de radiación 6, por ejemplo un láser, en especial un láser de diodos de láser, que irradia luz coherente, por ejemplo, a una longitud de onda, por ejemplo, de 650 nm. El haz de luz 8 se conduce a la pieza 4 con ayuda de una lente de aumento opcional 10. Los rayos de luz 8 reflejados por la pieza 4 inciden sobre un dispositivo de difracción 12, por ejemplo un diafragma ranurado. El haz de luz difractado pasa a través de un elemento de cizallamiento 14, en el que se efectúa una producción de dos

imágenes del objeto a medir ligeramente desplazadas entre sí y una óptica 16, por ejemplo un objetivo, en especial una lente, en un fotosensor 18, por ejemplo un sensor CMOS. El interferograma registrado por el fotosensor 18 se almacena mediante un dispositivo de evaluación 20 y se correlaciona con otros interferogramas para obtener un cizallograma.

5 En la disposición concreta es esencial que el elemento de cizallamiento 14 esté en el paso de luz directo entre el fotosensor 18 y el dispositivo de difracción 12, y que el haz de luz 8 se refracte en menos de cuatro interfaces en el elemento de cizallamiento 14. Esto conduce a un rendimiento lumínico optimizado en el fotosensor 18, de modo que las imágenes registradas se pueden emplear para una elaboración de un cizallograma.

10 La Fig. 2 muestra otro ejemplo de realización de un dispositivo de cizallografía 2, que se diferencia del dispositivo de cizallografía 2 según la Fig. 1 en especial por que tanto el dispositivo de difracción 12 como también el elemento de cizallamiento 14 están dispuestos detrás del objetivo 16 del dispositivo de recepción. Se ha identificado que, en el paso de luz de los rayos lumínicos 8, los rayos reflejados se pueden conducir de la pieza 4 al fotosensor 18, en primer lugar a través del dispositivo de difracción 12 y el elemento de cizallamiento 14 y a continuación a través del objetivo 16, o bien la lente, o el objetivo 16 puede estar dispuesto entre la pieza 4 y el dispositivo de difracción 12. Ambos conducen a un rendimiento lumínico suficientemente bueno para la elaboración del interferograma en la zona del dispositivo de evaluación 20.

20 Por ejemplo, al contrario que en el caso de interferómetros de Michelson convencionales, el elemento de cizallamiento 14, como se muestra en las Figuras 3a y 3b, está configurado de modo que no requiere una superficie parcialmente reflectante. Los rayos de luz 8 pasan a través del elemento de cizallamiento 14, de modo que se efectúa una refracción de la luz solo en dos interfaces.

25 La Fig. 3a muestra un biprisma como elemento de cizallamiento 14, que es apropiado para provocar un desplazamiento de fases temporal de los rayos de luz 8. El rendimiento lumínico es suficientemente grande en el fotosensor 18, ya que en el elemento de cizallamiento 14 no está prevista una superficie parcialmente reflectante que conduzca el haz de luz a un espejo dispuesto fuera del elemento de cizallamiento 14, como es el caso de interferómetros de Michelson convencionales.

Según la Fig. 3a, todos los rayos de luz que inciden sobre el fotosensor 18, que se reflejan por la pieza 4, pasan a través del elemento de cizallamiento 14 transmitidos a través del dispositivo de difracción 12. El elemento de cizallamiento 14 es un biprisma.

30 No obstante, también es posible que el elemento de cizallamiento 14, como se muestra, por ejemplo, en la Fig. 3b, refracte solo partes de los rayos de luz 8 y otras partes de los rayos de luz 8 incidan sin refractar sobre el fotosensor 18. En la Fig. 3b, el elemento de cizallamiento 14 es una cuña óptica de manera ejemplar. Se puede identificar que un primer haz de luz 8 transmitido a través del dispositivo de difracción se refracte por el elemento de cizallamiento 14, mientras que un segundo haz de luz puede incidir sobre el fotosensor 18 sin refractar por el dispositivo de difracción 12. También de este modo se producen dos imágenes del objeto a medir ligeramente desplazadas en el plano de la imagen.

35 Mediante la combinación de dispositivo de difracción 12 con el elemento de cizallamiento 14 es posible descomponer espectralmente el interferograma. La Fig. 6 muestra un desarrollo ejemplar de un procedimiento para la elaboración de un cizallograma. En este caso se registran en primer lugar dos interferogramas 22a, 22b sucesivos con un dispositivo de cizallografía 2. Los interferogramas 22a, 22b representan un patrón de moteado de la pieza 4 observada, representando el primer interferograma 22a la pieza 4 en estado no cargado y el segundo interferograma 22b la pieza 4 en un estado cargado.

Los siguientes pasos 24-28 se pueden realizar directamente tras el registro de un respectivo interferograma 22a, 22b, o después de haber elaborado ambos interferogramas 22a, 22b.

45 Mediante un ajuste apropiado del índice de Fresnel en el dispositivo de difracción 12, en especial <20 y >3 , se ocasiona una calidad de cizallograma suficientemente buena. En especial con ayuda de un dispositivo de difracción apropiado y un elemento de cizallamiento apropiado se consigue una buena dispersión del espectrograma, como se muestra aún a continuación. En este caso, la distancia entre el dispositivo de difracción 12 y el fotosensor se puede ajustar dependiendo del índice de Fresnel y el diámetro del diafragma.

50 Ambos interferogramas 22a, 22b se transforman en funciones espectrales 24a, 24b. Esto se efectúa en especial transformándose los interferogramas 22a, 22b desde la zona local en el intervalo de frecuencias. En este caso es apropiada en especial una transformada de Fourier, que también se puede realizar numéricamente como FFT si los interferogramas 22a, 22b se presentan en formato digital. Las funciones espectrales 24a, 24b resultantes presentan un máximo central y dos máximos locales adyacentes a este, como se muestra en la Fig. 6b. La distancia entre el máximo central y ambos máximos locales se calcula mediante la cantidad de cizallamiento en el elemento de cizallamiento 14, así como la longitud de onda del láser empleado. El máximo 30 es representativo de la intensidad del fondo del interferograma 22a, 22b, mientras que ambos máximos locales 32a, 32b contienen las informaciones de fases solicitadas.

Después de calcular las funciones espectrales 24a, 24b, con ayuda de un filtro apropiado es posible enmascarar uno de los máximos locales 32a, 32b, por ejemplo bajo uso de un filtro de paso de banda, que realiza un enmascaramiento alrededor de la frecuencia central de uno de los máximos locales 32a, 32b. Por consiguiente, con ayuda del filtro se puede separar una información de fases de la intensidad del fondo.

- 5 Por consiguiente, se presentan funciones espectrales enmascaradas 26a, 26, que se retransforman a continuación en la zona local y se presentan interferogramas 28a, 28b.

En la zona local se pueden obtener ahora las informaciones de fases mediante cálculo de la arcotangente de la parte imaginaria dividida por la parte real de interferogramas retransformados.

- 10 Los interferogramas retransformados, en especial sus informaciones de fases, se pueden correlacionar entre sí, en especial mediante formación de una diferencia de fases. La imagen de diferencias es el cizallograma 34 deseado. Esto se puede efectuar como se describe anteriormente.

- 15 Este cizallograma 34 contiene la diferencia de fases relativa entre la pieza 4 en estado no cargado y la pieza 4 en estado cargado (o viceversa). A partir de esta diferencia de fases relativa, como se muestra en la Fig. 7, se puede determinar el alargamiento espacial por medio de desmodulación (unwrapping) 1D, 2D o 3D. Por medio de esta variación del alargamiento se pueden detectar defectos en la pieza 4 no solo en su superficie, sino también bajo la superficie. El comportamiento de alargamiento es diferente en especial en la zona de defectos. Mediante integración de la información de alargamiento, en especial mediante integración numérica, también se puede determinar en especial la deformación en la pieza 4.

- 20 Los pasos de cálculo necesarios para obtener el cizallograma 34 se pueden realizar en segundos con ordenadores modernos, de modo que dos interferogramas 22a, 22b que se registraron sucesivamente se pueden correlacionar de manera inmediata, y casi en tiempo real son obtenibles el cizallograma 34, o bien las informaciones de alargamiento, o bien deformación determinadas a partir de este, como se representa en la Fig. 7.

- 25 Esta posibilidad de evaluación especialmente rápida ofrece la opción de aplicar el dispositivo de cizallografía 2 en plataformas de inspección móviles. A tal efecto es ventajoso que el dispositivo de cizallografía 2 esté montado sobre un soporte móvil 36. Sobre el soporte móvil 36 está alojada la fuente de radiación 6, el dispositivo de difracción 12, el elemento de cizallamiento 14, así como el dispositivo de recepción, en especial el objetivo 16 y el fotosensor 18. Además, puede estar previsto un dispositivo de evaluación 20, que almacena provisionalmente y transmite por vía inalámbrica al menos los interferogramas 22a, 22b registrados. Esto se representa en la Fig. 4.

- 30 Los componentes montados pueden estar dispuestos respectivamente de manera estacionaria sobre el soporte 36. También pueden estar previstos una lente de aumento 10, así como un filtro espectral, delante del dispositivo de difracción 12 y/o del sensor 18. Mediante el filtro espectral se puede conseguir que solo lleguen al sensor 18 rayos con la frecuencia de la fuente de radiación, en especial la frecuencia del láser.

- 35 El dispositivo de cizallografía 2 se puede orientar sobre el soporte 36 y en especial se pueden ajustar las distancias entre el dispositivo de difracción 12, el elemento de cizallamiento 14, así como el fotosensor 18. El ajuste efectuado una vez puede permanecer estático y el soporte móvil 36 se puede montar, por ejemplo, sobre una plataforma de inspección móvil.

Tal plataforma de inspección móvil se representa en forma de un dron volador 38 en la Fig. 5.

- 40 El dron volador 38 es apropiado, por ejemplo, para la inspección de una instalación eólica 40. Con ayuda del dron volador 38 se pueden despegar, por ejemplo, las palas de rotor de la instalación eólica 40, y con ayuda del dispositivo de cizallografía 2 se puede realizar un control de material de las palas de rotor. Mediante transferencia de los interferogramas 22a, 22b, o bien del interferograma 34 obtenido, del dron volador 38 a un ordenador 42, en especial por vía inalámbrica, los resultados de inspección se pueden mostrar casi en tiempo real en una pantalla. Esto posibilita reaccionar inmediatamente a resultados de medición, y en caso dado realizar controles en detalle con ayuda del dron volador 38 en posibles defectos.

- 45 Se sobreentiende que el dispositivo de cizallografía se puede instalar no solo sobre un soporte, como por ejemplo un dron, sino también en otras aplicaciones, como por ejemplo instalaciones industriales, edificios y similares. Un control de material puede estar montado, por ejemplo, en una cadena de producción y se puede realizar un control automatizado directamente en el proceso de fabricación.

- 50 Mediante el dispositivo de cizallografía concreto es posible un control de material casi en tiempo real. El rendimiento lumínico se mejora considerablemente frente a dispositivos de cizallografía convencionales, de modo que pueden ser suficientes láseres con potencia de haz reducida. El desplazamiento de fases espacial posibilita correlacionar entre sí inmediatamente dos interferogramas sucesivos, para obtener de este modo informaciones de alargamiento, o bien deformación en la pieza. Una estructura compacta del dispositivo de cizallografía posibilita instalar este en un soporte móvil, en especial en una plataforma de inspección, como por ejemplo un dron. Una transmisión inalámbrica de los interferogramas registrados, o bien de los cizallogramas calculados ya en la

plataforma de inspección, posibilita un control de los resultados de medición casi en tiempo real.

Lista de signos de referencia

	2	Dispositivo de cizallografía
	4	Pieza
	6	Fuente de radiación
5	8	Haz de luz
	10	Lente de aumento
	12	Dispositivo de difracción
	14	Elemento de cizallamiento
	16	Objetivo
10	18	Fotosensor
	20	Dispositivo de evaluación
	22a,b	Interferograma
	24a,b	Función espectral
	26a,b	Función espectral enmascarada
15	28a,b	Interferograma enmascarado
	30	Intensidad del fondo
	32a,b	Información de fases
	34	Cizallograma
	36	Soporte móvil
20	38	Dron volador
	40	Instalación eólica
	42	Ordenador

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de cizallografía con
- un soporte móvil,
 - una fuente de radiación coherente (6),
- 5
- un dispositivo de difracción óptico (12) para la difracción de la radiación irradiada por la fuente de radiación (6), reflejada a través de un objeto a medir, y
 - un dispositivo de recepción (18) para el registro de la radiación de la fuente de radiación (6) transmitida a través de la instalación de difracción (12),
- 10
- estando dispuesto entre el dispositivo de difracción (12) y el dispositivo de recepción (18) un elemento de cizallamiento (14), de modo que al menos una primera parte de la radiación de la fuente de radiación (6) transmitida por el dispositivo de difracción (12), registrada por el dispositivo de recepción (18), se refracta en menos de cuatro interfases del elemento de cizallamiento (14),
- caracterizado por que
- el dispositivo de difracción (12), el elemento de cizallamiento (14) y el dispositivo de recepción (18) están montados en el soporte móvil común, de modo que
- 15
- la orientación y la distancia entre dispositivo de difracción (12), elemento de cizallamiento (14) y dispositivo de recepción (18) es constante durante una medida, y
 - el elemento de cizallamiento (14) y el dispositivo de difracción son orientables por medio de un motor alrededor de un eje óptico de un objetivo del dispositivo de recepción (18).
- 20
2. Dispositivo de cizallografía según la reivindicación 1, caracterizado por que
- el elemento de cizallamiento (14) está dispuesto de modo que al menos una primera parte de la radiación de la fuente de radiación (6) transmitida por el dispositivo de difracción (12), registrada por el dispositivo de recepción (18), se refracta en dos interfases del elemento de cizallamiento (14).
3. Dispositivo de cizallografía según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que
- 25
- el elemento de cizallamiento (14) es un biprisma, y/o
 - el elemento de cizallamiento (14) es una cuña óptica.
4. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- el elemento de cizallamiento (14) está dispuesto de modo que al menos una segunda parte de la radiación de la fuente de radiación (6) transmitida por el dispositivo de difracción (12), registrada por el dispositivo de recepción (18), se registra por el dispositivo de recepción (18) no refractada por el elemento de cizallamiento (14).
- 30
5. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- el dispositivo de difracción (12) es un diafragma perforado simple o múltiple, un diafragma a franjas simple o múltiple o una rejilla óptica.
- 35
6. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- el dispositivo de recepción (18) presenta al menos un sensor óptico, en especial un sensor CMOS, y está instalado para el registro de un interferograma de la radiación reflejada por el objeto a medir.
7. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- está instalado un dispositivo de evaluación (20) para correlacionar dos interferogramas registrados sucesivamente y formar un cizallograma.
- 40
8. Dispositivo de cizallografía según la reivindicación 7, caracterizado por que
- el dispositivo de evaluación (20) está instalado para transformar un interferograma del dispositivo de recepción (18) en una función espectral, y un filtro enmascara la función espectral.
9. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que

- el soporte es una plataforma de inspección móvil, en especial un dron, en especial un dron volador.
10. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- está instalado un dispositivo de comunicación para la transmisión inalámbrica de imágenes del dispositivo de recepción (18) y/o de resultados de evaluación del dispositivo de evaluación (20).
- 5 11. Dispositivo de cizallografía según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por que
- la fuente de radiación (6) presenta un láser con una potencia máxima de la clase de láser 1, 1M, 2 o 2M según la norma DIN EN 60825-1:2008-05.
12. Procedimiento para el control de material no destructivo por medio de cizallografía, en el que
- se irradia un objeto a medir con una fuente de radiación coherente (6),
- 10 - la radiación reflejada por el objeto a medir se difracta en un dispositivo de difracción (12),
- la radiación difractada se refracta en un dispositivo de cizallamiento en menos de cuatro interfases del elemento de cizallamiento (14), y a continuación se elabora un interferograma de la radiación difractada, refractada, a través de un dispositivo de recepción (18),
- caracterizado por que
- 15 - el dispositivo de difracción (12), el elemento de cizallamiento (14) y el dispositivo de recepción (18) están montados en un soporte móvil común, de modo que la orientación y la distancia entre dispositivo de difracción (12), elemento de cizallamiento (14) y dispositivo de recepción (18) es constante durante una medición, y
 - el elemento de cizallamiento (14) y el dispositivo de difracción se giran por medio de un motor alrededor de un eje óptico de un objetivo del dispositivo de recepción (18).
- 20 13. Procedimiento según la reivindicación 12, caracterizado por que
- el interferograma se transforma en una función espectral, en especial
 - la función espectral se enmascara con un filtro, en especial
 - la función espectral enmascarada se transforma de manera inversa.
14. Procedimiento según la reivindicación 13, caracterizado por que
- 25 - se correlacionan entre sí al menos dos funciones espectrales transformadas de manera inversa, y se obtiene un cizallograma.
15. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes 12 a 14, caracterizado por que
- se registran al menos dos interferogramas por una plataforma de inspección móvil y por que los interferogramas y/o cizallogramas se transmiten por vía inalámbrica por la plataforma de inspección.

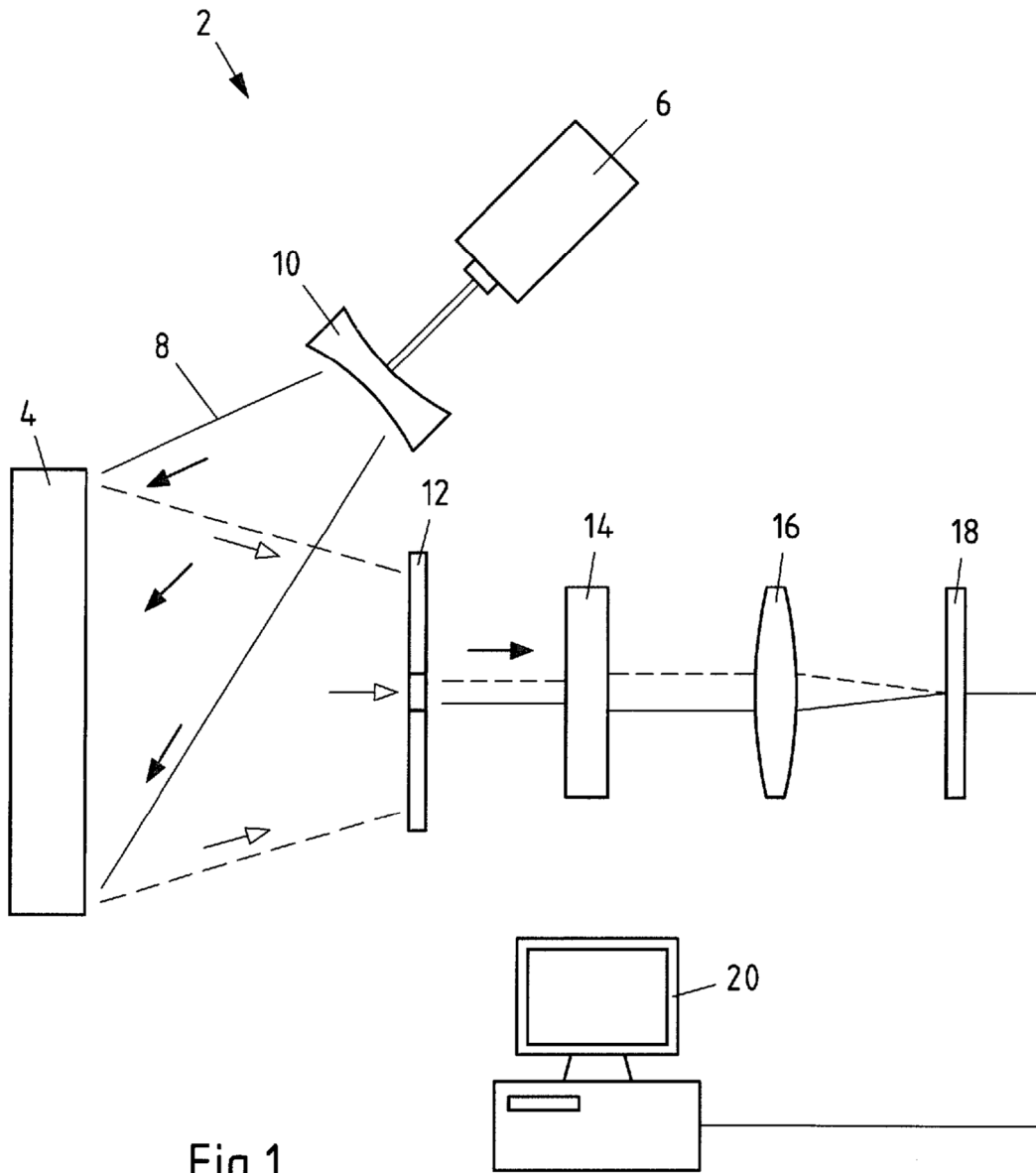


Fig.1

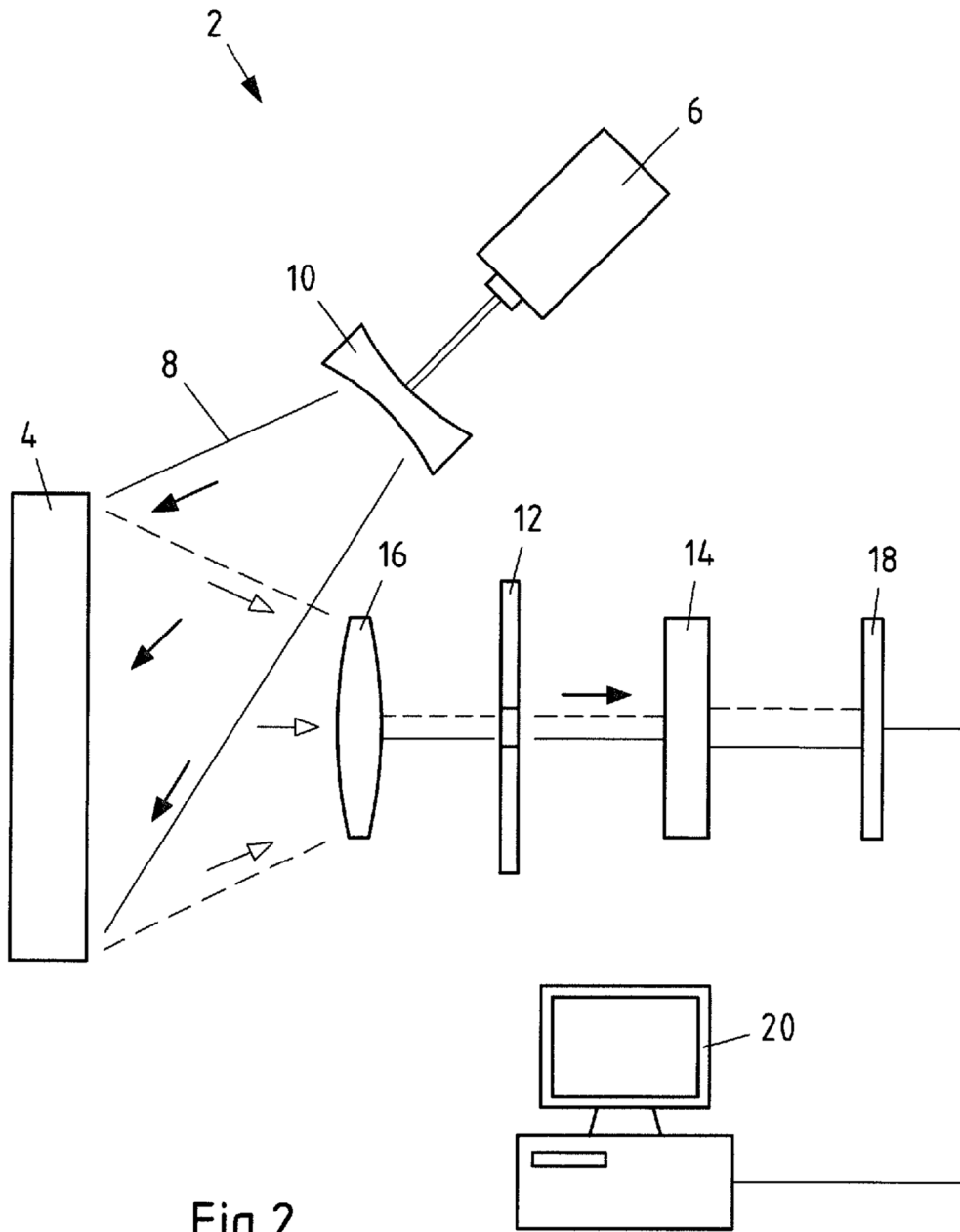


Fig.2

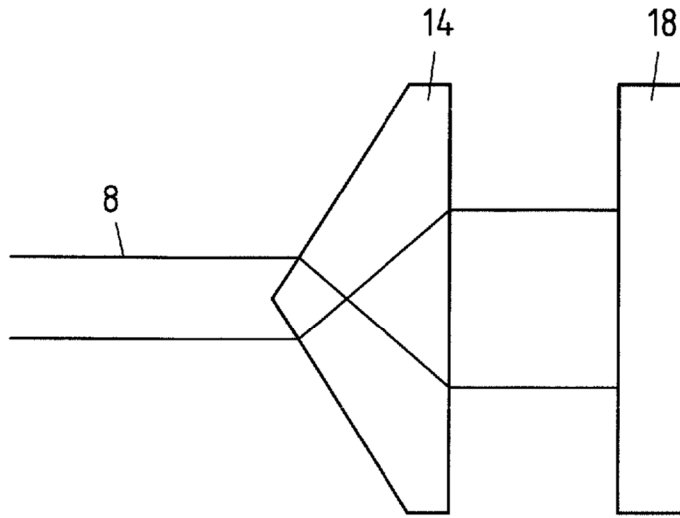


Fig.3a

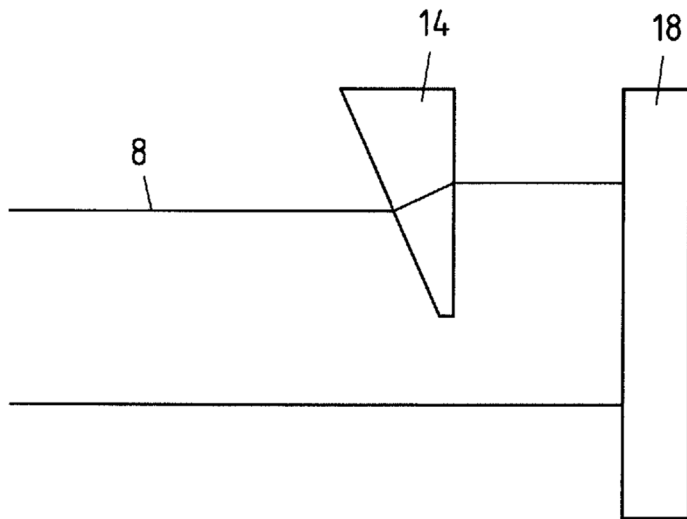


Fig.3b

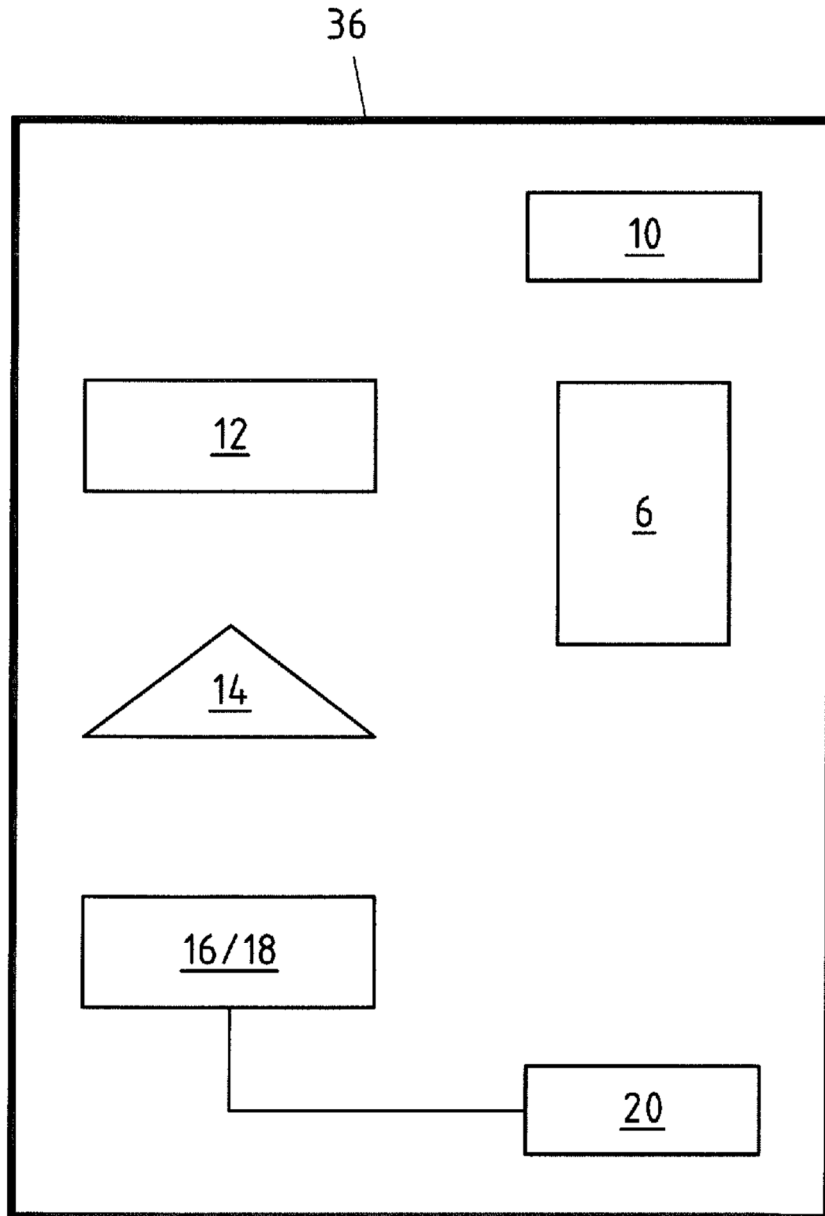


Fig.4

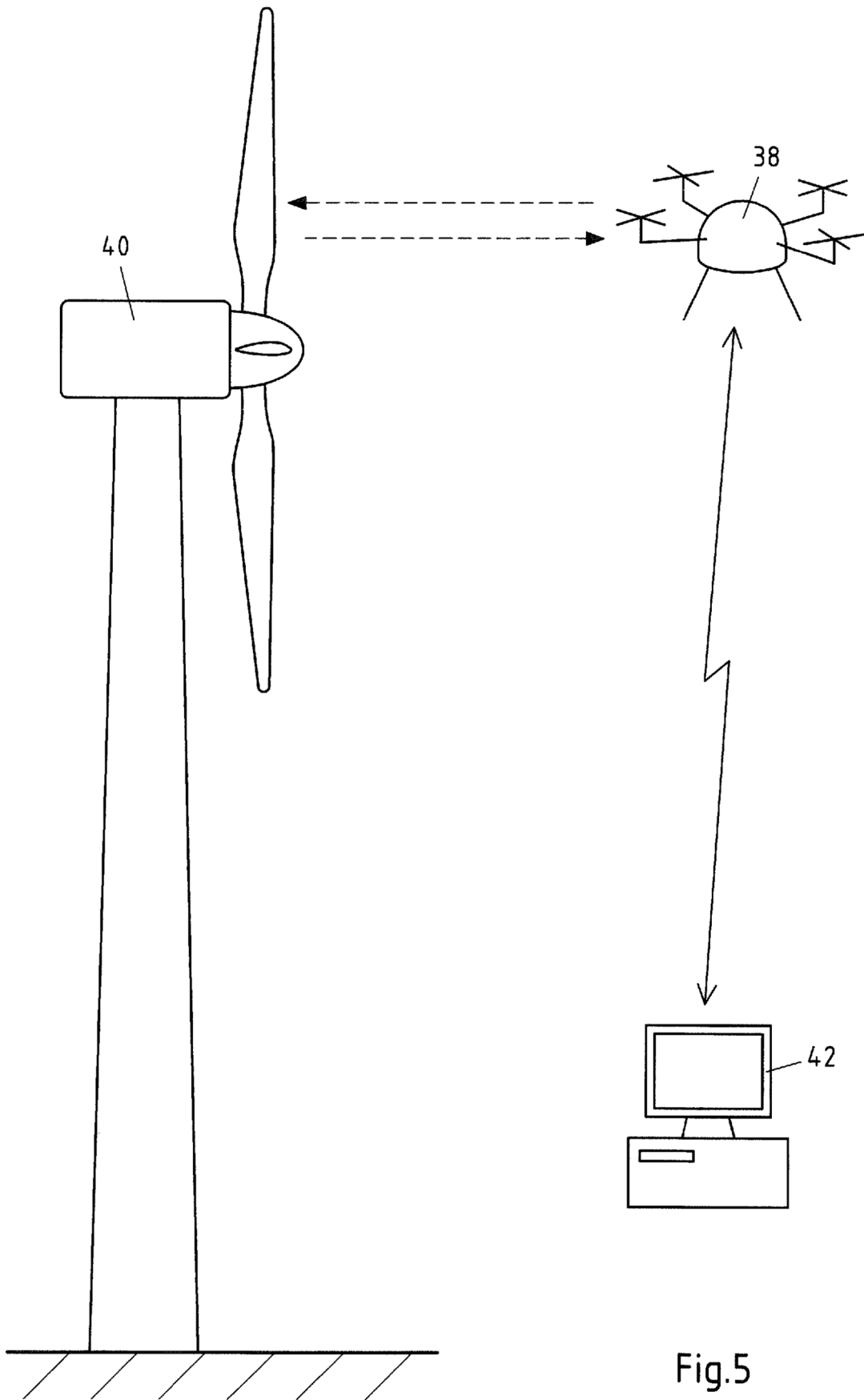


Fig.5

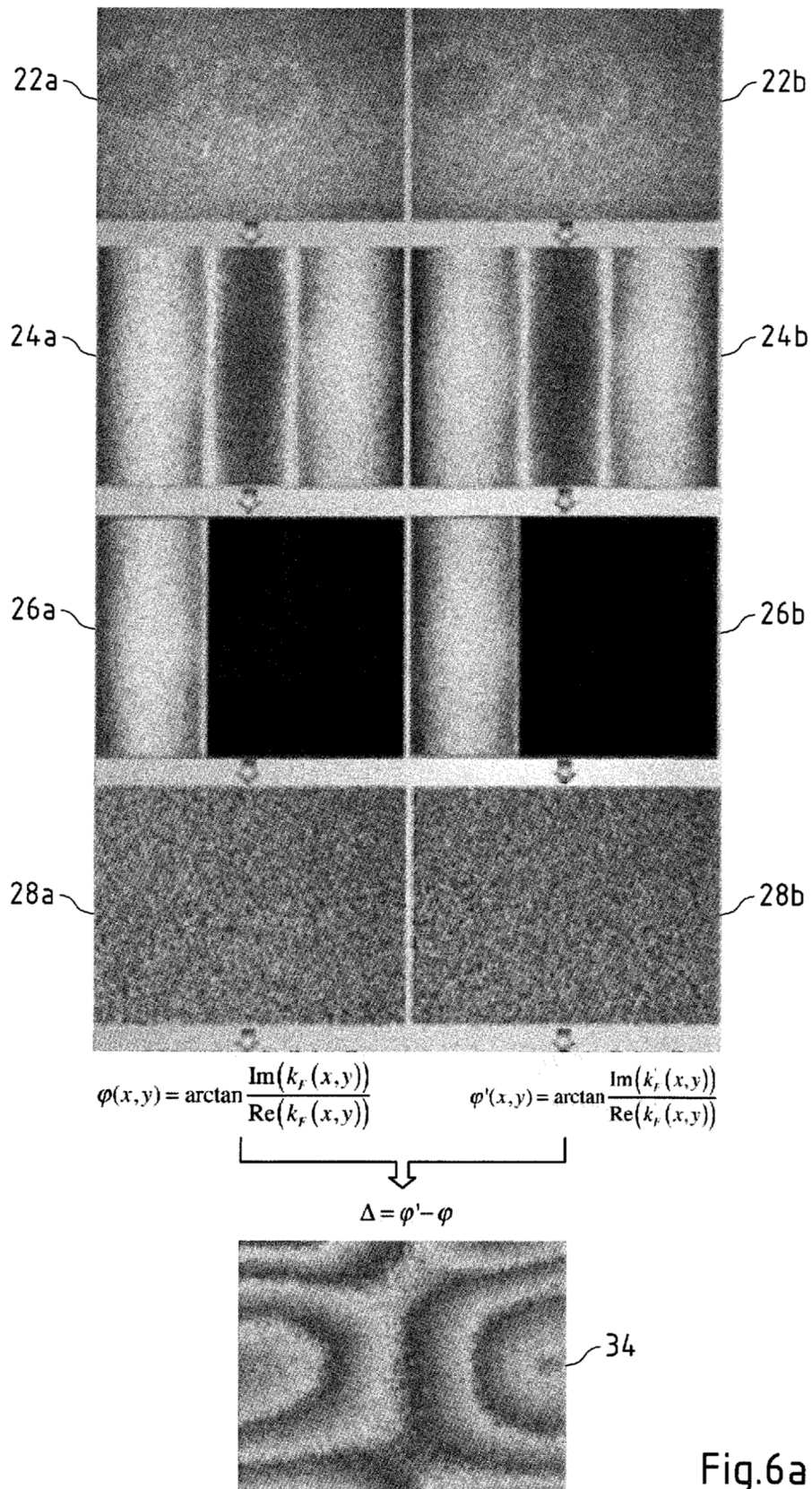


Fig.6a

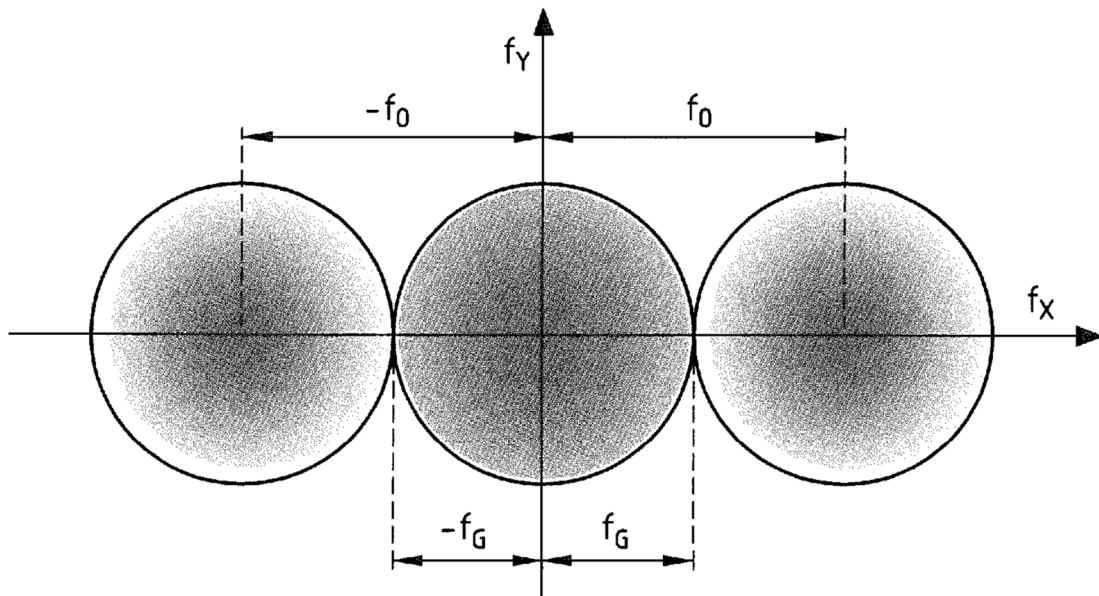
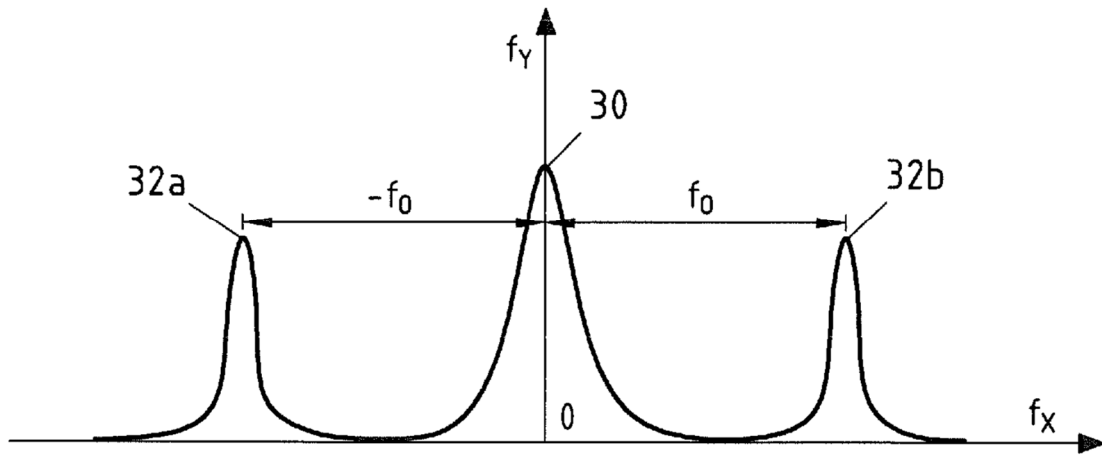


Fig.6b

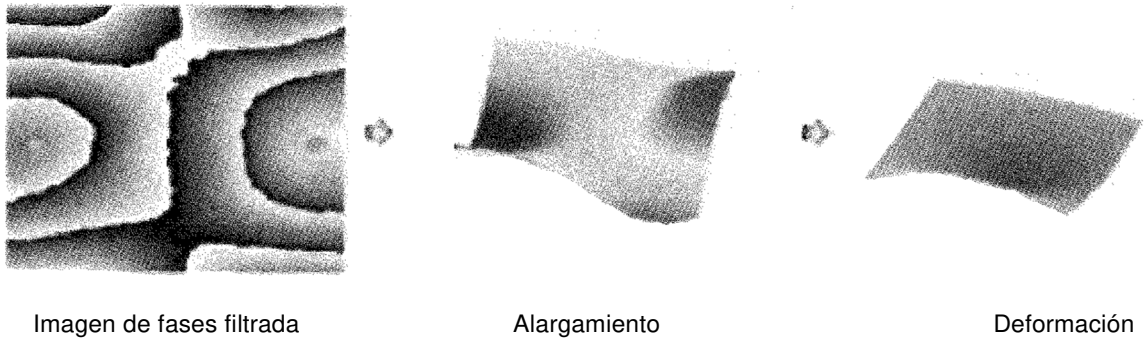


Fig. 7