

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 458 096**

51 Int. Cl.:

**G01N 23/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.09.2009 E 09778370 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.03.2014 EP 2335058**

54 Título: **Procedimiento y tomógrafo computerizado por rayos X para la comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material por medio de tomografía computerizada por rayos X**

30 Prioridad:

**10.09.2008 DE 102008046698**

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

**29.04.2014**

73 Titular/es:

**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR  
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN  
FORSCHUNG E.V. (100.0%)  
Hansastraße 27c  
80686 München, DE**

72 Inventor/es:

**HASSLER, ULF y  
REHAK, MARKUS**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

**ES 2 458 096 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

Procedimiento y tomógrafo computerizado por rayos X para la comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material por medio de tomografía computerizada por rayos X

5 La invención se refiere a un procedimiento y a un tomógrafo computerizado por rayos X para la comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material por medio de tomografía computerizada por rayos X.

10 Los componentes de material compuesto de fibras cobran cada vez más importancia debido a sus propiedades de peso y resistencia en la industria aeronáutica y astronáutica así como en la industria automovilística. La fabricación de componentes de material compuesto de fibras se realiza de manera que varias capas de material configuradas como capas de fibras se disponen una sobre otra para dar las denominadas preformas, que se infiltran entonces en un molde con resina y se endurecen con presión y calor para dar los componentes de material compuesto de fibras. Las preformas están compuestas normalmente por de 4 a 32 capas de fibras individuales estratificadas una sobre otra, presentando cada capa de fibras una orientación individual. Las capas de fibras individuales están constituidas, por ejemplo, por haces de fibras tejidos entre sí o cosidos por estratos entre sí, presentando los haces de fibras por regla general dos orientaciones giradas 90° una con respecto a otra. Los haces de fibras tejidos se designan como tejido de fibras y los haces de fibras cosidos como esterilla de fibras. Los haces de fibras tienen en la capa de fibras una superficie de sección transversal de normalmente 0,1 mm x 5 mm y están constituidos por varios miles de fibras de carbono y/o de vidrio individuales.

25 Las formas constructivas de componentes de material compuesto de fibras se vuelven complejas cada vez más, de manera que aumentan también sus costes de fabricación. Las preformas para componentes de revestimiento de soporte pueden ser, por ejemplo, de varios metros cuadrados de tamaño. Ópticamente son accesibles respectivamente sólo las dos capas de fibras exteriores.

30 Debido a los altos costes de fabricación existe por parte de la industria una necesidad de poder comprobar sin destruirla la estructura de componentes de material compuesto de fibras en distintos momentos de la fabricación para poder realizar correcciones necesarias lo antes posible, de modo que puedan impedirse etapas de elaboración de correcciones posteriores costosas.

35 Por el artículo científico "Röntgenprüfung an genähten CFK-Preformteilen" de Ulf Hassler *et al.* se sabe comprobar sin destrucción preformas por medio de radiación de rayos X. Las preformas constituidas por varias capas de material se examinan por medio de un tomógrafo computerizado por rayos X y se reconstruyen por estratos. Según esto es desventajoso que la dirección de estructura de la respectiva capa de material apenas pueda distinguirse debido al bajo contraste en los estratos reconstruidos.

40 Por tanto, la invención se basa en el objetivo de crear un procedimiento que permita una comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material y en particular un reconocimiento de las direcciones de estructura de las capas de material por medio de tomografía computerizada por rayos X.

45 Este objetivo se consigue mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. De acuerdo con la invención se detectó que la absorción de la radiación de rayos X para las capas de material individuales presenta una dirección predominante que discurre esencialmente de manera paralela al plano x-y y tiene una dependencia sólida y conocida con respecto a la dirección de estructura de la respectiva capa de material. Debido a que la dirección de estructura y la dirección predominante se encuentran en una dependencia sólida una con respecto a otra, puede determinarse mediante la determinación de la dirección predominante también la correspondiente dirección de estructura. Las direcciones predominantes de las capas de material se determinan de manera que a partir de los datos del objeto a lo largo de varias direcciones de evaluación que discurren de manera paralela al plano x-y y en varias posiciones en dirección z se determinan desarrollos de valor de grises y correspondientes desarrollos de gradiente. A partir de los desarrollos de gradiente puede distinguirse de manera sencilla y eficaz para cada posición z cuál de las direcciones de evaluación corresponde a la respectiva dirección predominante. A partir de las direcciones predominantes y las correspondientes posiciones en dirección z puede concluirse sobre el número de capas de material, la respectiva dirección de estructura de las capas de material, la sucesión de las capas de material, el espesor de las capas de material en dirección z así como la posición de las capas de material en dirección z. El objeto que va a comprobarse puede comprobarse por consiguiente en cualquier momento total o parcialmente, por ejemplo en forma de parcelas cilíndricas o prismáticas, sin destrucción con respecto a la estructura y las capas de material.

60 Si las capas de material están configuradas, por ejemplo, como capas de fibras que están cosidas por pares entre sí para dar esterillas de fibras, entonces debido a la costura de los haces de fibras individuales se producen espacios de costura en forma de ranura que en la penetración de radiación con radiación de rayos X dan como resultado un contraste medible. La dirección de los espacios de costura corresponde a la dirección de los haces de fibras que representa también la dirección de estructura de la respectiva capa de fibras. La absorción de la radiación de rayos X disminuye bruscamente en los espacios de costura a lo largo de una dirección que discurre de manera perpendicular a la dirección de estructura de la respectiva capa de fibras, lo que puede distinguirse claramente en el

desarrollo de gradiente de un desarrollo de valor de grises a lo largo de esta dirección. De manera correspondiente, la dirección de manera perpendicular a la dirección de estructura para la absorción de la radiación de rayos X representa una dirección predominante que está girada 90° con respecto a la correspondiente dirección de estructura. Los desarrollos de gradiente con respecto a los desarrollos de valor de grises a lo largo de las direcciones de evaluación son por consiguiente dependientes del ángulo entre la correspondiente dirección de evaluación y la dirección de estructura así como de la distancia del respectivo desarrollo de valor de grises en dirección z al espacio de costura. Los valores de un desarrollo de gradiente se vuelven máximos de manera correspondiente precisa cuando la dirección de evaluación del correspondiente desarrollo de valor de grises es perpendicular a la dirección de estructura y el desarrollo de valor de grises corta el espacio de costura, es decir la distancia del desarrollo de valor de grises al espacio de costura en dirección z es mínima. La evaluación de las capas de fibras así como su dirección de estructura se debe, por consiguiente, a la determinación de aquellos desarrollos de valor de grises que presentan los valores máximos en los correspondientes desarrollos de gradiente. Estos desarrollos de valor de grises presentan de manera correspondiente una dirección de evaluación que discurre de manera perpendicular a la respectiva dirección de estructura y una distancia mínima en dirección z al espacio de costura y por consiguiente a la correspondiente capa de fibras. El procedimiento puede usarse en cualquier momento en la fabricación de componentes de material compuesto de fibras para examinar sin destrucción los respectivos resultados de las etapas de fabricación.

Un perfeccionamiento según la reivindicación 2 permite la determinación de datos de proyección de objetos extendidos bidimensionalmente, tales como por ejemplo de preformas. Durante la determinación de los datos de proyección o bien puede estar fijo el objeto y puede moverse la fuente de rayos X así como el detector de rayos X o puede estar fija la fuente de rayos X así como el detector de rayos X y puede moverse el objeto. Es decisivo el movimiento relativo.

Un procedimiento según la reivindicación 3 permite una reconstrucción sencilla por estratos de datos del objeto a partir de los datos de proyección. Una determinación de este tipo de datos de proyección se conoce también como tomosíntesis circular de rayos X. En la tomosíntesis circular de rayos X se obtienen de manera sencilla datos de proyección de distintos ángulos de proyección, produciéndose un efecto de sombreado durante la reconstrucción por estratos de los datos del objeto, mediante el cual aumenta la borrosidad de las capas de material con la distancia al estrato del objeto reproducido. Por consiguiente, se representa de manera nítida únicamente el estrato reproducido, mientras que el objeto se representa de manera borrosa fuera de este estrato con distancia creciente al estrato reproducido. Durante la determinación de los datos de proyección o bien puede estar fijo el objeto y puede moverse la fuente de rayos X así como el detector de rayos X o puede estar fija la fuente de rayos X así como el detector de rayos X y puede moverse el objeto. Es decisivo el movimiento relativo.

Un procedimiento según la reivindicación 4 permite una reconstrucción sencilla por estratos de datos del objeto a partir de los datos de proyección. Una determinación de este tipo de datos de proyección se conoce también como tomosíntesis lineal de rayos X. En la tomosíntesis lineal de rayos X se obtienen de manera sencilla datos de proyección de distintos ángulos de proyección, produciéndose un efecto de sombreado durante la reconstrucción por estratos de los datos del objeto, mediante el cual aumenta la borrosidad de las capas de material con la distancia al estrato del objeto reproducido. Por consiguiente, se representa de manera nítida únicamente el estrato reproducido, mientras que el objeto se representa de manera borrosa fuera de este estrato con distancia creciente al estrato reproducido. La tomosíntesis lineal de rayos X es adecuada en particular para objetos configurados de manera alargada o para objetos con estructura orientada de manera perpendicular a la dirección de absorción.

Un perfeccionamiento según la reivindicación 5 permite una evaluación sencilla de los datos del objeto. Debido a que el objeto está constituido por estratos por las capas de material y los datos del objeto se encuentran en forma de una multiplicidad de conjuntos de datos de estratos bidimensionales, los conjuntos de datos de estratos corresponden a estratos del objeto que discurren esencialmente de manera paralela a las capas de material. Debido a que los conjuntos de datos de estratos se encuentran en una multiplicidad de posiciones en dirección z, pueden examinarse las capas de material sucesivamente. Una reconstrucción de este tipo es especialmente ventajosa cuando los datos de proyección se obtuvieron por medio de tomosíntesis circular o lineal por rayos X, dado que debido a la tomosíntesis por rayos X se produce durante la reconstrucción por estratos un efecto de sombreado. Mediante este efecto de sombreado se reproducen cada vez más de manera borrosa capas de material con distancia creciente del estrato reconstruido, lo que al contrario significa que la capa de material correspondiente al estrato reconstruido se representa de manera nítida en comparación con las demás capas de material.

Un procedimiento según la reivindicación 6 garantiza una detección segura de la dirección predominante y por consiguiente de la dirección de estructura. Si el área angular asciende a más de 180°, pueden evitarse los efectos de borde durante la evaluación de los desarrollos de valor de grises y/o desarrollos de gradiente, por ejemplo en una filtración.

Un perfeccionamiento según la reivindicación 7 garantiza una evaluación óptima de los desarrollos de gradiente. Cuando las direcciones de evaluación para los conjuntos de datos de estratos discurren respectivamente por el punto medio del estrato reproducido, se garantiza que los desarrollos de valor de grises presenten al menos una longitud aproximadamente igual. Los desarrollos de valor de grises así como los desarrollos de gradiente

determinados a partir de los mismos representan, por consiguiente, una base fiable para la evaluación de los conjuntos de datos de estratos. Los estratos reproducidos pueden ser totalmente según esto estratos del objeto o estratos de una parte del objeto, tal como por ejemplo una parcela cilíndrica o prismática.

5 Un procedimiento según la reivindicación 8 aumenta la fiabilidad durante la determinación de la dirección predominante. Si las capas de material están configuradas, por ejemplo, como capas de fibras, entonces el cálculo de un desarrollo de valor de grises promedio garantiza que éste contiene información de un espacio de costura que se cruza por uno de los desarrollos de valor de grises.

10 Un perfeccionamiento según la reivindicación 9 permite una evaluación eficaz de los desarrollos de gradiente. Debido a que para cada desarrollo de gradiente se determina un valor de gradiente, se comprime la información contenida en el desarrollo de gradiente en relación con valores extremos.

15 Un perfeccionamiento según la reivindicación 10 permite una evaluación sencilla y eficaz de los desarrollos de gradiente.

20 Un procedimiento según la reivindicación 11 permite una comprobación sencilla de las capas de material del objeto. El campo de gradiente bidimensional representa claramente los valores de gradiente relevantes dependiendo de la posición en dirección z y de la dirección de evaluación, de modo que a partir del campo de gradiente pueden evaluarse y comprobarse directamente las capas de material. En particular puede compararse el campo de gradiente con un campo de gradiente teórico, de modo que pueden detectarse rápida y fácilmente desviaciones en la construcción del objeto de una construcción teórica.

25 Un perfeccionamiento según la reivindicación 12 facilita la evaluación del campo de gradiente. Mediante una filtración del campo de gradiente puede resaltarse de manera dirigida la información relevante en relación con las capas de material. Por ejemplo puede suprimirse ruido mediante una filtración de Gauss y mediante una filtración LOG (*Laplacian of Gaussian*) pueden aumentarse los máximos locales. Además pueden resaltarse intervalos angulares determinados de las direcciones de evaluación. Los intervalos angulares de este tipo pueden conocerse a partir de información previa sobre la construcción del objeto. En una filtración es en particular ventajoso cuando las direcciones de evaluación se extienden por un área angular de más de 180°, dado que mediante esto pueden evitarse efectos de borde en la filtración.

30 Un perfeccionamiento según la reivindicación 13 facilita la evaluación del campo de gradiente.

35 Un procedimiento según la reivindicación 14 permite la facilitación de todas las características relevantes de las capas de material, de modo que se garantice una comprobación amplia y fiable del objeto.

40 La invención se basa además en el objetivo de crear un tomógrafo computerizado por rayos X que permita una comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material y en particular un reconocimiento de la dirección de estructura de las capas de material por medio de tomografía computerizada por rayos X.

45 Este objetivo se soluciona mediante un tomógrafo computerizado por rayos X con las características de la reivindicación 15. Las ventajas del tomógrafo computerizado por rayos X de acuerdo con la invención corresponden a las ventajas ya descritas del procedimiento de acuerdo con la invención.

Otras características y ventajas de la invención resultan de la descripción de varios ejemplos de realización por medio del dibujo. Muestran:

50 la figura 1 una representación esquemática en perspectiva de un tomógrafo computerizado por rayos X de acuerdo con un primer ejemplo de realización,

la figura 2 una representación esquemática en perspectiva de un objeto que va a comprobarse y constituido por varias capas de material,

55 la figura 3 una vista en planta esquemática por secciones sobre dos capas de material representadas en la figura 2,

la figura 4 una representación esquemática de un estrato reconstruido de una de las capas de material representadas en la figura 2 con una dirección de estructura y varias direcciones de evaluación,

60 la figura 5 un diagrama de un primer desarrollo de valor de grises del estrato reconstruido a lo largo de una primera dirección de evaluación y que no discurre de manera perpendicular a una dirección de estructura,

65 la figura 6 un diagrama de un segundo desarrollo de valor de grises del estrato reconstruido a lo largo de una segunda dirección de evaluación y que discurre de manera perpendicular a la dirección de estructura,

- la figura 7 un diagrama de un desarrollo de gradiente con respecto al desarrollo de valor de grises de acuerdo con la figura 6,
- 5 la figura 8 un diagrama de un campo de gradiente a través de varios estratos reconstruidos y a través de varias direcciones de evaluación y
- la figura 9 una representación esquemática en perspectiva de un tomógrafo computerizado por rayos X de acuerdo con un segundo ejemplo de realización.
- 10 A continuación se describe con referencia a las figuras 1 a 8 un primer ejemplo de realización de la invención.
- Un tomógrafo computerizado por rayos X 1 presenta para la comprobación no destructiva de un objeto 2 una fuente de rayos X 3 y un correspondiente detector de rayos X 4. Entre la fuente de rayos X 3 y el detector de rayos X 4 está dispuesto un portaobjetos 5 que sirve para el alojamiento del objeto 2.
- 15 El portaobjetos 5 se extiende esencialmente en una dirección x y una dirección y que discurre de manera perpendicular a ésta, definiendo éstas juntas un plano x-y E. El tomógrafo computerizado por rayos X 1 presenta de manera centrada con respecto al portaobjetos 5 un eje longitudinal central 6 que discurre de manera paralela a una dirección z y de manera perpendicular al plano x-y E. La fuente de rayos X 3 y el detector de rayos X 4 pueden moverse con respecto al objeto 2 en direcciones de movimiento iguales 7 con desplazamiento de fases en órbitas 8 que discurren de manera concéntrica al eje longitudinal central 6 y de manera paralela al plano x-y E. El desplazamiento de fases entre la fuente de rayos X 3 y el detector de rayos X 4 asciende a 180°.
- 20 La fuente de rayos X 3 sirve para la irradiación del objeto que va a comprobarse 2 con una radiación de rayos X 9 que sale en forma de cono hacia el objeto 2. La fuente de rayos X 3 está configurada por ejemplo como tubo de rayos X cuya estructura se conoce. El detector de rayos X 4 sirve para la determinación de datos de proyección del objeto 2 a partir de la radiación de rayos X 9 detectada tras la irradiación del objeto 2. El detector de rayos X 4 se extiende esencialmente de manera paralela al plano x-y E y presenta en dirección x así como y una multiplicidad de píxeles. El detector de rayos X 4 está configurado por ejemplo como detector de panel plano cuya estructura se conoce.
- 25 La fuente de rayos X 3 y el detector de rayos X 4 están conectados a través de líneas de señales 10 con un dispositivo de cálculo 11. El dispositivo de cálculo 11 sirve para el control de la fuente de rayos X 3 así como para la evaluación de la radiación de rayos X 9 detectada por medio del detector de rayos X 4. El dispositivo de cálculo 11 presenta una unidad de reconstrucción 12. Por medio de la unidad de reconstrucción 12 pueden reconstruirse datos del objeto a partir de los datos de proyección, que reproducen digitalmente al menos una parte del objeto 2. Además, el dispositivo de cálculo 11 presenta una unidad de evaluación 13 que sirve para la evaluación de los datos del objeto reconstruidos.
- 30 El objeto que va a comprobarse 2 está constituido (tal como es evidente a partir de la figura 2) por cuatro capas de material que están designadas en particular partiendo desde el portaobjetos 5 en dirección z con los números de referencia 14 a 17. Las capas de material 14 a 17 se extienden esencialmente de manera paralela al plano x-y E y están dispuestas por estratos una sobre otra en la dirección z. Las capas de material 14 a 17 están configuradas como capas de fibras y se designan de manera correspondiente a continuación como capas de fibras 14 a 17.
- 35 La figura 3 muestra una vista en planta por secciones sobre las capas de fibras 14 y 15. Las capas de fibras 14 y 15 están constituidas por haces de fibras 18 que están compuestos por ejemplo de una multiplicidad de fibras de carbono y/o fibras de vidrio. Los haces de fibras 18 de la primera capa de fibras 14 están orientados con respecto a la dirección x en un ángulo  $\alpha$  de 135°. De manera correspondiente, los haces de fibras 18 de la segunda capa de fibras 15 están girados 90°, de modo que los haces de fibras 18 están orientados con respecto a la dirección x en un ángulo  $\alpha$  de 45°. La orientación de los haces de fibras 18 define para cada capa de fibras 14 a 17 una respectiva dirección de estructura, estando designadas las direcciones de estructura de las capas des fibras individuales 14 a 17 con los números de referencia 19 a 22. Las direcciones de estructura 21 y 22 de las capas de fibras 16 y 17 están representadas igualmente en la figura 3, discurrendo la dirección de estructura 21 de la tercera capa de fibras 16 esencialmente de manera paralela a la dirección de estructura 20 y la dirección de estructura 22 de la cuarta capa de fibras 17 esencialmente de manera paralela a la dirección de estructura 19. Por consiguiente, cada una de las capas de fibras 14 a 17 presenta una dirección de estructura 19 a 22 que discurre esencialmente de manera paralela al plano x-y E.
- 40 Las capas de fibras 14 a 17 están configuradas como esterilla de fibras y están cosidas entre sí por pares mediante costuras 23 que discurren de manera paralela a la dirección x. Mediante las costuras 23, las capas de fibras 14 a 17 presentan respectivamente espacios de costuras 24 en forma de ranura que se designan también como orificios de costura. Los espacios de costura 24 se extienden debido a la estructura de los haces de fibras 18 compuestos de fibras de carbono y/o fibras de vidrio individuales en la respectiva dirección de estructura 19 a 22 de las capas de fibras 14 a 17.
- 45
- 50
- 55
- 60
- 65

A continuación se describe la comprobación no destructiva del objeto 2. El objeto 2 se dispone sobre el portaobjetos 5, extendiéndose las capas de fibras 14 a 17 esencialmente de manera paralela al plano x-y E. Por medio de la fuente de rayos X 3 se irradia el objeto 2 con radiación de rayos X 9. El detector de rayos X 4 detecta la radiación de rayos X 9 que topa con éste, convirtiéndose para cada píxel la radiación de rayos X 9 detectada en un correspondiente valor de grises y transfiriéndose para la evaluación al dispositivo de cálculo 11. La fuente de rayos X 3 y el detector de rayos X 4 se mueven durante la irradiación con radiación de rayos X 9 en  $180^\circ$  con desplazamiento de fases en las direcciones de movimiento 7 en las correspondientes órbitas 8, de modo que el detector de rayos X 4 transfiere datos de proyección en forma de valores de grises de una multiplicidad de ángulos de proyección al dispositivo de cálculo 11. Un movimiento de este tipo de la fuente de rayos X 3 y del detector de rayos X 4 durante la irradiación con radiación de rayos X 9 se conoce también como tomosíntesis circular de rayos X.

Por medio de la unidad de reconstrucción 12, a partir de los datos de proyección se reconstruyen datos del objeto que reproducen digitalmente el objeto 2 en forma tridimensional. Los datos del objeto se reconstruyen en forma de una multiplicidad de conjuntos de datos de estratos bidimensionales, reproduciendo los conjuntos de datos de estratos respectivamente un estrato  $S_i$ , con  $i = 1$  a  $N_s$ , del objeto 2 que discurre de manera paralela al plano x-y E en una correspondiente posición  $i$  en dirección z. En las figuras 2 y 4 está representado a modo de ejemplo un estrato  $S_i$  reproducido.

Los conjuntos de datos de estratos se transmiten a la unidad de evaluación 13. En la unidad de evaluación 13 pueden evaluarse los conjuntos de datos de estratos o bien para el objeto 2 en total o para una parte del objeto 2. A continuación se describe la evaluación de los conjuntos de datos de estratos para una de varias parcelas 25 del objeto 2. El tamaño y la posición de las parcelas 25 se seleccionan de manera que en cada una de las capas de fibras 14 a 17 está contenido al menos un espacio de costura 24. La parcela 25 presenta un punto medio M y un diámetro D en píxeles. La parcela 25 puede estar configurada por ejemplo de forma prismática o cilíndrica. La evaluación de los conjuntos de datos de estratos para el objeto 2 en total se realiza de manera correspondiente tal como se describe a continuación.

Los estratos  $S_i$  que corresponden a los conjuntos de datos de estratos son paralelos uno con respecto a otro y discurren desde distintas posiciones  $i$  en dirección z por las capas de fibras 14 a 17. El índice  $i$  corresponde a la posición en la dirección z del estrato reconstruido  $S_i$ . Debido a la tomosíntesis circular de rayos X, los estratos reconstruidos  $S_i$  tienen la propiedad de que el objeto 2 se reproduzca de manera nítida en las posiciones  $i$  correspondientes al estrato  $S_i$  en dirección z, mientras que el objeto 2 fuera de este estrato  $S_i$  se reproduce de manera borrosa dependiendo de la distancia en dirección z de este estrato  $S_i$ .

En la unidad de evaluación 13 se determinan en primer lugar para la parcela 25 direcciones de evaluación  $A_j$  con  $j = 1$  a  $N_w$ . Las direcciones de evaluación  $A_j$  están ilustradas en la figura 4 para el estrato reconstruido  $S_i$  por la capa de fibras 17. Las direcciones de evaluación  $A_j$  se distribuyen en distancias angulares equidistantes por un área angular de  $180^\circ$ . En la figura 4 están representadas cinco direcciones de evaluación  $A_1$  a  $A_5$  que presentan ángulos  $\beta$  con respecto a la dirección x de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  y  $180^\circ$ . Las direcciones de evaluación  $A_j$  discurren por el punto medio M de la parcela 25 en el estrato reproducido  $S_i$ . Como alternativa pueden cubrir las direcciones de evaluación  $A_j$  un área angular de más de  $180^\circ$ , en particular de más de  $190^\circ$ , y en particular de más de  $200^\circ$ , lo que es ventajoso en relación a la evaluación posterior de los conjuntos de datos de estratos.

Para cada uno de los estratos reproducidos  $S_i$  y para cada una de las direcciones de evaluación  $A_j$  se extrae a partir del respectivamente correspondiente conjunto de datos de estrato a lo largo de las direcciones de evaluación  $A_j$  correspondientes desarrollos de valor de grises  $G_{ij}$ . Las figuras 5 y 6 muestran a modo de ejemplo los desarrollos de valor de grises  $G_{i1}$  y  $G_{i2}$  del estrato  $S_i$  con respecto a las direcciones de evaluación  $A_1$  y  $A_2$ . Como alternativa para cada una de las direcciones de evaluación  $A_j$  puede determinarse un desarrollo de valor de grises promedio mediante promedio de varios desarrollos de valor de grises dispuestos de manera adyacente y que discurren en la respectiva dirección de evaluación  $A_j$ .

La evaluación se basa en el reconocimiento de que un desarrollo de gradiente  $R_{ij}$  con respecto a un desarrollo de valor de grises  $G_{ij}$  depende del ángulo entre la dirección de evaluación  $A_j$  y la respectiva dirección de estructura 19 a 22 así como de la distancia de las capas de fibras reproducidas 14 a 17, en particular sus espacios de costura 24, en dirección z del estrato respectivamente reconstruido  $S_i$ . Esto significa que los valores del desarrollo de gradiente  $R_{ij}$  se vuelven máximos de manera precisa cuando la dirección de evaluación  $A_j$  está orientada de manera perpendicular a la respectiva dirección de estructura 19 a 22, o sea es  $\alpha - \beta = 90^\circ$  y el estrato reconstruido  $S_i$  en dirección z se encuentra en la respectiva capa de fibras 14 a 17, o sea la distancia de los espacios de costura 24 de la respectiva capa de fibras 14 a 17 con respecto al estrato reconstruido  $S_i$  es mínima.

La figura 4 muestra que la dirección de evaluación  $A_2$  discurre de manera perpendicular a la dirección de estructura 22 y el estrato representado  $S_i$  en una correspondiente posición  $i$  en dirección z discurre directamente por los espacios de costura 24 de la cuarta capa de fibras 17, o sea la distancia entre el estrato reconstruido  $S_i$  con respecto a los espacios de costura 24 en dirección z es mínima. De manera correspondiente, el desarrollo de valor de grises  $G_{i2}$  representado en la figura 6 presenta en los espacios de costura 24 altas diferencias de valor de grises. Por el contrario, la dirección de evaluación  $A_1$  del desarrollo de valor de grises  $G_{i1}$  no discurre de manera perpendicular a la

dirección de estructura 22, de manera que las diferencias de valor de grises en los espacios de costura 24 resultan claramente más bajos. La evaluación de las capas de fibras 14 a 17 se atribuye, por tanto, a la determinación de aquellos desarrollos de valor de grises  $G_{ij}$  cuyas direcciones de evaluación  $A_j$  discurren de manera perpendicular a la respectiva dirección de estructura 19 a 22 y que se encuentran en una posición  $i$  en dirección  $z$ , que corresponde a la posición de la respectiva capa de fibras 14 a 17 en la dirección  $z$ . La dirección perpendicular a la respectiva dirección de estructura 19 a 22 representa de manera correspondiente una dirección predominante para la absorción de los rayos X 9, dado que en esta dirección se vuelven máximas las diferencias de valor de grises en los espacios de costura 24. De manera correspondiente se determina para cada desarrollo de valor de grises  $G_{ij}$  un correspondiente desarrollo de gradiente  $R_{ij}$ , en el que pueden detectarse claramente las diferencias de valor de grises y por consiguiente pueden evaluarse de manera sencilla. La figura 7 muestra a modo de ejemplo el desarrollo de gradiente  $R_{i2}$  con respecto al desarrollo de valor de grises  $G_{i2}$ .

Con respecto a cada desarrollo de gradiente  $R_{ij}$  se determina un valor de gradiente  $W_{ij}$  que es una medida para los valores extremos en el desarrollo de gradiente  $R_{ij}$ . El valor de gradiente  $W_{ij}$  se determina de manera que el desarrollo de gradiente  $R_{ij}$  se compara con un valor umbral de gradiente  $R_s$  y todos los valores del desarrollo de gradiente  $R_{ij}$  que sobrepasen el valor umbral de gradiente  $R_s$  se suman para obtener el valor de gradiente  $W_{ij}$ . La figura 7 ilustra el cálculo del valor de gradiente  $W_{i2}$  para el desarrollo de gradiente  $R_{i2}$ .

Todos los valores de gradiente  $W_{ij}$  se representan dependiendo de la posición  $i$  o del estrato  $S_i$  en dirección  $z$  y de la dirección de evaluación  $A_j$  en un campo de gradiente. La figura 8 ilustra a modo de ejemplo un campo de gradiente para cuatro estratos  $S_i$  con  $i = 1$  a 4 y para cinco direcciones de evaluación  $A_j$  con  $j = 1$  a 5, tal como se ha mostrado en las figuras 2 y 4. Los valores de gradiente  $W_{ij}$  están representados dependiendo de su valor de manera más clara o de manera más oscura, estando representados los valores de gradiente  $W_{ij}$  más altos de manera más clara que los más bajos. Tal como es evidente a partir de la figura 8, destacan las direcciones de evaluación  $A_j$  en el campo de gradiente que discurren en el respectivo estrato  $S_i$  de manera perpendicular a la respectiva dirección de estructura 19 a 22. El campo de gradiente puede evaluarse de manera sencilla con respecto al número de capas de fibras 14 a 17, las correspondientes direcciones de estructura 19 a 22, la sucesión de las capas de fibras 14 a 17, el espesor y la posición de las capas de fibras 14 a 17 en dirección  $z$ , en el que se analizan las posiciones de los valores de gradiente  $W_{ij}$  que destacan en el campo de gradiente puede someterse el campo de gradiente adicionalmente a una filtración y/o binarización. Puede realizarse por ejemplo una filtración de Gauss para la supresión de ruido, una filtración LOG (*Laplacian of Gaussian*) para el aumento de máximos locales y/o una filtración para destacar determinadas áreas angulares de las direcciones de evaluación  $A_j$  para la corrección de propiedades de espacio de costura no igualmente distribuidas. Para evitar efectos de borde indeseados durante una filtración es ventajoso cuando las direcciones de evaluación  $A_j$  cubren durante una filtración un área angular de más de  $180^\circ$ .

En la binarización se comparan los valores de gradiente  $W_{ij}$  con un valor umbral de binarización, determinándose un campo de gradiente binarizado, en el que a un valor de gradiente  $W_{ij}$  se asigna un 1 cuando éste se encuentra por encima del valor umbral de binarización y un cero cuando éste se encuentra dentro del valor umbral de binarización. El análisis del campo de gradiente puede realizarse, por ejemplo, mediante una segmentación de los valores de gradiente  $W_{ij}$  binarizados que destacan en el campo de gradiente, pudiéndose comparar el resultado del análisis directamente con una estructura teórica del objeto que va a comprobarse 2.

Adicionalmente puede realizarse una comprobación de la plausibilidad, en la que se borran una vez por ejemplo valores de gradiente  $W_{ij}$  con una posición igual en dirección  $z$  y direcciones de evaluación  $A_j$  desplazadas  $180^\circ$ . Además pueden seleccionarse estructuras de objeto que no dependen de las capas de fibras 14 a 17 y están contenidas en los conjuntos de datos de estratos.

El procedimiento descrito es adecuado en principio para cualquier objeto estructurado de manera laminar 2, siempre que éste tenga una dirección predominante en la absorción de radiación de rayos X 9.

A continuación se describe con referencia a la figura 9 un segundo ejemplo de realización de la invención. Las partes constructivamente idénticas conservan los mismos números de referencia que en el primer ejemplo de realización, a cuya descripción se remite con esto. Las partes constructivamente distintas, sin embargo funcionalmente similares conservan los mismos números de referencia seguidos de una  $a$ . La diferencia esencial con respecto al primer ejemplo de realización consiste en que la fuente de rayos X 3 y el detector de rayos X 4 se mueven con respecto al objeto 2 en direcciones de movimiento opuestas 7a en pistas que discurren linealmente 8a durante la irradiación del objeto 2 con radiación de rayos X 9. Un movimiento de este tipo de la fuente de rayos X 3 y del detector de rayos X 4 durante la irradiación se conoce también como tomosíntesis lineal de rayos X. Con la tomosíntesis lineal de rayos X pueden examinarse de manera sencilla en particular objetos extendidos de manera alargada 2. Con respecto al modo de funcionamiento del tomógrafo computerizado por rayos X 1a se remite al modo de funcionamiento del primer ejemplo de realización.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material por medio de tomografía computarizada por rayos X, que comprende las etapas de:

- 5 - facilitar un objeto (2) que va a comprobarse y constituido por varias capas de material (14 a 17),
- extendiéndose las capas de material (14 a 17) esencialmente de manera paralela a un plano x-y (E) que está definido por una dirección x y una dirección y que discurre de manera perpendicular a ésta,
  - 10 -- estando dispuestas las capas de material (14 a 17) por estratos una sobre otra en una dirección z que discurre de manera perpendicular al plano x-y (E) y
  - presentando las capas de material (14 a 17) en cada caso una dirección de estructura (19 a 22) que discurre esencialmente de manera paralela al plano x-y (E),

- 15 - determinar datos de proyección del objeto (2) mediante irradiación del objeto (2) con radiación de rayos X (9) y detectar la radiación de rayos X (9),
- reconstruir datos del objeto a partir de los datos de proyección, reproduciendo los datos del objeto al menos una parte del objeto (2),
- caracterizado por**

20 una evaluación de los datos del objeto de manera que

- 25 - a partir de los datos del objeto a lo largo de varias direcciones de evaluación ( $A_i$ ) que discurren de manera paralela al plano x-y (E) y en varias posiciones ( $S_i$ ) en dirección z se determinan desarrollos de valor de grises ( $G_{ij}$ ) y
- se determinan y se evalúan desarrollos de gradiente ( $R_{ij}$ ) correspondientes a los desarrollos de valor de grises ( $G_{ij}$ ).

30 2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la determinación de los datos de proyección se realiza de manera que una fuente de rayos X (3) y un detector de rayos X (4) se mueven de manera paralela al plano x-y (E) con respecto al objeto (2).

35 3. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado por que** la fuente de rayos X (3) y el detector de rayos X (4) se mueven con respecto al objeto (2) en direcciones de movimiento iguales (7) con desplazamiento de fases en órbitas concéntricas (8).

40 4. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado por que** la fuente de rayos X (3) y el detector de rayos X (4) se mueven con respecto al objeto (2) en direcciones de movimiento opuestas (7a) en pistas que discurren linealmente (8a).

45 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por que** la reconstrucción se realiza de manera que los datos del objeto se encuentran en forma de una multiplicidad de conjuntos de datos de estratos bidimensionales, reproduciendo los conjuntos de datos de estratos en cada caso un estrato ( $S_i$ ) del objeto (2) que discurre de manera paralela al plano x-y (E) en una correspondiente posición (i) en dirección z y determinándose a partir de los conjuntos de datos de estratos los desarrollos de valor de grises ( $G_{ij}$ ).

50 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado por que** las direcciones de evaluación ( $A_i$ ) están distribuidas al menos por un área angular de  $180^\circ$ , en particular de  $190^\circ$  y en particular de  $200^\circ$ , en distancias angulares equidistantes.

7. Procedimiento según las reivindicaciones 5 ó 6, **caracterizado por que** las direcciones de evaluación ( $A_i$ ) para los conjuntos de datos de estratos discurren en cada caso por un punto medio (M) del estrato reproducido ( $S_i$ ).

55 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** para cada dirección de evaluación ( $A_i$ ) a partir de varios desarrollos de valor de grises ( $G_{ij}$ ) dispuestos de manera adyacente y que discurren en la dirección de evaluación ( $A_i$ ) se determina un desarrollo de valor de grises promedio.

60 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, **caracterizado por que** para cada desarrollo de gradiente ( $R_{ij}$ ) se determina un valor de gradiente ( $W_{ij}$ ) que es una medida de valores extremos en el desarrollo de gradiente ( $R_{ij}$ ).

65 10. Procedimiento según la reivindicación 9, **caracterizado por que** el valor de gradiente ( $W_{ij}$ ) se determina de manera que a partir de valores del desarrollo de gradiente ( $R_{ij}$ ), que sobrepasan un valor umbral de gradiente ( $R_s$ ), se forma una suma.

11. Procedimiento según las reivindicaciones 9 ó 10, **caracterizado por que** la evaluación de los desarrollos de



gradiente ( $R_{ij}$ ) se realiza de manera que los valores de gradiente ( $W_{ij}$ ) se representan dependiendo de la posición (i) en dirección z y de la dirección de evaluación ( $A_i$ ) como campo de gradiente bidimensional.

5 12. Procedimiento según la reivindicación 11, **caracterizado por que** el campo de gradiente se filtra.

13. Procedimiento según las reivindicaciones 11 ó 12, **caracterizado por que** el campo de gradiente se binariza dependiendo de un valor umbral de binarización.

10 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 13, **caracterizado por que** el campo de gradiente se evalúa al menos en relación con una característica del grupo de las siguientes características:

número de capas de material (14 a 17), dirección predominante de las capas de material (14 a 17), sucesión de las capas de material (14 a 17), espesor y posición de las capas de material (14 a 17) en dirección z.

15 15. Tomógrafo computerizado por rayos X para la comprobación no destructiva de objetos constituidos por capas de material por medio de tomografía computerizada por rayos X, que comprende

- una fuente de rayos X (3) para la irradiación con radiación de rayos X (9) de un objeto (2) que va a comprobarse y constituido por varias capas de material (14 a 17),

20 -- extendiéndose las capas de material (14 a 17) esencialmente de manera paralela a un plano x-y (E) que está definido por una dirección x y una dirección y que discurre de manera perpendicular a ésta,

-- estando dispuestas las capas de material (14 a 17) por estratos una sobre otra en una dirección z que discurre de manera perpendicular al plano x-y (E) y

25 -- presentando las capas de material (14 a 17) en cada caso una dirección de estructura (19 a 22) que discurre esencialmente de manera paralela al plano x-y (E),

- un detector de rayos X (4) para la determinación de datos de proyección del objeto (2) a partir de la radiación de rayos X detectada (9),

30 - un portaobjetos (5) para el alojamiento del objeto (2) entre la fuente de rayos X (3) y el detector de rayos X (4) y

- un dispositivo de cálculo (11) con

-- una unidad de reconstrucción (12) para la reconstrucción a partir de los datos de proyección de datos del objeto que reproducen al menos una parte del objeto (2),

35 **caracterizado por que**

- el dispositivo de cálculo (11) presenta una unidad de evaluación (13) para la evaluación de los datos del objeto, estando configurada la unidad de evaluación (13) de manera que a partir de los datos del objeto a lo largo de varias direcciones de evaluación ( $A_i$ ) que discurren de manera paralela al plano x-y (E) y en varias posiciones (i) en dirección z pueden determinarse desarrollos de valor de grises ( $G_{ij}$ ), y

40 - pueden determinarse y evaluarse desarrollos de gradiente ( $R_{ij}$ ) correspondientes a los desarrollos de valor de grises ( $G_{ij}$ ).

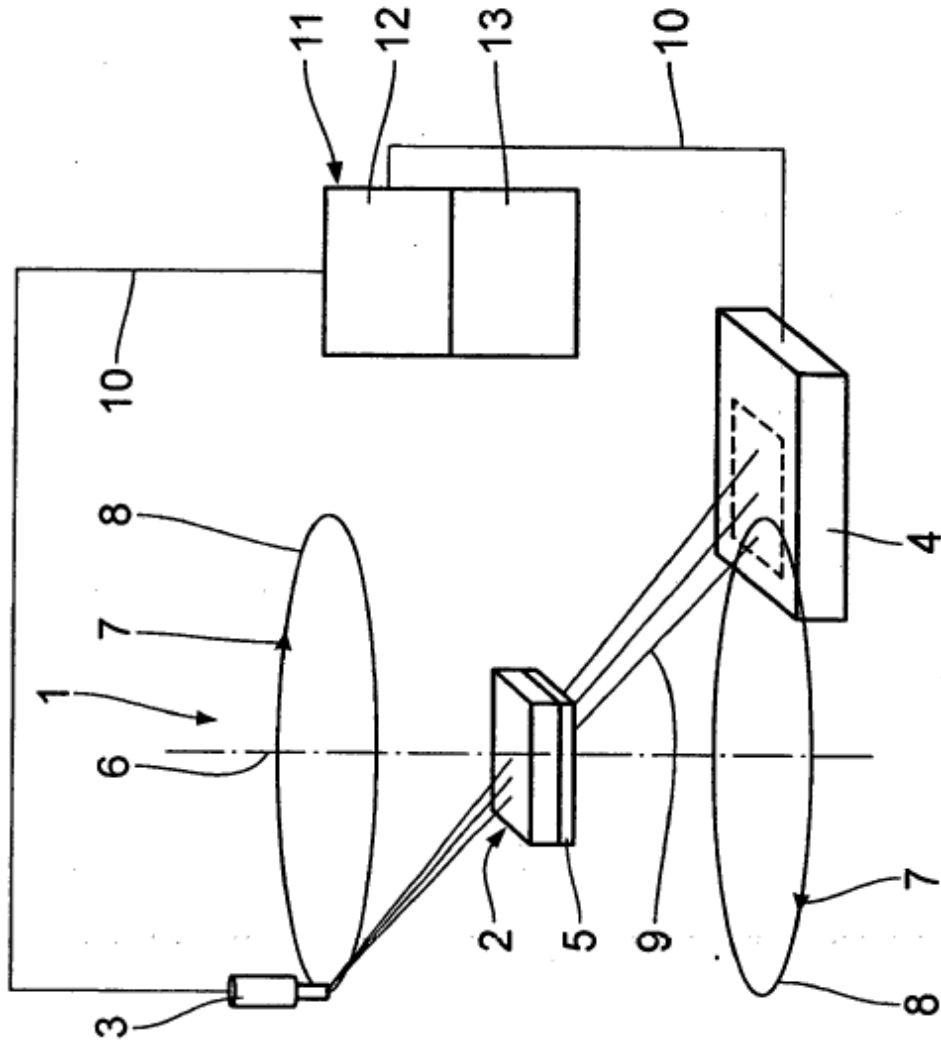


Fig. 1

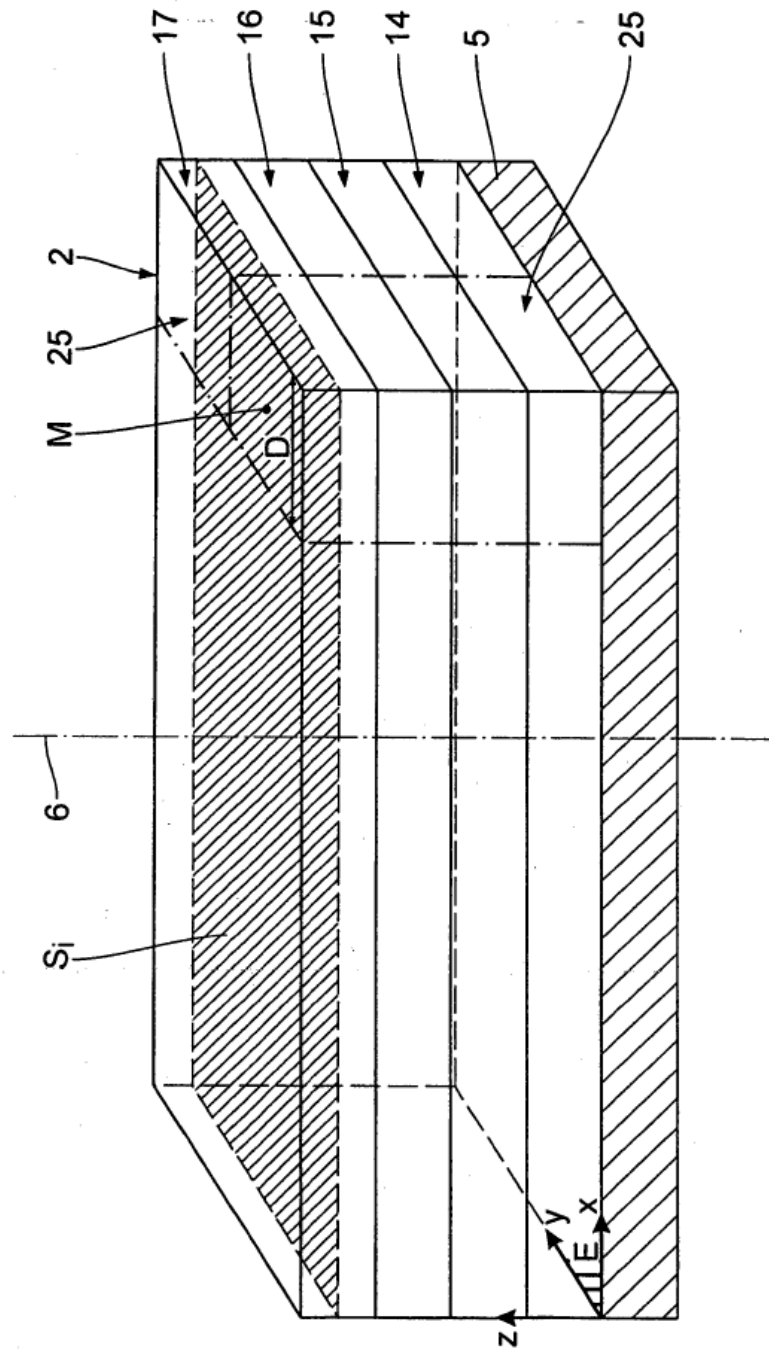


Fig. 2

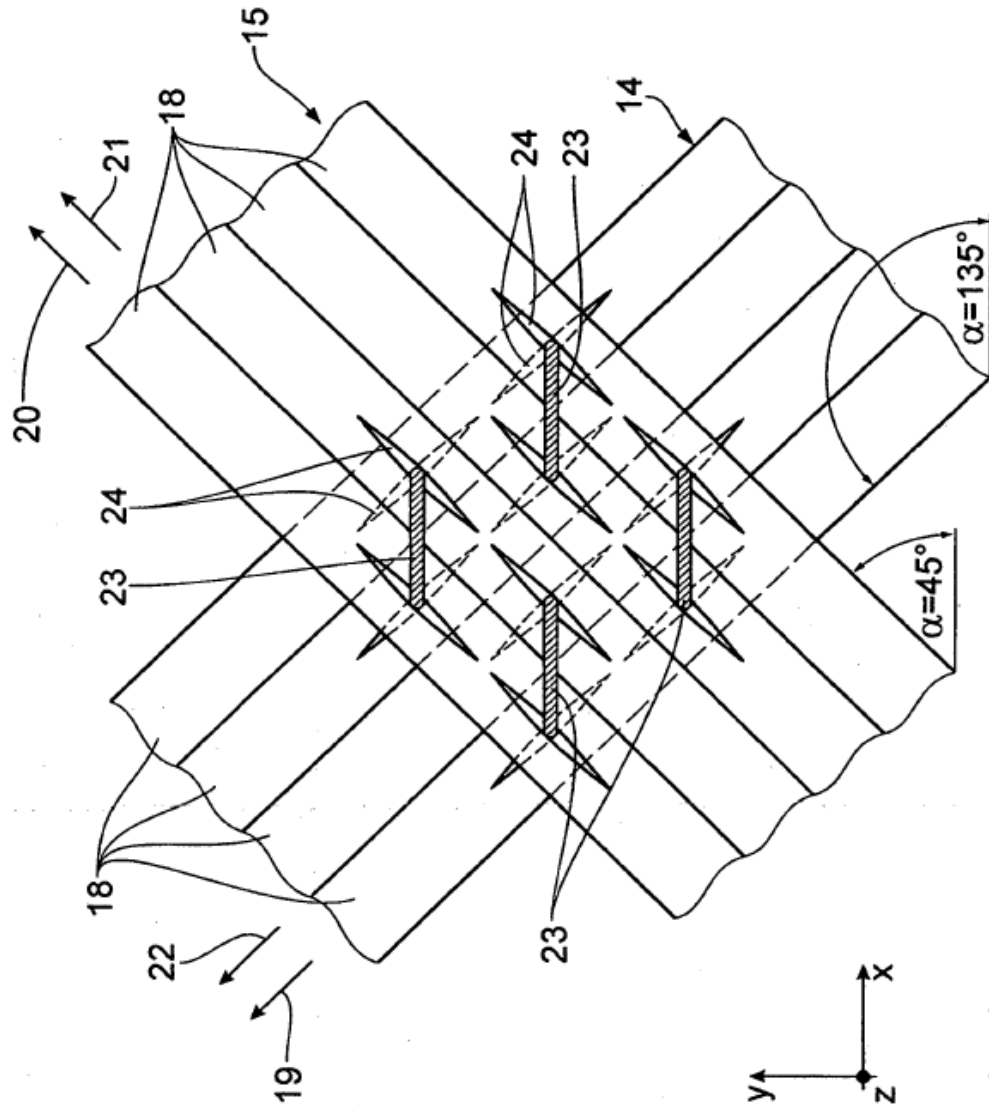


Fig. 3

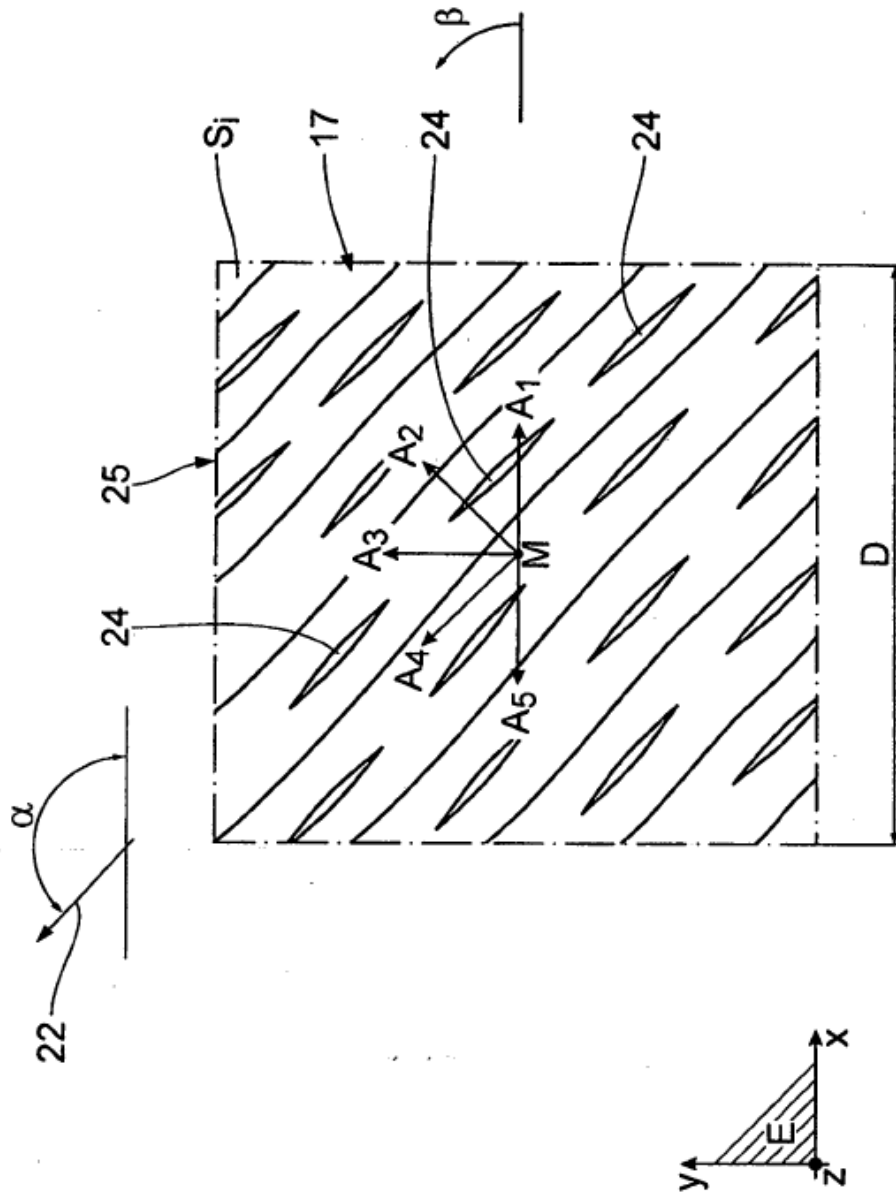


Fig. 4

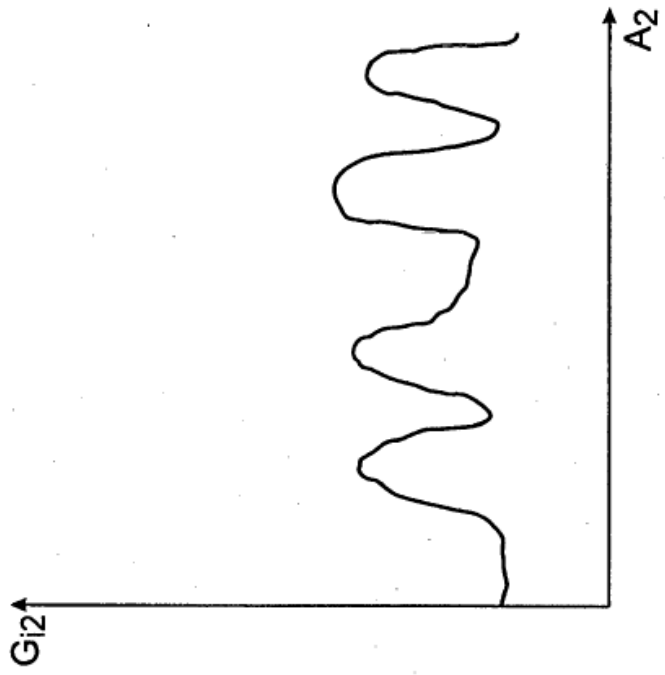


Fig. 6

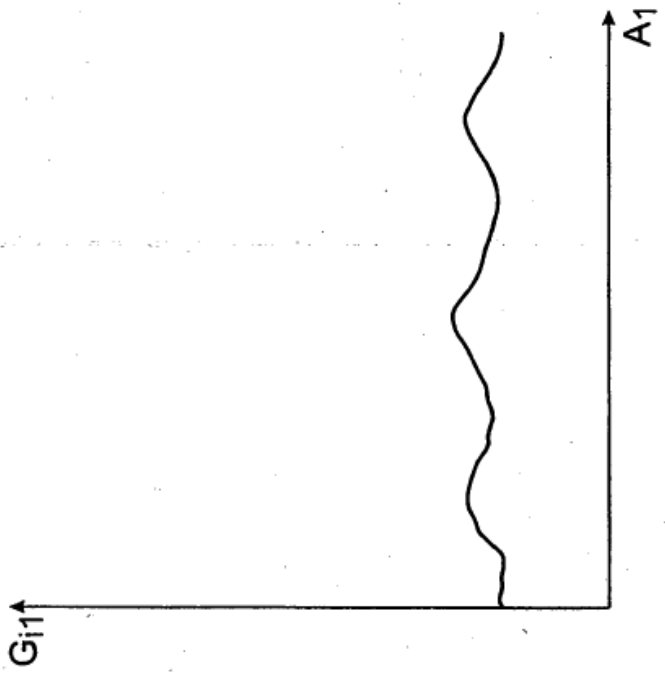


Fig. 5

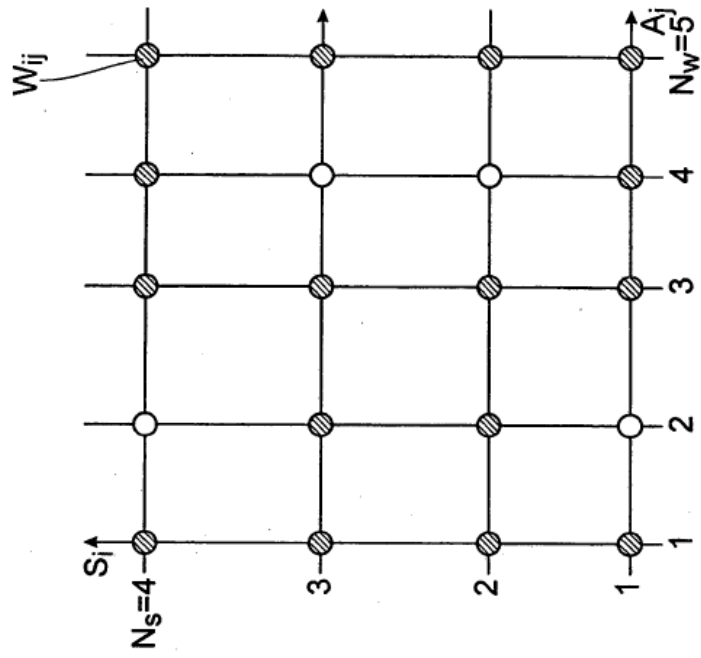


Fig. 8

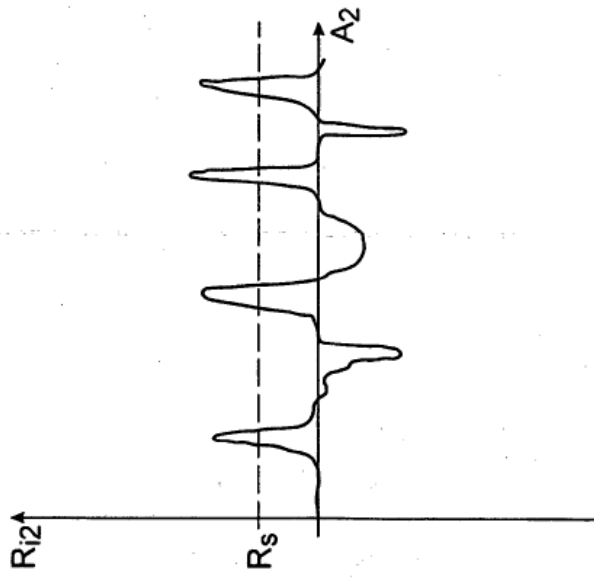


Fig. 7

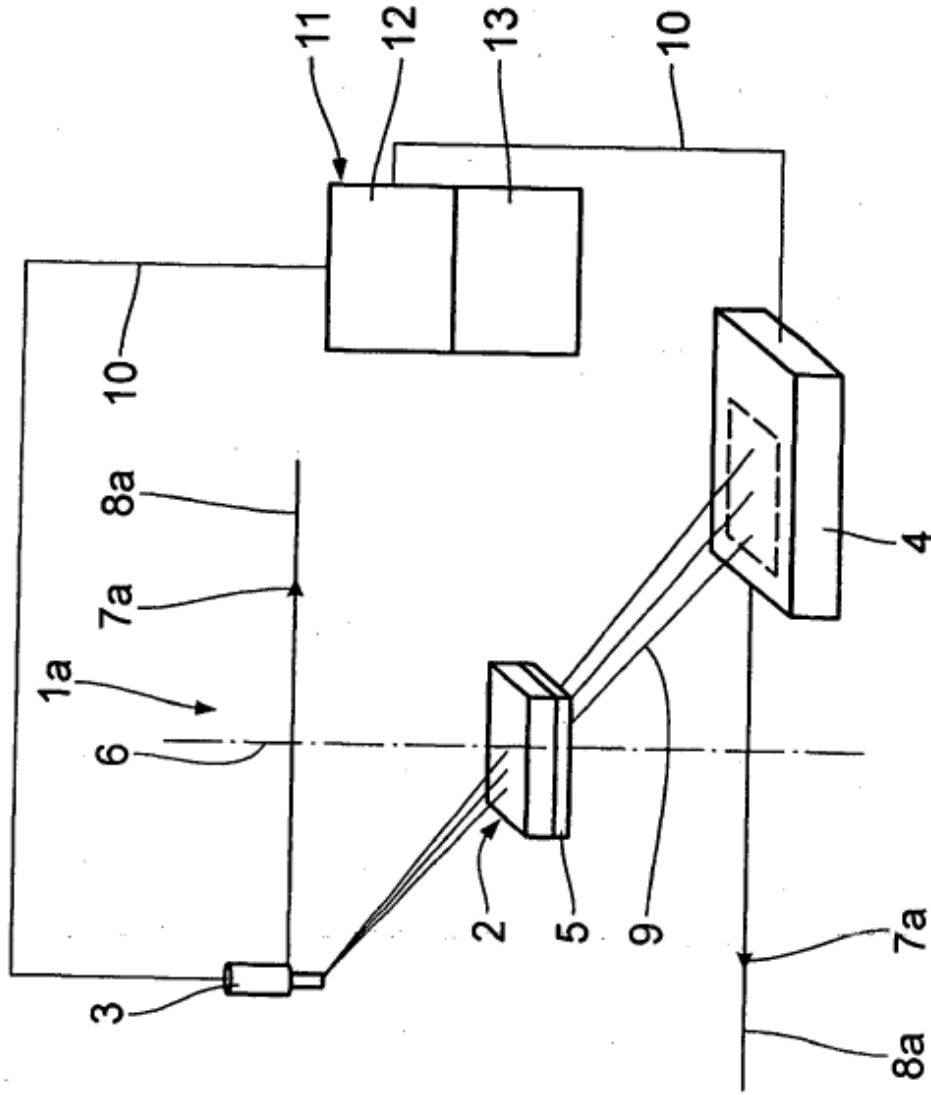


Fig. 9