

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 966 498**

51 Int. Cl.:

A61B 3/10 (2006.01)

A61B 3/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.06.2021** **PCT/EP2021/067113**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2021** **WO21259982**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.06.2021** **E 21733835 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.10.2023** **EP 4138637**

54 Título: **Dispositivo y método para determinar al menos una aberración ocular**

30 Prioridad:

24.06.2020 EP 20181916

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

22.04.2024

73 Titular/es:

CARL ZEISS VISION INTERNATIONAL GMBH
(100.0%)
Turnstrasse 27
73430 Aalen, DE

72 Inventor/es:

SUCHKOV, NIKOLAI y
WAHL, SIEGFRIED

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 966 498 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 y método para determinar al menos una aberración ocular

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un dispositivo, a un método y a un producto de programa informático para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, así como a un método relacionado para producir al menos una lente de gafas para el al menos un ojo del usuario.

10 **Técnica relacionada**

Se conocen dispositivos, métodos y productos de programa informático para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario. Como se usa en general, la expresión "aberración ocular" se refiere a una diferencia entre una superficie de un frente de onda óptico ideal y una superficie de un frente de onda óptico real que se determina para el al menos un ojo de un usuario. En el presente documento, la expresión "frente de onda óptico" se refiere a una superficie que es perpendicular a un haz a lo largo del cual se propaga la luz. Dentro de una población de seres humanos típica, la aberración ocular, habitualmente, comprende al menos un error de enfoque esferocilíndrico de segundo orden, también denotado como "error de refracción", en donde, sin embargo, también puede tener lugar al menos una aberración de orden superior.

De acuerdo con X. Wei y L. Thibos (2010), *Design and validation of a scanning Shack Hartmann aberrometer for measurements of the eye over a wide field of view*, *Optics Express*, 18(2), 1134, <https://doi.org/10.1364/oe.18.001134>, la visión periférica y las aberraciones fuera del eje no solo desempeñan un papel importante en las tareas visuales diarias, sino que también pueden influir en el crecimiento ocular y en el desarrollo refractivo. Por lo tanto, indican que es importante medir las aberraciones de frente de onda fuera del eje de los ojos del ser humano de forma objetiva. Para lograr una medición eficiente, los autores incorporaron un sistema de exploración de doble pasada en un sensor de frente de onda de Shack Hartmann (SHWS) para obtener un aberrómetro de Shack Hartmann de exploración (SSHA). En el presente documento, el prototipo de SSHA podría emplearse, con éxito, para medir las aberraciones de frente de onda fuera del eje a lo largo de un campo visual de $\pm 15^\circ$ en no más de 7 segundos. En dos experimentos de validación con un ojo de modelo gran angular, el prototipo midió el cambio en la aberración de desenfoque de forma exacta ($< 0,02 \mu\text{m}$, pupila de 4 mm) y de forma precisa ($< 0,03 \mu\text{m}$, pupila de 4 mm).

En particular, para incorporar el sistema de exploración de doble pasada en el SHWS, un plano de lentilla del SHWS y los ejes de exploración de los espejos de exploración en X-Y se alinean ópticamente sobre planos conjugados con la pupila de entrada del ojo sometido a prueba. Para este fin, se usan tres telescopios de retransmisión óptica de una forma en la que, en la trayectoria óptica entrante, los ejes de exploración de los espejos de exploración forman un centro de exploración a través de uno de los telescopios de retransmisión óptica, que se conjuga adicionalmente con el centro de la pupila de entrada del ojo a través de uno adicional de los telescopios de retransmisión óptica. Un haz de láser estrecho, colimado y filtrado espacialmente se introduce a través de un divisor de haz que corta a los ejes de exploración de los espejos de exploración y el centro de la pupila de entrada del ojo. A medida que rotan los espejos de exploración, el haz de láser rota alrededor de un punto de pivote ubicado en el centro de la pupila de entrada del ojo, inyectando de ese modo el haz de láser a lo largo de una línea de visión diferente como se especifica en las dimensiones angulares en el espacio del objeto. En el espacio de la imagen del ojo, el haz de láser realiza una exploración a lo largo de toda la retina y forma una secuencia de puntos retinianos, en donde la exploración se pausa brevemente (50 ms) para adquirir una medición de frente de onda óptico. Por lo tanto, para cada posición de los espejos de exploración, el frente de onda óptico que se origina en el punto retiniano es modulado por las estructuras oculares, en particular, el cristalino y la córnea, y emerge en la pupila de entrada. A medida que el frente de onda óptico emergente se propaga hacia atrás, la exploración del mismo es revertida por los espejos de exploración y, posteriormente, es muestreado por una matriz de microlentes en el SHWS.

A pesar de las ventajas de los dispositivos, métodos y productos de programa informático existentes para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, sigue habiendo margen de mejora. En particular, la mayoría de los dispositivos y métodos existentes no permiten una medición automatizada de las aberraciones oculares de diferentes excentricidades en dos meridianos. Para sistemas con solo un único meridiano de exploración, el ojo del usuario ha de moverse para seleccionar consecutivamente la excentricidad en un meridiano particular, requiriendo, por lo tanto, una fijación adicional de al menos un objetivo. Para este fin, el al menos un objetivo ha de colocarse a una distancia de 5 metros o más para evitar la acomodación, imponiendo, por lo tanto, restricciones sobre el entorno en donde pueden usarse el dispositivo y el método. Asimismo, una fijación múltiple, habitualmente, da como resultado una medición prolongada, añadiendo de ese modo incertidumbres a la medición, en particular debido a que un usuario que lleva puesta al menos una lente puede moverse con el tiempo, de tal modo que las aberraciones oculares se modifican, en general, a lo largo de todo el campo de visión. En consecuencia, los dispositivos y métodos existentes solo pueden ser usados por profesionales capacitados del cuidado de los ojos.

Aunque existen sistemas de exploración que requieren una óptica complicada y/o costosa, tal como un sistema de rotación alrededor de una pupila del al menos un ojo del usuario, un sistema de exploración que comprende al menos

un galvanómetro de espejo de exploración, o el aberrómetro de Shack Hartmann de exploración descrito anteriormente, estos no ofrecen la posibilidad de una medición de una sola vez.

El documento US 2005/105044 A1 divulga sistemas y métodos de medición de frente de onda que pueden emplearse en la detección de aberraciones de fase en una lente de gafas y en un ojo. Diversas realizaciones incluyen disponer un patrón de modulación en la trayectoria de un haz de retorno desde la lente de gafas o el ojo, y formar imágenes de un patrón de difracción en un plano de auto-formación de imágenes en relación con el patrón de modulación con un detector. Se analiza el patrón de difracción y los resultados se usan para producir una representación de las características de fase de frente de onda que describen las aberraciones en la lente o el ojo que se está midiendo. Se divulgan técnicas de iluminación y de procesamiento para mejorar los resultados de medición. Diversas realizaciones comprenden sistemas adaptables para medir aberraciones tanto en lentes en gafas como en los ojos de un paciente.

El documento US 2003/214647 A1 divulga un sistema de medición de frente de onda y un método para detectar aberraciones de fase en frentes de onda que se reflejan desde, se transmiten a través de o se reflejan internamente dentro de objetos que se busca medir, por ejemplo, sistemas ópticos, el ojo del ser humano, etc., incluyendo colocar una retícula en la trayectoria de un haz de retorno desde el objeto y colocar un detector en un plano de auto-formación de imágenes de patrón de difracción en relación con la retícula. El patrón de difracción se analiza y da como resultado un modelo de las características de fase de frente de onda. Un conjunto de polinomios conocidos se ajusta al gradiente de fase de frente de onda para obtener coeficientes polinómicos que describen aberraciones en el objeto o dentro de la fuente de frente de onda que se está midiendo.

El documento de la técnica anterior US 7.084.986 divulga un sistema para la medición sin contacto de la calidad de formación de imágenes óptica de un ojo que comprende: una fuente de luz; un interferómetro mediante el cual al menos un pulso de luz con una longitud de coherencia corta se acopla al ojo desde dicha fuente de luz; un detector; variándose la longitud de la trayectoria óptica de al menos un brazo del interferómetro para medir la longitud del ojo hasta que un patrón de interferencia típico entre un reflejo de la córnea y un reflejo de la retina del ojo tiene lugar en dicho detector en donde los reflejos de la retina se envían a través de un dispositivo de formación de imágenes óptica a un sensor de Shack Hartmann para detectar las aberraciones de los frentes de onda en la midriasis del ojo.

Problema a resolver

En particular con respecto a la divulgación de X. Wei y L. Thibos, véase anteriormente, por lo tanto, un objetivo de la presente invención es proporcionar un método, un dispositivo y un producto de programa informático para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, así como un método relacionado para producir al menos una lente de gafas para el al menos un ojo del usuario, que superan al menos parcialmente los problemas mencionados anteriormente del estado de la técnica.

Un objetivo particular de la presente invención es posibilitar una evaluación eficiente de un desenfoque periférico, específicamente, para ser capaz de obtener un mapa de desenfoque ocular completo en una medición de una sola vez del al menos un ojo del usuario, especialmente, empleando una medición automatizada de las aberraciones oculares con respecto a diferentes excentricidades del al menos un ojo del usuario en dos meridianos.

Más particularmente, sería deseable, por lo tanto, proporcionar una herramienta de diagnóstico para evaluar la progresión de la miopía, especialmente para personalizar los tratamientos de control de la miopía para ser capaz de proporcionar lentes ópticas personalizadas, tales como gafas progresivas o lentes de contacto multifocales o, especialmente, lentes de gestión de la progresión de la miopía (MPM) para la gestión del desenfoque periférico o lentes con múltiples segmentos de lente con desenfoque incorporado (DIMS), basándose en una medición única y rápida del desenfoque periférico del al menos un ojo del usuario y/o en una supervisión continua de los cambios inducidos por la acomodación del al menos un ojo del usuario o un movimiento de al menos una lente que lleva puesta el usuario.

Sumario de la invención

Este problema se resuelve mediante un dispositivo, un método y un producto de programa informático para determinar un error de refracción de al menos un ojo de un usuario, así como un método relacionado para producir al menos una lente de gafas para el al menos un ojo del usuario con las características de las reivindicaciones independientes. Las realizaciones preferidas, que podrían implementarse de forma aislada o en cualquier combinación arbitraria, se enumeran en las reivindicaciones dependientes.

Como se usan en lo sucesivo, los términos "tener", "comprender" o "incluir" o cualquier variación gramatical arbitraria de los mismos se usan de forma no exclusiva. Por lo tanto, estos términos pueden referirse tanto a una situación en la que, además de la característica introducida por estos términos, no hay ninguna característica adicional presente en la entidad descrita en este contexto como a una situación en la que hay presentes una o más características adicionales. Como un ejemplo, las expresiones "A tiene B", "A comprende B" y "A incluye B" pueden referirse todas ellas a una situación en la que, además de B, ningún otro elemento está presente en A (es decir, una situación en la que A consiste única y exclusivamente en B) y a una situación en la que, además de B, uno o más elementos

adicionales están presentes en la entidad A, tales como el elemento C, los elementos C y D o incluso elementos adicionales.

Además, como se usan en lo sucesivo, las expresiones "preferentemente", "más preferentemente", "particularmente", "más particularmente", o expresiones similares se usan junto con características opcionales, sin restringir posibilidades alternativas. Por lo tanto, las características introducidas por estas expresiones son características opcionales y pretenden restringir el alcance de las reivindicaciones de ninguna forma. La invención puede realizarse, como reconocerá el experto, usando características alternativas. De forma similar, las características introducidas por "en una realización de la invención" o expresiones similares pretenden ser características opcionales, sin ninguna restricción con respecto a realizaciones alternativas de la invención, sin ninguna restricción con respecto al alcance de la invención y sin ninguna restricción con respecto a la posibilidad de combinar las características introducidas de esta forma con otras características de la invención.

En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario. Como ya se ha indicado anteriormente, la expresión "aberración ocular" se refiere a una diferencia entre una superficie de un frente de onda óptico ideal y una superficie de un frente de onda óptico real que se determina para el al menos un ojo de un usuario. En el presente documento, la expresión "frente de onda óptico" se refiere a una superficie que es perpendicular a un haz a lo largo del cual se propaga la luz. En lugar del término "usuario", también puede ser aplicable un término o expresión diferente, tal como "individuo", "persona", "persona de prueba" o "persona que lleva puestas gafas".

Conforme a la presente invención, el dispositivo comprende al menos:

- una unidad de detección de frente de onda designada para medir al menos un frente de onda óptico comprendido por al menos un haz de luz, en donde una aberración ocular del al menos un ojo del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico; y
- al menos un elemento de difracción designado para generar múltiples órdenes de difracción en el al menos un haz de luz en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se separan espacialmente sobre la unidad de detección de frente de onda y en el al menos un ojo del usuario.

El presente dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario puede usarse, preferentemente, en un método para producir al menos uno de una lente de gafas o una lente de contacto para el al menos un ojo del usuario como se describe a continuación con más detalle. Basándose en la norma ISO 13666:2019, también denominada en el presente documento "norma", Sección 3.5.2, cada una de las expresiones "lente de gafas" y "lente de contacto" se refiere a una lente óptica que se usa en el marco de la presente invención para determinar y/o corregir la al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, en donde la lente de gafas se porta delante del ojo del usuario, mientras la lente de contacto está en contacto directo con el ojo del usuario. Además, el término "gafas" se refiere a un elemento arbitrario que comprende dos lentes de gafas individuales y una montura de gafas, en donde cada lente de gafas se prepara para ser recibida por la montura de gafas seleccionada por el usuario.

Como ya se ha indicado adicionalmente anteriormente, la aberración ocular dentro de una población de seres humanos típica, habitualmente, comprende al menos un error de enfoque esferocilíndrico de segundo orden, también denotado como "error de refracción". Para describir una lente esferocilíndrica que se diseña para corregir un error de enfoque esferocilíndrico, son posibles diversos enfoques. Como se define en la norma, Sección 3.6.6, la expresión "lente esferocilíndrica" se refiere a una lente de gafas que tiene una superficie esférica y una superficie cilíndrica. Además, la lente esferocilíndrica se define, de acuerdo con la Sección 3.13.1, como una lente de gafas que combina un haz de luz paraxial y paralelo en dos líneas focales individuales y mutuamente perpendiculares, con lo que la lente de gafas tiene una potencia de refracción de ápice solo en dos meridianos. Además, la expresión "potencia de refracción de ápice" se define, de acuerdo con la Sección 3.10.7, como un valor inverso de la anchura de la sección paraxial. Como se define adicionalmente en las Secciones 3.2.12 y 3.13.2, el término "meridiano" se refiere a uno de dos planos perpendiculares de la lente de gafas que tiene un efecto astigmático que es paralelo a las dos líneas focales. En el presente documento, la expresión "efecto astigmático" corresponde a una "diferencia astigmática" que se define en la Sección 3.13.6 como una diferencia entre el valor de la potencia de refracción de ápice en el segundo meridiano y el valor de la potencia de refracción de ápice en el primer meridiano. Además, la "potencia cilíndrica" se refiere, de acuerdo con la Sección 3.13.7, a una diferencia algebraica entre los valores de refracción de los meridianos, en donde el valor de refracción de un meridiano particular que se usa como una referencia se resta del valor de refracción del otro meridiano, mientras que el "eje del cilindro" indica, de acuerdo con la Sección 3.13.8, la dirección del meridiano de la lente de gafas cuyo índice de refracción de ápice se usa como la referencia.

Como alternativa, L. N. Thibos, W. Wheeler y D. Homer (1997), *Power Vectors: An Application of Fourier Analysis to the Description and Statistical Analysis of Refractive Error, Optometry and Vision Science* 74 (6), S. 367-375, proponen abordar la descripción de una lente esferocilíndrica desde el punto de vista del análisis de Fourier de un perfil de potencia. Estos muestran que la consabida ley del seno cuadrado conduce naturalmente a una representación en serie de Fourier con exactamente tres coeficientes de Fourier, que representa parámetros naturales de una lente delgada. En el presente documento, un término constante corresponde a la potencia de un equivalente esférico medio (MSE), mientras que la amplitud y la fase del armónico corresponden a la potencia y el eje de una lente del cilindro

cruzado de Jackson (JCC), respectivamente. Expresar la serie de Fourier en forma rectangular conduce a la representación de una lente esferocilíndrica arbitraria como suma de una lente esférica y dos cilindros cruzados, uno en el eje de 0° y el otro en el eje de 45° . La potencia de estas lentes de tres componentes puede interpretarse como las coordenadas (x, y, z) de una representación vectorial del perfil de potencia. La representación de vectores de potencia de una lente esferocilíndrica puede usarse para un análisis numérico y gráfico de datos optométricos para problemas que implican combinaciones de lentes, la comparación de diferentes lentes y la distribución estadística de errores de refracción.

Preferentemente, el dispositivo presentado actualmente para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario puede comprender una fuente de luz. Como se usa en general, la expresión "fuente de luz" se refiere a una unidad que se designa para generar al menos un haz de luz, en donde el al menos un haz de luz que es proporcionado por la fuente de luz se guía a lo largo de al menos una trayectoria óptica. Como se usa en el presente documento, el término "luz" se refiere a una radiación electromagnética en al menos uno del rango espectral visible o el rango espectral de infrarrojo. Como se usa en general, la expresión "rango espectral visible" se refiere a una radiación electromagnética que tiene una longitud de onda de 380 nm a 780 nm, mientras que la expresión "rango espectral de infrarrojo" se refiere a una radiación electromagnética que tiene una longitud de onda por encima de 780 nm a 1000 μm , en donde puede preferirse particularmente el rango espectral visible o el "rango espectral de infrarrojo cercano", que se refiere a una radiación electromagnética que tiene una longitud de onda por encima de 780 nm a 1,5 μm . Además, la expresión "haz de luz" se refiere a una propagación de la luz en forma de al menos un rayo, en donde una dirección de propagación del al menos un rayo se denota en el presente documento, en general, mediante la expresión "trayectoria óptica", en donde la trayectoria óptica puede ser modificada por al menos un elemento óptico, seleccionado, en particular, de entre un espejo, un divisor de haz o un elemento de difracción, tal como una rejilla óptica. Como se ha indicado adicionalmente anteriormente, la expresión "frente de onda óptico" se refiere a una superficie que es perpendicular a la dirección de propagación del al menos un haz de luz.

En el presente documento, la fuente de luz puede seleccionarse, en general, de entre cualquier fuente monocromática conocida. Como se usa en general, el término "monocromático" se refiere a una única longitud de onda o a un ancho de banda pequeño de longitudes de onda seleccionadas de entre uno de los rangos espectrales indicados anteriormente. Para este fin, podría usarse, preferentemente, un diodo láser, en particular en virtud de su sencillez, disponibilidad fácil y gastos bajos. Como alternativa, también podría usarse, de forma ventajosa, una combinación de una fuente policromática y un filtro de ancho de banda sintonizable o fijo, o una combinación de una fuente de supercontinuo y un filtro de ancho de banda fijo o sintonizable, en donde el término "supercontinuo" se refiere a luz láser que tiene un ancho de banda pequeño que, después de una transición a través de un medio óptico no lineal, presenta un ancho de banda ampliado, del que puede seleccionarse un ancho de banda pequeño de longitudes de onda deseadas usando el filtro de ancho de banda sintonizable, permitiendo, por lo tanto, una alteración de los ángulos de difracción y de las eficiencias de los haces periféricos como se describe a continuación con más detalle.

Además, el dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario puede comprender, preferentemente, al menos un elemento óptico que se designa para guiar el al menos un haz de luz hacia el al menos un ojo del usuario y a una unidad de detección de frente de onda. En el presente documento, el al menos un elemento óptico puede ser o comprender, preferentemente, una combinación de al menos un sistema de retransmisión óptica como se describe a continuación con más detalle y un divisor de haz. Como se usa en general, la expresión "divisor de haz" se refiere a una clase particular de elemento óptico que se designa para dividir un haz de luz en al menos dos, preferentemente exactamente dos, haces de luz parciales. En el presente documento, el divisor de haz puede seleccionarse, en general, de entre cualquier divisor de haz conocido, en particular de entre una placa de vidrio con revestimiento dieléctrico, un espejo dicróico, un divisor de haz de película, una placa de divisor de haz o un divisor de haz de polarización, tal como un prisma de Wollaston o una rejilla de polarización. Sin embargo, también pueden ser factibles unas clases adicionales de divisores de haz. Para los fines de la presente invención, el divisor de haz puede colocarse en la al menos una trayectoria óptica de una forma en la que este puede dividir al menos un haz de luz como es proporcionado por la fuente de luz en al menos dos haces de luz parciales, en donde al menos un haz de luz parcial puede guiarse hacia el al menos un ojo del usuario y, después de ser reflejado por el al menos un ojo del usuario recibido desde el ojo del usuario, especialmente, guiarse hacia una unidad de detección de frente de onda como se describe a continuación con más detalle.

Conforme a la presente invención, el dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario comprende una unidad de detección de frente de onda. Como se usa en general, la expresión "unidad de detección de frente de onda" se refiere a un sensor óptico que se designa para medir las aberraciones de un frente de onda óptico, en donde el término se aplica, habitualmente, a un sensor óptico que no requiere interferencia con un haz de referencia que no tiene ninguna aberración. En el presente documento, la unidad de detección de frente de onda puede seleccionarse, preferentemente, de entre al menos uno de un sensor de frente de onda de Shack Hartmann, una cámara designada para medir al menos una función de dispersión de puntos de un frente de onda excéntrico, un aberrómetro de matriz de lentes circulares, un sensor de frente de onda piramidal, un sensor de frente de onda basado en elementos de fase, un aberrómetro de trazado de rayos. Sin embargo, también pueden ser factibles unas clases adicionales de unidades de detección de frente de onda.

Como se usa en general, la expresión "sensor de frente de onda de Shack Hartmann" se refiere a un tipo particular de

unidad de detección de frente de onda que comprende una matriz de lentes pequeñas individuales que se denotan, habitualmente, por el término "lentillas" y un detector óptico bidimensional, tal como una matriz de CCD, una matriz de CMOS o una matriz de cuatro celdas, en donde, tras la iluminación uniforme de las lentillas, un gradiente integrado del frente de onda óptico incidente a lo largo de la totalidad de cada lentilla es proporcional a un desplazamiento producido por cada lentilla individual. En otras palabras, una aberración de una fase del frente de onda óptico incidente puede aproximarse, por lo tanto, mediante un conjunto de inclinaciones locales correspondientes a las lentillas individuales, en donde las inclinaciones correspondientes a las lentillas también pueden denotarse mediante el término "excentricidades". Al muestrear el frente de onda óptico incidente en virtud de la matriz de las lentillas de esta forma, el frente de onda óptico incidente puede reconstruirse, por lo tanto, al menos parcialmente, preferentemente por completo, midiendo la excentricidad local de cada lentilla individual dentro de la matriz de lentillas.

De acuerdo con la presente invención, la aberración ocular del al menos un ojo del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico como se mide mediante la unidad de detección de frente de onda, preferentemente mediante el sensor de frente de onda de Shack Hartmann. En el presente documento, la aberración ocular del al menos un ojo del usuario puede determinarse, preferentemente, midiendo al menos uno de un desenfoque del al menos un ojo o una esfera equivalente a lo largo de todo un campo retiniano del al menos un ojo. Preferentemente, la aberración ocular puede medirse en la totalidad de al menos nueve puntos de luz como se generan en la superficie de la unidad de detección de frente de onda, preferentemente el sensor de frente de onda de Shack Hartmann, como se describe a continuación con más detalle. Como resultado, puede obtenerse, con el tiempo, un mapa de desenfoque ocular que representa la aberración ocular del campo retiniano en el al menos un ojo. Sin embargo, es incluso más preferente que el mapa de desenfoque ocular pueda comprender una interpolación de valores que se han generado para los al menos nueve puntos de luz a lo largo de todo el campo retiniano en los dos meridianos. Como se usa en general, el término "mapa" se refiere a una representación bidimensional de un objeto, de tal modo que la expresión "mapa de desenfoque ocular" se refiere a una representación bidimensional de valores locales de la aberración ocular a lo largo de todo el campo retiniano del al menos un ojo del usuario, en donde los dos ejes de la representación bidimensional son proporcionados por los dos meridianos.

De acuerdo en particular con la presente invención, el dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario comprende al menos un elemento de difracción. Como se usa en general, la expresión "elemento de difracción" se refiere a un elemento óptico designado para difractar un haz de luz incidente, con lo que se generan múltiples órdenes de difracción en el al menos un haz de luz. En particular, el al menos un elemento de difracción puede seleccionarse de entre al menos uno de una rejilla óptica, un holograma o un elemento de modulación de luz digital; sin embargo, también puede ser factible una clase adicional de elemento de difracción. Como se usa en general, la expresión "rejilla óptica" se refiere a un elemento óptico que tiene una estructura periódica que se designa para dividir y difractar un haz de luz incidente, con lo que se generan múltiples órdenes de difracción en el al menos un haz de luz. Como se usa en general adicionalmente, las expresiones "holograma" u "holograma de volumen" se refieren a un elemento óptico que tiene un patrón de interferencia que se registra sobre un medio físico. En particular, el holograma puede generarse por ordenador modelando y superponiendo al menos dos frentes de onda de forma digital, con lo que una imagen digital resultante se imprime, posteriormente, sobre el medio físico.

Como se usa adicionalmente en el presente documento, la expresión "elemento de modulación de luz digital" se refiere a un dispositivo óptico que tiene una pluralidad de elementos ópticos controlables individualmente, diseñados para modular un haz de luz incidente. Preferentemente, el elemento de modulación de luz digital puede seleccionarse de entre al menos uno de un modulador de luz espacial o una unidad de microespejo digital. Como se usan en general, las expresiones "modulador de luz espacial" o "SLM" se refieren a un dispositivo óptico configurado para imprimir un patrón de intensidad sobre un haz de luz incidente de forma electrónica y/u óptica. Como resultado, el modulador de luz espacial puede usarse, normalmente, para generar al menos una rejilla óptica. Además, las expresiones "dispositivo de microespejo digital" o "DMD" se refieren a un dispositivo óptico configurado para modular una imagen digital sobre un haz de luz. Para este fin, el dispositivo de microespejo digital tiene una disposición que comprende una pluralidad de microespejos inclinables dispuestos en una matriz, que tienen una longitud de borde en el rango de los micrómetros, siendo direccionable individualmente cada microespejo usando campos electrostáticos. De esta forma, un haz de luz incidente puede dividirse en píxeles individuales y, posteriormente, reflejarse píxel a píxel. Sin embargo, son factibles otros tipos de elementos de modulación de luz digital.

Como se usa en general adicionalmente, la expresión "múltiples órdenes de difracción" se refiere a una clase de división del haz de luz incidente en una pluralidad de haces de luz difractados, en donde cada haz de luz difractado pertenece a un orden de difracción particular seleccionado de entre un único cero-ésimo orden de difracción, uno de dos primeros órdenes de difracción, uno de dos segundos órdenes de difracción o uno de unos órdenes de difracción superiores, en donde una intensidad mensurable de un orden de difracción particular depende de una eficiencia de difracción individual de cada orden de difracción. En la práctica, los múltiples órdenes de difracción del haz de luz pueden comprender, habitualmente, solo el cero-ésimo orden de difracción y los primeros órdenes de difracción, complementados preferentemente por los segundos órdenes de difracción. Sin embargo, también pueden ser factibles unos haces de luz que pueden comprender, además, los terceros órdenes de difracción o los cuartos órdenes de difracción. Por lo tanto, conforme a la presente invención como se define en las reivindicaciones independientes, los múltiples órdenes de difracción al menos comprenden al menos el cero-ésimo orden de difracción y los dos primeros órdenes de difracción en cada meridiano, con lo que se generan al menos nueve puntos de luz, dependiendo de las

eficiencias de difracción individuales de los múltiples órdenes de difracción, preferentemente de nueve a veinticinco puntos de luz, a lo largo de toda la superficie de la unidad de detección de frente de onda en los dos meridianos.

Preferentemente, la rejilla óptica puede seleccionarse de entre al menos una de una rejilla óptica transmisiva o una rejilla óptica reflectante. En el presente documento, la rejilla óptica transmisiva puede ser ventajosa debido a que esta permite proporcionar más libertad en la colocación de la rejilla óptica en la al menos una trayectoria óptica. Además, la al menos una rejilla óptica puede seleccionarse, preferentemente, de entre al menos una de una rejilla de difracción o una rejilla de polarización. En contraposición a la expresión "rejilla de difracción" que se refiere a la rejilla óptica general como se ha descrito anteriormente, la expresión "rejilla de polarización" se refiere a un tipo particular de rejilla óptica que comprende un elemento de polarización no despolarizante que se designa para alterar un estado de polarización de la luz transmitida de forma periódica, con lo que se obtiene una difracción, dependiente de la polarización, de la luz transmitida. Para ser capaz de usar dos rejillas de polarización consecutivas, entre las dos rejillas de polarización consecutivas se coloca al menos un despolarizador o un polarizador lineal.

Para los fines de la presente invención, el al menos un elemento de difracción se coloca en la al menos una trayectoria óptica de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción deseados en el al menos un haz de luz se generan en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se separan espacialmente como puntos de luz individuales en el al menos un ojo, especialmente sobre la retina del al menos un ojo del usuario y en la superficie de la unidad de detección de frente de onda óptico. Como ya se ha definido anteriormente, el término "meridiano" se refiere a uno de dos planos perpendiculares de una lente que tiene un efecto astigmático que es paralelo a las dos líneas focales. Como se usa en general adicionalmente, la expresión "punto de luz" se refiere a la incidencia de un haz de luz sobre una superficie de una forma en la que se genera un área limitada espacialmente. Como consecuencia de esto, los múltiples órdenes de difracción del al menos un haz de luz pueden distinguirse fácilmente entre sí por la posición de su punto de luz correspondiente, específicamente por las lentillas individuales del sensor de frente de onda de Shack Hartmann. Para obtener detalles adicionales, puede hacerse referencia a la descripción de las realizaciones ilustrativas dadas a continuación.

Para minimizar, preferentemente para evitar por completo, la diafonía entre los puntos de luz en la superficie de la unidad de detección de frente de onda, en particular, entre los puntos de luz que corresponden a lentillas individuales en el sensor de frente de onda de Shack Hartmann, se prefiere ajustar parámetros de la unidad de detección de frente de onda, en particular, de las lentillas en el sensor de frente de onda de Shack Hartmann, como consecuencia. En general, un valor alto para una distancia focal f de la lentilla individual es ventajoso para muestrear excentricidades altas en virtud de la Ecuación (1), lo que indica un ángulo mensurable máximo

$$\theta_{\max} = \frac{\frac{d}{2}}{\frac{f}{2}}, \quad (1)$$

en donde d es un diámetro de la lentilla, ρ es un diámetro de un tamaño de punto limitado por difracción (disco de Airy), y f es la distancia focal de la lentilla. En el presente documento, los valores exactos para los parámetros dependen del propio sensor de frente de onda de Shack Hartmann, el detector óptico bidimensional correspondiente, tal como la matriz de CCD, la matriz de CMOS o la matriz de cuatro celdas, y las lentillas. Debido a que el sensor de frente de onda de Shack Hartmann puede adaptarse, en particular, para medir valores altos de las excentricidades, puede preferirse un sensor de frente de onda de Shack Hartmann que puede presentar un rango dinámico alto, lo que puede dar como resultado, sin embargo, una precisión inferior, en donde la precisión inferior puede compensarse hasta un cierto punto eligiendo un tamaño de píxel más pequeño del detector óptico. Para acceder a un ejemplo preferido de parámetros para el sensor de frente de onda de Shack Hartmann, puede hacerse referencia a la descripción de las realizaciones ilustrativas dadas a continuación.

En una realización particularmente preferida, el al menos un elemento de difracción, en particular la al menos una rejilla óptica, que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción deseados en el al menos un haz de luz en los dos meridianos puede comprender al menos un único elemento de difracción, en particular, al menos una única rejilla óptica, en donde el al menos un elemento de difracción, en particular la única rejilla óptica, proporciona una rejilla bidimensional que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción en los dos meridianos. Para este fin, la rejilla bidimensional del único elemento de difracción, en particular la única rejilla óptica, puede proporcionarse en forma de dos estructuras unidimensionales individuales que se solapan entre sí bajo un ángulo $\neq n \cdot 180^\circ$, en donde n es un número natural que incluye 0, preferentemente de forma ortogonal, con lo que puede obtenerse un patrón rectangular de haces, en donde una eficiencia de difracción de la rejilla bidimensional es igual a un producto de las dos eficiencias de difracción unidimensionales. Como se usa en el presente documento, el término "ortogonal" se refiere a un ángulo de $90^\circ \pm 45^\circ$, preferentemente de $90^\circ \pm 15^\circ$, más preferentemente de $90^\circ \pm 5^\circ$, en particular de $90^\circ \pm 1^\circ$, especialmente de $90^\circ \pm 0,1^\circ$. Sin embargo, además, también puede ser factible un ángulo adicional.

En una realización alternativa preferida, el al menos un elemento de difracción, en particular la al menos una rejilla óptica, que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción deseados en el al menos un haz de luz en los dos meridianos puede comprender al menos dos elementos de difracción individuales, en particular, al menos dos rejillas ópticas individuales, en donde cada elemento de difracción individual, en particular cada rejilla óptica individual, de nuevo, tiene una rejilla unidimensional que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción en un

meridiano, en donde los al menos dos elementos de difracción individuales, en particular las al menos dos rejillas ópticas individuales, pueden disponerse de una forma en la que los dos meridianos se disponen ortogonalmente uno con respecto a otro. Con respecto al término "ortogonal", puede hacerse referencia a la definición del mismo dada anteriormente.

En realización alternativa preferida adicional, el al menos un elemento de difracción, en particular la al menos una rejilla óptica, que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción deseados en el al menos un haz de luz en los dos meridianos puede comprender al menos un único elemento de difracción, en particular, al menos una única rejilla óptica, en donde la única rejilla óptica, sin embargo, proporciona una rejilla unidimensional que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción en un meridiano, en donde la única rejilla óptica se designa para ser rotada de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se proporcionan en los dos meridianos. Dependiendo del tipo de elemento de difracción, la única rejilla óptica puede rotarse alrededor de un eje de rotación de forma mecánica, electrónica u óptica. Para el fin de rotar mecánicamente la única rejilla óptica alrededor de un eje de rotación, puede usarse una unidad rotatoria conocida.

En una realización particular de la presente invención, el dispositivo puede comprender al menos dos elementos de difracción, en particular, al menos dos rejillas ópticas, en particular, al menos dos rejillas bidimensionales o al menos tres rejillas unidimensionales, específicamente para generar más de un frente de onda óptico en la unidad de detección de frente de onda, lo que puede usarse, de forma ventajosa, para un muestreo de valores relacionados con el campo retiniano del al menos un ojo del usuario.

En una realización preferida adicional de la presente invención, el al menos un elemento de difracción, en particular la al menos una rejilla óptica, puede colocarse en un plano de pupila de entrada. Como se usa en general, la expresión "pupila de entrada" se refiere a una imagen óptica de un diafragma de abertura físico, como se ve a través de la parte frontal de al menos una lente, mientras que el "plano de pupila de entrada" se refiere a un plano perpendicular a un eje óptico de la pupila de entrada. En esta realización particularmente preferida, el al menos un elemento óptico que se designa para guiar el al menos un haz de luz hacia el al menos un ojo del usuario y a la unidad de detección de frente de onda puede comprender, preferentemente, un sistema de retransmisión óptica que puede designarse, especialmente, para retransmitir el plano de pupila de entrada sobre una pupila del ojo del usuario. En el presente documento, la expresión "sistema de retransmisión óptica" se refiere a una combinación de al menos dos elementos ópticos que se designa para transferir un plano óptico a una oposición diferente. A modo de ejemplo, la información representada visualmente en el plano de pupila de entrada puede transferirse, por lo tanto, para representarse visualmente sobre la pupila del ojo del usuario. Preferentemente, el sistema óptico de retransmisión puede comprender un par montado fijo y coaxialmente de lentes telecéntricas gran angular, en donde al menos una de las lentes puede sustituirse por un elemento óptico diferente, tal como un espejo esférico. Más particularmente, el sistema de retransmisión óptica puede comprender un telescopio de retransmisión óptica, también denotado, en el presente documento, solo mediante el término "telescopio", en donde el telescopio puede tener

- al menos dos lentes ópticas individuales, o al menos un conjunto que comprende al menos dos lentes ópticas individuales; o
- al menos un espejo esférico, y
 - o al menos una lente óptica, o
 - o al menos un conjunto que comprende al menos dos lentes ópticas individuales; o
- al menos dos espejos esféricos.

Como una alternativa adicional, el sistema de retransmisión óptica que se designa para retransmitir el plano de pupila a la superficie de la unidad de detección de frente de onda puede comprender un elemento de axicón que puede colocarse, preferentemente, en un plano de imagen intermedio del telescopio. Como se usa en general, la expresión "elemento de axicón" se refiere a una lente óptica que tiene una superficie cónica, con lo que un haz de luz, en particular un haz de láser, puede transformarse en una distribución en forma de anillo. En consecuencia, el elemento de axicón desplaza lateralmente las pupilas correspondientes a los haces periféricos. Como resultado de esto, se generan al menos nueve áreas distintas en la superficie de la unidad de detección de frente de onda, en donde cada área distinta comprende un punto de luz individual que puede procesarse, por lo tanto, por separado sin tener múltiples puntos de luz por debajo de cada lentilla.

En una realización preferida, el divisor de haz puede colocarse de una forma en la que el mismo sistema de retransmisión óptica que se usa para retransmitir el plano de pupila de entrada sobre la pupila del ojo del usuario también se designa para retransmitir el plano de pupila de entrada a la superficie de la unidad de detección de frente de onda, conduciendo, por lo tanto, a un dispositivo particularmente sencillo y menos costoso. Como se usa en el presente documento, el término "mismo" se refiere a un único sistema de retransmisión óptica que se designa para usarse para al menos dos fines diferentes, específicamente los dos fines diferentes que se han indicado anteriormente. El uso del mismo sistema de retransmisión óptica para retransmitir el plano de pupila de entrada sobre la pupila del ojo del usuario y para retransmitir el plano de pupila de entrada a la superficie de la unidad de detección de frente de onda contrasta en particular con el documento US 2005/105044 A1, que divulga un primer sistema de retransmisión óptica designado para retransmitir el plano de pupila de entrada sobre un plano de pupila del al menos un ojo del usuario y un segundo sistema de retransmisión óptica separado designado para retransmitir el plano de pupila del al menos un ojo del usuario a un plano de superficie de la unidad de detección de frente de onda. Como alternativa, el

divisor de haz también puede colocarse cerca del ojo, fin para el cual el dispositivo comprende, sin embargo, un sistema de retransmisión óptica adicional que se designa para retransmitir el plano de pupila de entrada a la superficie de la unidad de detección de frente de onda.

En una realización preferida adicional, el dispositivo de acuerdo con la presente invención puede comprender, además, una trayectoria óptica adicional, en donde un objetivo de fijación para el al menos un ojo del usuario puede colocarse en la trayectoria óptica adicional, en donde el enfoque del objetivo de fijación puede ajustarse, preferentemente, usando al menos uno de una lente sintonizable, un modulador de fase o una lente de Badal. Como se usa en general, la expresión "lente de Badal" se refiere a un elemento óptico que comprende al menos una lente que se designa para representar visualmente un objetivo bajo el mismo tamaño angular. En esta realización preferida adicional, el mapa de desenfoque ocular puede determinarse durante una fase de acomodación del al menos un ojo del usuario. Como resultado, la determinación del mapa de desenfoque ocular puede realizarse preferentemente, por lo tanto, en tiempo real, lo que es ventajoso en comparación con el documento de X. Wei y L. Thibos, véase anteriormente, en donde se usa al menos un sistema de exploración que contribuye a un retardo de tiempo durante las mediciones.

Como alternativa o adicionalmente, son concebibles realizaciones adicionales del dispositivo de acuerdo con la presente invención.

En un aspecto adicional, la presente invención se refiere a un método para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, preferentemente, usando el dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario como se divulga en otra parte en el presente documento. En particular, el método puede usarse para determinar individualmente la aberración ocular de ambos ojos de un usuario de forma consecutiva. El método de acuerdo con la presente invención comprende las siguientes etapas a) y b), que se realizan, preferentemente, en un orden de la etapa b) y la etapa a), en donde, estas etapas pueden realizarse al menos parcialmente de forma simultánea. Adicionalmente, pueden realizarse adicionalmente etapas adicionales, tanto si se divulgan en el presente documento como si no. Las etapas del presente método son de la siguiente forma:

- a) medir al menos un frente de onda óptico comprendido por al menos un haz de luz, con lo que una aberración ocular del al menos un ojo del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico; y
- b) generar múltiples órdenes de difracción en el al menos un haz de luz en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se separan espacialmente sobre una unidad de detección de frente de onda y en el al menos un ojo del usuario.

En general, el método de acuerdo con la presente invención puede realizarse de una forma manual en la que un profesional capacitado del cuidado de los ojos puede realizar las etapas indicadas usando un dispositivo apropiado, preferentemente el dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario como se divulga en otra parte en el presente documento. Sin embargo, en una realización preferida, el método de acuerdo con la presente invención puede ser un método implementado por ordenador. Como se usa en general, la expresión "método implementado por ordenador" se refiere a un método que implica un aparato programable, específicamente un ordenador, una red informática o un medio legible que porta un programa informático, con lo que al menos una etapa del método, en particular la etapa d) se realiza usando al menos un programa informático. Para este fin, el código de programa informático puede proporcionarse en un medio de almacenamiento de datos o en un dispositivo separado tal como un medio de almacenamiento óptico, por ejemplo, en un disco compacto, directamente en un ordenador o en una unidad de procesamiento de datos, en particular un dispositivo de comunicación móvil, específicamente un teléfono inteligente o una tableta, o a través de una red, tal como una red corporativa o Internet. El presente método puede realizarse, por lo tanto, en una unidad programable que está configurada para este fin, tal como proporcionando un programa informático particular.

En el presente documento, puede proporcionarse al menos un haz de luz a lo largo de al menos una trayectoria óptica, preferentemente usando una fuente de luz como se ha descrito anteriormente o como se describe a continuación con más detalle.

Además, el al menos un haz de luz puede guiarse hacia el al menos un ojo del usuario y a una unidad de detección de frente de onda. Para este fin, el al menos un haz de luz puede dividirse, preferentemente, en al menos dos haces de luz parciales, especialmente usando un divisor de haz como se ha descrito anteriormente o como se describe a continuación con más detalle, en donde al menos un haz de luz parcial se guía al ojo del usuario y se recibe desde el ojo del usuario. Sin embargo, en realidad no es necesario usar un divisor de haz debido a que el dispositivo de acuerdo con la presente invención puede funcionar sin el mismo. A modo de ejemplo, el haz de luz puede entrar en el al menos un ojo del usuario según el eje o a un ángulo muy pequeño con respecto a un eje óptico, con la condición de que la unidad de detección de frente de onda no esté muestreando las aberraciones en el eje del ojo.

De acuerdo con la etapa a), se mide al menos un frente de onda óptico comprendido por el haz de luz proporcionado por el ojo del usuario, preferentemente usando una unidad de detección de frente de onda, preferentemente un sensor de frente de onda de Shack Hartmann, como se ha descrito anteriormente o como se describe a continuación con más detalle, en donde una aberración ocular del al menos un ojo del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico.

De acuerdo con la etapa b), se generan múltiples órdenes de difracción en el al menos un haz de luz en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se separan espacialmente sobre la unidad de detección de frente de onda, especialmente en una superficie de la unidad de detección de frente de onda, y en el al menos un ojo del usuario. Para este fin, puede usarse, preferentemente, el al menos un elemento de difracción, en particular la al menos una rejilla óptica, que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción en el al menos un haz de luz en dos meridianos como se ha descrito anteriormente o como se describe a continuación con más detalle.

En un aspecto adicional, la presente invención se refiere a un producto de programa informático que comprende instrucciones para hacer que el dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario de acuerdo con la presente invención ejecute las etapas del método para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario de acuerdo con la presente invención. Para este fin, un programa informático puede comprender instrucciones proporcionadas por medio de un código de programa informático que son capaces de realizar cualquiera o la totalidad de las etapas, en particular la etapa a), del método como se describe en otra parte en el presente documento y, por lo tanto, para establecer la determinación de la al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario cuando se implementa en un ordenador o una unidad de procesamiento de datos. En el presente documento, el código de programa informático puede proporcionarse en un medio de almacenamiento de datos o en un dispositivo separado tal como un medio de almacenamiento óptico, por ejemplo, en un disco compacto, directamente en un ordenador o en una unidad de procesamiento de datos, en particular un dispositivo de comunicación móvil, específicamente un teléfono inteligente o una tableta, o a través de una red, tal como una red corporativa o Internet.

En un aspecto adicional, la presente invención se refiere a un método para producir al menos una lente de gafas para el al menos un ojo del usuario, en donde la producción de la lente de gafas comprende procesar una lente en bruto, en donde el procesamiento de la lente en bruto se basa en instrucciones configuradas para compensar al menos una aberración ocular del al menos un ojo del usuario, en donde la determinación de la aberración ocular del al menos un ojo del usuario comprende las etapas del método para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario de acuerdo con la presente invención.

Para obtener más detalles con respecto al método para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, el producto de programa informático, o el método para producir al menos una lente de gafas para el al menos un ojo del usuario, puede hacerse referencia al dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario como se divulga en otra parte en el presente documento.

Cuando se determina la al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario, el dispositivo, el producto de programa informático y los métodos de acuerdo con la presente invención presentan diversas ventajas con respecto a la técnica anterior. En particular, el dispositivo y el método permiten generar un mapa de desenfoque ocular completo de al menos un ojo de un usuario en una evaluación de una sola vez usando un enfoque sencillo y fácil de usar, en particular sin requerir un profesional capacitado del cuidado de los ojos, tal como un optometrista o un oftalmólogo. En consecuencia, el dispositivo y el método proporcionan una herramienta potente para una evaluación eficiente de un desenfoque periférico del al menos un ojo del usuario, específicamente, para obtener un mapa de desenfoque ocular completo del al menos un ojo del usuario en una medición de una sola vez, especialmente, empleando una medición automatizada de las aberraciones oculares con respecto a diferentes excentricidades en dos meridianos que incorpora una aplicabilidad fácil y unas duraciones de prueba cortas. En el presente documento, se diseña una implementación del dispositivo, así como una incorporación del software para hacer que la herramienta sea aplicable incluso para personal o usuarios no capacitados.

En consecuencia, el dispositivo y el método proporcionan una herramienta de diagnóstico para evaluar la progresión de la miopía, especialmente para personalizar los tratamientos de control de la miopía para proporcionar lentes ópticas personalizadas, tales como gafas progresivas o lentes de contacto multifocales o, especialmente, lentes de gestión de la progresión de la miopía (MPM) para la gestión del desenfoque periférico o lentes con múltiples segmentos de lente con desenfoque incorporado (DIMS), basándose en una medición única y rápida del desenfoque periférico del al menos un ojo del usuario y/o en una supervisión continua de los cambios inducidos por la acomodación del al menos un ojo del usuario o un movimiento de al menos una lente que lleva puesta el usuario.

Breve descripción de las figuras

En la descripción posterior de realizaciones preferidas se divulgan, con más detalle, características y realizaciones opcionales adicionales de la presente invención, preferentemente en conjunto con las reivindicaciones dependientes. En las mismas, las características opcionales respectivas pueden implementarse de forma aislada, así como en cualquier combinación factible arbitraria, como observará el experto. Se destaca en el presente caso que el alcance de la invención no está restringido por las realizaciones preferidas.

En las figuras:

la figura 1 ilustra una realización preferida de un dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario de acuerdo con la presente invención;

la figura 2 ilustra una realización preferida adicional del dispositivo para determinar la al menos una aberración ocular del al menos un ojo del usuario de acuerdo con la presente invención;

5 la figura 3 ilustra una realización preferida adicional del dispositivo para determinar la al menos una aberración ocular del al menos un ojo del usuario de acuerdo con la presente invención;

la figura 4 ilustra una realización preferida adicional del dispositivo para determinar la al menos una aberración ocular del al menos un ojo del usuario de acuerdo con la presente invención;

10 la figura 5 ilustra un diagrama que indica una dispersión de energía a lo largo de la totalidad de diferentes órdenes de difracción;

15 la figura 6 ilustra un diagrama que indica una separación espacial de múltiples órdenes de difracción en el sensor de frente de onda de Shack Hartmann; y

la figura 7 ilustra una realización preferida de un método para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario de acuerdo con la presente invención.

20 Descripción detallada de las realizaciones

La figura 1 ilustra una realización preferida de un dispositivo 110 para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo 112 de un usuario, en donde el ojo 112 comprende una retina 114. En lo sucesivo, por razones de sencillez, las figuras y la descripción se refieren, sin embargo, solo a un ojo 112 del usuario. Como se ilustra esquemáticamente en la misma, el dispositivo 110 puede comprender una fuente de luz 116, preferentemente una fuente monocromática, lo más preferentemente un diodo láser, en particular, en virtud de su sencillez, disponibilidad fácil y gastos considerablemente bajos. Sin embargo, como ya se ha indicado anteriormente, también puede ser factible un tipo diferente de fuente de luz. En el presente documento, la luz comprende una radiación electromagnética preferentemente en al menos uno del rango espectral visible o el rango espectral de infrarrojo cercano, teniendo, por lo tanto, una longitud de onda de 380 nm a 1,5 μ m. Como consecuencia, la fuente de luz 116 se designa para generar un haz de luz 118, que se guía a lo largo de una trayectoria óptica 120. En el presente documento, el haz de luz 118 describe una propagación de la luz en forma de rayos, en donde la dirección de propagación de los rayos se denota, en general, como la trayectoria óptica 120. Además, una superficie que es perpendicular a la dirección de propagación de los rayos se denota como frente de onda óptico (no ilustrado en el presente caso).

Como se ilustra adicionalmente en la figura 1, el dispositivo 110 puede comprender además un divisor de haz 122, que puede seleccionarse de entre cualquier divisor de haz conocido, en particular de entre una placa de vidrio con revestimiento dieléctrico, un espejo dicróico, un divisor de haz de película, una placa de divisor de haz o un divisor de haz de polarización, tal como un prisma de Wollaston o una rejilla de polarización. Sin embargo, también puede ser factible un tipo diferente de divisor de haz. Como se ilustra esquemáticamente en la figura 1, el divisor de haz 122 puede colocarse, preferentemente, en la trayectoria óptica 120 de una forma en la que este puede dividir el haz de luz 118 como es proporcionado por la fuente de luz 116 en dos haces de luz parciales 124, 126. Como resultado de esto, un primer haz de luz parcial 124 se guía al ojo 112 del usuario y, después de ser reflejado por el ojo 112 del usuario recibido desde el ojo 112 del usuario, especialmente para guiarse a través de un segundo haz de luz parcial 126 hacia una unidad de detección de frente de onda 128. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente con más detalle, el dispositivo 110 puede comprender realizaciones adicionales que están desprovistas del divisor de haz 122.

Como se ilustra adicionalmente en la figura 1, el dispositivo 110 comprende además la unidad de detección de frente de onda 128, en particular, un sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130. Sin embargo, también puede ser factible una clase adicional de unidad de detección de frente de onda, en particular, una cámara designada para medir al menos una función de dispersión de puntos de un frente de onda excéntrico, un aberrómetro de matriz de lentes circulares, un sensor de frente de onda piramidal, un sensor de frente de onda basado en elementos de fase o un aberrómetro de trazado de rayos. En el presente documento, la unidad de detección de frente de onda 128, en particular, el sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130, se designa para medir aberraciones del frente de onda óptico sin requerir ninguna interferencia con un haz de referencia que no tiene ninguna aberración. En particular, el sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130 tiene una matriz de lentes individuales (no ilustradas en el presente caso), un detector óptico bidimensional, tal como una matriz de CCD, una matriz de CMOS o una matriz de cuatro celdas como se ilustra en la figura 6. Como consecuencia, la aberración ocular del ojo 112 del usuario se determina a partir del frente de onda óptico medido mediante la unidad de detección de frente de onda 128, en particular, el sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130.

Como se ilustra adicionalmente en la figura 1, el dispositivo 110 comprende además un elemento de difracción. En las realizaciones ilustrativas usadas en el presente documento, el elemento de difracción es una rejilla óptica 132; sin embargo, para los fines de la presente invención también puede ser factible usar, como alternativa o adicionalmente, un holograma, tal como un holograma de volumen, y/o un elemento de modulación de luz digital, tal como un modulador de luz espacial (SLM) o una unidad de microespejo digital (DMD).

En las realizaciones ilustrativas de las figuras 1, 2 y 4, la rejilla óptica es una rejilla óptica transmisiva 134, permitiendo de este modo que el haz de luz 118 recorra la rejilla óptica 132. Sin embargo, como se ilustra esquemáticamente en la figura 3, también puede ser factible una rejilla óptica reflectante 136. Como se ha descrito anteriormente, la rejilla óptica 132 puede seleccionarse, adicionalmente, de entre una rejilla de difracción o una rejilla de polarización. Como resultado de recorrer la rejilla óptica transmisiva 134 o, como alternativa, de ser reflejado por la rejilla óptica reflectante 136, en el haz de luz 118 se generan múltiples órdenes de difracción, como se ilustra esquemáticamente en las figuras 5 y 6. En el presente documento, la rejilla óptica 132 se coloca en la al menos una trayectoria óptica 118 de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción deseados en el haz de luz 118 se generan en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se separan espacialmente como puntos de luz individuales en el ojo 112, especialmente sobre la retina 114, del usuario y sobre la unidad de detección de frente de onda óptico como se ilustra adicionalmente en las figuras 5 y 6.

Como se ilustra adicionalmente en la figura 1, la rejilla óptica 132 que se designa para generar los múltiples órdenes de difracción deseados en el al menos un haz de luz 118 en los dos meridianos comprende dos rejillas ópticas individuales 138, 138', teniendo cada una de las mismas una rejilla unidimensional designada para generar los múltiples órdenes de difracción en un meridiano, en donde las dos rejillas ópticas individuales 138, 138' se disponen ortogonalmente una con respecto a otra para generar los múltiples órdenes de difracción deseados en el al menos un haz de luz 118 en los dos meridianos. Con respecto al término "ortogonal", puede hacerse referencia a la definición del mismo dada anteriormente. Como alternativa, también se podría usar una única rejilla óptica (no ilustrada en el presente caso), en donde la única rejilla óptica que tiene una rejilla unidimensional designada para generar los múltiples órdenes de difracción en un meridiano puede rotarse de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción se proporcionan en los dos meridianos. Como una alternativa adicional, la única rejilla óptica puede ser bidimensional, la cual se designa para generar los múltiples órdenes de difracción en los dos meridianos. Como se ilustra esquemáticamente en la figura 1, la rejilla óptica 132 puede colocarse, preferentemente, en un plano de pupila de entrada 140.

Como se ilustra adicionalmente en la figura 1, el dispositivo 110 puede comprender además al menos un elemento óptico que se designa para guiar el al menos un haz de luz 118 hacia el al menos un ojo 112 del usuario y a una unidad de detección de frente de onda 128. Para este fin, el al menos un elemento óptico puede comprender, preferentemente, un sistema de retransmisión óptica 142 que se designa, especialmente, para retransmitir el plano de pupila de entrada 140 sobre una pupila 144 del ojo 112 del usuario y, adicionalmente, el divisor de haz 122 que se designa, como se ha descrito anteriormente con más detalle, para guiar el haz de luz 118, en particular, el haz de luz parcial 126, sobre la unidad de detección de frente de onda 128.

Como se ilustra esquemáticamente en la figura 1, el sistema de retransmisión óptica 142 puede comprender, preferentemente, un telescopio 146 que tiene dos lentes telecéntricas gran angular 148, 148', que se muestran en la figura 1 como lentes únicas para fines de simplificación y que se designan para transferir información representada visualmente en el plano de pupila de entrada 140 para representarse visualmente sobre la pupila 144 del ojo 142 del usuario. Para una clase adicional de sistema de retransmisión óptica, puede hacerse referencia a la figura 2, así como a la descripción dada anteriormente.

Como se ilustra adicionalmente en la figura 1, el divisor de haz 122 puede colocarse de una forma en la que el mismo sistema de retransmisión óptica 142 que se usa para retransmitir el plano de pupila de entrada 140 sobre la pupila 144 del ojo 112 del usuario también se designa para retransmitir el plano de pupila de entrada 140 a una superficie 150 de la unidad de detección de frente de onda 128, con lo que puede obtenerse un dispositivo 110 particularmente sencillo y menos costoso. Una realización alternativa del mismo se ilustra esquemáticamente en la figura 3.

La figura 2 ilustra una realización preferida adicional del dispositivo 110 para determinar la al menos una aberración ocular del ojo 112 del usuario. La realización particular del dispositivo 110 como se ilustra esquemáticamente en la misma, difiere de la realización particular del dispositivo 110 como se representa visualmente en la figura 1 en que, además del telescopio 146 que constituye el sistema de retransmisión óptica 142, comprende un telescopio 152 adicional, que, además de una lente telecéntrica gran angular adicional 154, tiene un espejo esférico 156, un divisor de haz adicional 158 y un elemento de axicón 160 que se coloca en un plano de imagen intermedio del telescopio adicional 152. Como se ha descrito anteriormente, el elemento de axicón 160 tiene una superficie cónica, transformando con ello el haz de luz 118 en una distribución en forma de anillo. Como resultado de esto, el elemento de axicón 160 desplaza lateralmente las pupilas correspondientes a los haces periféricos. Como se ilustra esquemáticamente en las figuras 5 y 6, el elemento de axicón 160 generó áreas distintas en la superficie 150 de la unidad de detección de frente de onda 128, en donde cada área distinta comprende un punto de luz individual que puede procesarse, por lo tanto, por separado sin tener múltiples puntos de luz por debajo de cada lentilla.

Para obtener más detalles con respecto a la figura 2, puede hacerse referencia a la realización ilustrativa del dispositivo 110 como se ha descrito anteriormente con respecto a la figura 1.

La figura 3 ilustra una realización preferida adicional del dispositivo 110 para determinar la al menos una aberración ocular del ojo 112 del usuario. La realización particular del dispositivo 110 como se ilustra esquemáticamente en la

misma, difiere de la realización particular del dispositivo 110 como se representa visualmente en la figura 1 en que cada una de las dos rejillas ópticas individuales 138, 138' que tiene una rejilla unidimensional designada para generar los múltiples órdenes de difracción en un meridiano es, cada una, una rejilla óptica reflectante 136 que se coloca en una trayectoria óptica adicional individual 162, 162', requiriendo, por lo tanto, dos divisores de haz adicionales 164, 164'. En el presente documento, la primera rejilla óptica individual 138 puede colocarse, preferentemente, en el plano de pupila de entrada 140 como se ha descrito anteriormente con respecto a la figura 1. Múltiples órdenes de difracción en un meridiano se reflejan entonces desde la primera rejilla óptica individual 138. Un telescopio adicional 166, que comprende unas lentes telecéntricas gran angular adicionales 168, 168', retransmite en el presente caso el plano de pupila de entrada 140 sobre la segunda rejilla óptica individual 138', que se orienta ortogonalmente con respecto a la primera rejilla óptica individual 138. En una reflexión, cada haz de luz 118 como es proporcionado por la primera rejilla óptica individual 138 se separa de nuevo, dando como resultado múltiples órdenes de difracción en los dos meridianos.

Como se ilustra adicionalmente en la figura 3, el divisor de haz 122 también puede colocarse cerca del ojo 112 del usuario. En esta disposición, sin embargo, el dispositivo 110 comprende además un telescopio adicional 170 que tiene unas lentes telecéntricas gran angular adicionales 172, 172', en donde el telescopio adicional 170 se designa para retransmitir el plano de pupila de entrada 140 a la superficie 150 de la unidad de detección de frente de onda 128. En el presente documento, el telescopio adicional 170 que comprende las lentes telecéntricas gran angular telecéntricas gran angular adicionales 172, 172' retransmite entonces el plano de pupila de entrada 140 a la pupila 144 del ojo 112 del usuario, en donde todos los múltiples órdenes de difracción de la luz incidente del haz de luz 118 convergen en un punto singular. Como resultado, se generan unas fuentes puntuales a lo largo de toda la retina 114 del ojo 112 del usuario. El telescopio 146 que comprende las lentes telecéntricas gran angular 148, 148' conjuga el plano de pupila de entrada 140 con la superficie 150 de la unidad de detección de frente de onda 128, en donde se muestrean los frentes de ondas ópticas resultantes de cada excentricidad.

Para obtener más detalles con respecto a la figura 3, puede hacerse referencia a la realización ilustrativa del dispositivo 110 como se ha descrito anteriormente con respecto a la figura 1.

La figura 4 ilustra una realización preferida adicional del dispositivo 110 para determinar la al menos una aberración ocular del ojo 112 del usuario. En esta realización particular, el mapa de desenfoque ocular puede determinarse a partir del frente de onda óptico incluso durante una acomodación del ojo 112 del usuario. Como se ilustra esquemáticamente en la figura 4, el dispositivo 110 comprende, además, para este fin, unos divisores de haz adicionales 174, 174' que abren unas trayectorias ópticas adicionales 176, 176'. Como alternativa, el dispositivo 110 puede comprender además espejos dicróicos (no ilustrados en el presente caso), en donde los espejos dicróicos son espejos de paso largo, designándose, por lo tanto, para reflejar longitudes de onda más cortas. En particular, uno de los espejos dicróicos se designa para reflejar la porción más corta de las longitudes de onda, mientras que uno adicional de los espejos dicróicos se designa para reflejar una porción media de las longitudes de onda. Como resultado, la porción más larga de las longitudes de onda puede pasar a la unidad de detección de frente de onda 128.

En la realización ilustrativa de la figura 4, la primera trayectoria óptica adicional 176 comprende una lente sintonizable 178 para ajustar el enfoque de un objetivo de fijación 180, en donde la lente sintonizable 178 puede sustituirse por un modulador de fase o una lente de Badal. Además, la segunda trayectoria óptica adicional 176' comprende una cámara de pupila 182 que se designa para, simultáneamente, medir un movimiento de la pupila 144 del ojo 112 del usuario y controlar una posición de la pupila 144 del ojo 112 del usuario con respecto al objetivo de fijación 180 durante una acomodación. Como resultado de esto, la al menos una aberración ocular del ojo 112 del usuario puede determinarse de esta forma como una función de la acomodación del al menos un ojo 112 del usuario.

Para obtener más detalles con respecto a la figura 4, puede hacerse referencia a la realización ilustrativa del dispositivo 110 como se ha descrito anteriormente con respecto a la figura 1.

La figura 5 ilustra un diagrama que indica una dispersión de energía a lo largo de la totalidad de los múltiples órdenes de difracción 184, en donde una profundidad de modulación de fase de la rejilla de difracción sinusoidal 132 adopta valores de $0,4 \pi$. Como se ha descrito anteriormente, el orden de difracción 184 comprende al menos un único cero-ésimo orden de difracción, uno de dos primeros órdenes de difracción, uno de dos segundos órdenes de difracción o uno de unos órdenes de difracción superiores, en donde una intensidad mensurable del orden de difracción 184 depende de una eficiencia de difracción 186 individual de cada orden de difracción 184. El diagrama como se ilustra esquemáticamente en la figura 5, permite realizar una única medición foveal 188 y ocho mediciones periféricas 190 cuando se tienen en cuenta los primeros órdenes de difracción, o veinticinco mediciones periféricas 190 cuando, adicionalmente, se tienen en cuenta los segundos órdenes de difracción. En el presente documento, un aumento del valor de la profundidad de modulación de fase, normalmente, da como resultado que el balance de energía se desplace hacia órdenes de difracción más altos. Si la rejilla óptica 132 es una rejilla óptica sinusoidal, la eficiencia de difracción 186 de los múltiples órdenes de difracción 184 puede describirse usando funciones de Bessel relacionadas con los múltiples órdenes de difracción 184 correspondientes.

La figura 6 ilustra un diagrama que indica una separación espacial de los múltiples órdenes de difracción 184 en el sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130. Cuando los múltiples órdenes de difracción 184 dentro del haz de luz 118 se combinan en el plano de pupila de entrada 140, cada lentilla del sensor de frente de onda de Shack

Hartmann 130 puede producir múltiples puntos de luz 192 como se ilustra esquemáticamente en la figura 6. En el presente documento, el paso y la distancia focal de las lentes se seleccionan, preferentemente, para minimizar, preferentemente para evitar por completo, la diafonía entre los múltiples puntos de luz 192 en la superficie 150 del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130. En la figura 6, los puntos de luz 194, 194', 194" que corresponden al mismo orden de difracción 184 se separan de los otros órdenes de difracción 184 y se procesan individualmente. Además, una cuadrícula 196, como se ilustra en la misma, separa áreas del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130 por debajo de cada lente.

Basándose en la Ecuación 1 dada anteriormente, puede estimarse un ejemplo preferido de parámetros para el sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130. Usando un retransmisor óptico que tiene un aumento de 2,5 desde la superficie 150 del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130 hasta el plano de pupila de entrada 140, se obtienen dos meridianos que cubren un campo de $\pm 20^\circ$ en el plano de pupila de entrada 140 y de $\pm 8^\circ$ en la superficie 150 del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130. Teniendo en cuenta

- un paso de lente de 1 mm;
- una distancia focal de lente de 3 mm; y
- una longitud de onda de la luz de 850 nm que se usa para un cálculo de disco de Airy),

el sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130 podría ser capaz de medir un ángulo máximo de $9,53^\circ$. Los haces excéntricos corresponden a una inclinación de 8° . El rango dinámico del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130 podría corresponder, por lo tanto, a una inclinación de frente de onda máxima de $1,53^\circ$. Al seleccionar estos parámetros, no puede tener lugar ninguna diafonía entre las áreas de sensor por debajo de las lentes.

Adicionalmente, el rango dinámico del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130 puede mejorarse usando métodos de procesamiento avanzados, como es descrito, por ejemplo, por Lundström, I., y Unsbo, P. (2004), *Unwrapping Hartmann-Shack images from highly aberrated eyes using an iterative B-spline based extrapolation method*, *Optometry and Vision Science*, 81(5), 383-388.

La figura 7 ilustra esquemáticamente una realización preferida de un método 210 para determinar la al menos una aberración ocular del al menos un ojo 112 del usuario de acuerdo con la presente invención.

En una etapa de iluminación 212, puede proporcionarse el haz de luz 118 a lo largo de la trayectoria óptica 120, preferentemente usando la fuente de luz 116, en particular, el diodo láser.

En una etapa de difracción 214 de acuerdo con la etapa b), los múltiples órdenes de difracción 168 se generan en el haz de luz 118 en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción 168 se separan espacialmente en el ojo 112, especialmente sobre la retina 114, del usuario y sobre la unidad de detección de frente de onda 128.

En una etapa de guiado 216, el haz de luz 118 que comprende los múltiples órdenes de difracción 168 puede guiarse hacia el al menos un ojo 112 del usuario y a la unidad de detección de frente de onda 128. Para este fin, el haz de luz 118 puede dividirse en los dos haces de luz parciales 124, 126, en donde el primer haz de luz parcial 124 puede guiarse al ojo 112, especialmente a la retina 114, del usuario y recibirse desde el ojo 112 del usuario, especialmente para guiarse a través del segundo haz de luz parcial 126 hacia la unidad de detección de frente de onda 128, especialmente a la superficie 150 del sensor de frente de onda de Shack Hartmann 130.

En una etapa de medición 218 de acuerdo con la etapa a), se mide el frente de onda óptico comprendido por el haz de luz 118, especialmente por el segundo haz de luz parcial 126, preferentemente en tiempo real, con lo que se determina a partir del frente de onda óptico un mapa de desenfoque ocular 220 que representa la aberración ocular del campo retiniano en el ojo 112 del usuario, preferentemente en una medición de una sola vez del ojo 112 del usuario. En el presente documento, el mapa de desenfoque ocular 220 puede comprender, preferentemente, los valores relacionados con los múltiples puntos de luz 176 como se generan a lo largo de toda la unidad de detección de frente de onda 128 en los dos meridianos o, más preferentemente, valores interpolados entre los múltiples puntos de luz 176. Adicionalmente, puede usarse al menos un algoritmo, seleccionado preferentemente de entre aprendizaje automático o inteligencia artificial, para mejorar adicionalmente las mediciones.

Lista de símbolos de referencia

110	dispositivo para determinar al menos una aberración ocular de al menos un ojo de un usuario
112	ojo
114	retina
116	fuentes de luz
118	haz de luz
120	trayectoria óptica
122	divisor de haz

124	primer haz de luz parcial
126	segundo haz de luz parcial
128	unidad de detección de frente de onda
130	sensor de frente de onda de Shack Hartmann
132	rejilla óptica
134	rejilla óptica transmisiva
136	rejilla óptica reflectante
138, 138'	rejilla óptica individual
140	plano de pupila de entrada
142	sistema de retransmisión óptica
144	pupila
146	telescopio
148, 148'	lente telecéntrica gran angular
150	superficie
152	telescopio adicional
154	lente telecéntrica gran angular adicional
156	espejo esférico
158	divisor de haz adicional
160	elemento de axicón
162, 162'	trayectoria óptica adicional
164, 164'	divisor de haz adicional
166	telescopio adicional
168, 168'	lente telecéntrica gran angular adicional
170	telescopio adicional
170, 172'	lente telecéntrica gran angular adicional
174, 174'	divisor de haz adicional
176, 176'	trayectoria óptica adicional
178	lente sintonizable
180	objetivo de fijación de enfoque ajustable
182	cámara de pupila
184	orden de difracción
186	eficiencia de difracción
188	medición foveal
190	medición periférica
192	punto de luz
194, 194' ...	punto de luz
196	cuadrícula
210	método
212	etapa de iluminación
214	etapa de difracción
216	etapa de guiado
218	etapa de medición
220	mapa de desenfoque ocular

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo (110) para determinar una aberración ocular de al menos un ojo (112) de un usuario, comprendiendo el dispositivo (110):
 - 5 - una unidad de detección de frente de onda (128) designada para medir al menos un frente de onda óptico comprendido por al menos un haz de luz (118), en donde una aberración ocular del al menos un ojo (112) del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico;
 - al menos un elemento de difracción designado para generar múltiples órdenes de difracción (184) en el al menos un haz de luz (118) en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción (184) se separan
10 espacialmente sobre la unidad de detección de frente de onda (128) y en el al menos un ojo (112) del usuario en donde los múltiples órdenes de difracción (184) comprenden al menos un cero-ésimo orden de difracción (184) y al menos dos primeros órdenes de difracción (184) en cada meridiano, con lo que se generan al menos nueve puntos de luz (192) a lo largo de toda la unidad de detección de frente de onda (128) en los dos meridianos.
- 15 2. El dispositivo (110) de acuerdo con la reivindicación anterior, en donde el al menos un elemento de difracción se selecciona de entre al menos uno de
 - al menos un único elemento de difracción, en donde el único elemento de difracción proporciona una rejilla bidimensional designada para generar los múltiples órdenes de difracción (184) en los dos meridianos; o
 - 20 - al menos dos elementos de difracción individuales, en donde cada elemento de difracción individual proporciona una rejilla unidimensional designada para generar los múltiples órdenes de difracción (184) en un meridiano, en donde los al menos dos meridianos se disponen ortogonalmente uno con respecto a otro; o
 - al menos un único elemento de difracción, en donde el único elemento de difracción proporciona una rejilla unidimensional designada para generar los múltiples órdenes de difracción (184) en un meridiano, en donde el
25 único elemento de difracción se designa para ser rotado de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción (184) se proporcionan en los dos meridianos.
3. El dispositivo (110) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el al menos un elemento de difracción se selecciona de entre al menos uno de una rejilla óptica (132), un holograma o un elemento
30 de modulación de luz digital.
4. El dispositivo (110) de acuerdo con la reivindicación anterior, en donde la al menos una rejilla óptica (132) se selecciona de entre al menos una de una rejilla óptica transmisiva (134) o una rejilla óptica reflectante (136).
- 35 5. El dispositivo (110) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además al menos un elemento óptico designado para guiar el al menos un haz de luz (118) hacia el al menos un ojo (112) del usuario y a una unidad de detección de frente de onda (128).
6. El dispositivo (110) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el al menos un elemento óptico comprende al menos uno de
 - un divisor de haz (122) designado para dividir el al menos un haz de luz (118) en al menos dos haces de luz
40 parciales (124, 126), en donde al menos uno de los haces de luz parciales (124) se guía hacia el al menos un ojo (112) del usuario;
 - un sistema de retransmisión óptica (142) designado para retransmitir un plano de pupila de entrada (140) sobre el
45 plano de una pupila (144) del al menos un ojo (112) del usuario, en donde el al menos un elemento de difracción se coloca en el plano de pupila de entrada (140).
7. El dispositivo (110) de acuerdo con la reivindicación anterior, en donde el divisor de haz (122) se coloca
 - de una forma en la que el mismo sistema de retransmisión óptica (142) se designa para retransmitir el plano de
50 pupila de entrada (140) al plano de una superficie (150) de la unidad de detección de frente de onda (128); o
 - cerca del al menos un ojo (112) del usuario, en donde el dispositivo (110) comprende además un sistema de retransmisión óptica adicional (164) designado para retransmitir el plano de pupila de entrada (140) al plano de una superficie (150) de la unidad de detección de frente de onda (128).
- 55 8. El dispositivo (110) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la unidad de detección de frente de onda (128) se selecciona de entre al menos uno de un sensor de frente de onda de Shack Hartmann (130), una cámara designada para medir al menos una función de dispersión de puntos de un frente de onda excéntrico, un aberrómetro de matriz de lentes circulares, un sensor de frente de onda piramidal, un sensor de frente de onda basado en elementos de fase, un aberrómetro de trazado de rayos.
- 60 9. El dispositivo (110) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además al menos una trayectoria óptica adicional (176, 176'), en donde al menos uno de un objetivo de fijación (180) y una cámara de pupila (182) se coloca en la trayectoria óptica adicional (176, 176').
- 65 10. Un método (210) para determinar una aberración ocular de al menos un ojo (112) de un usuario, comprendiendo el método (210) las siguientes etapas:

- a) medir al menos un frente de onda óptico comprendido por al menos un haz de luz (118), con lo que una aberración ocular del al menos un ojo (112) del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico;
- b) generar múltiples órdenes de difracción (184) en el al menos un haz de luz (118) en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción (184) se separan espacialmente en el al menos un ojo (112) del usuario y sobre la unidad de detección de frente de onda (128)

en donde

los múltiples órdenes de difracción (184) comprenden al menos un cero-ésimo orden de difracción (184) y al menos dos primeros órdenes de difracción (184) en cada meridiano, con lo que se generan al menos nueve puntos de luz (192) a lo largo de toda la unidad de detección de frente de onda (128) en los dos meridianos.

11. El método (210) de acuerdo con la reivindicación anterior, en donde

- un único elemento de difracción que proporciona una rejilla bidimensional está generando los múltiples órdenes de difracción (184) en los dos meridianos; o
- al menos dos elementos de difracción individuales están generando los múltiples órdenes de difracción (184) en un meridiano, en donde los al menos dos meridianos individuales se disponen ortogonalmente uno con respecto a otro; o
- al menos un único elemento de difracción que proporciona una rejilla unidimensional está generando los múltiples órdenes de difracción (184) en un meridiano, y está siendo rotado de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción (184) se proporcionan en los dos meridianos.

12. El método (210) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones de método anteriores, en donde la aberración ocular del al menos un ojo (112) del usuario se determina midiendo al menos uno de un desenfoque del al menos un ojo (112) del usuario, o una esfera equivalente a lo largo de todo un campo retiniano del al menos un ojo (112) del usuario, con lo que se obtiene un mapa de desenfoque ocular (220) que representa la aberración ocular del campo retiniano en el al menos un ojo (112) del usuario.

13. El método (210) de acuerdo con la reivindicación anterior, en donde el mapa de desenfoque ocular (220) comprende valores relacionados con los al menos nueve puntos de luz (176) generados a lo largo de toda la unidad de detección de frente de onda (128) en los dos meridianos o valores interpolados entre los al menos nueve puntos de luz (176) generados a lo largo de toda la unidad de detección de frente de onda (128).

14. El método (210) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones de método anteriores, en donde al menos uno de un objetivo de fijación de enfoque ajustable (180) y una cámara de pupila (182) se coloca en al menos una trayectoria óptica adicional (176, 176'), en donde el mapa de desenfoque ocular (220) se mide durante una acomodación del al menos un ojo (112) del usuario al objetivo de fijación (180).

15. Un producto de programa informático que comprende instrucciones para hacer que el dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9 ejecute un método (210) para determinar una aberración ocular de al menos un ojo (112) de un usuario, comprendiendo el método (210) las siguientes etapas:

- a) medir al menos un frente de onda óptico comprendido por el al menos un haz de luz (118), con lo que una aberración ocular del al menos un ojo (112) del usuario se determina a partir del al menos un frente de onda óptico;
- b) generar múltiples órdenes de difracción (184) en el al menos un haz de luz (118) en dos meridianos de una forma en la que los múltiples órdenes de difracción (184) se separan espacialmente sobre una unidad de detección de frente de onda (128) y en el al menos un ojo (112) del usuario

en donde

los múltiples órdenes de difracción (184) comprenden al menos un cero-ésimo orden de difracción (184) y al menos dos primeros órdenes de difracción (184) en cada meridiano, con lo que se generan al menos nueve puntos de luz (192) a lo largo de toda la unidad de detección de frente de onda (128) en los dos meridianos.

16. Un método para producir al menos una lente de gafas para el al menos un ojo (112) del usuario, en donde la producción de la lente de gafas comprende procesar una lente en bruto, en donde el procesamiento de la lente en bruto se basa en instrucciones configuradas para compensar al menos una aberración ocular del al menos un ojo (112) del usuario, en donde la aberración ocular del al menos un ojo (112) se determina mediante el método (210) para determinar la aberración ocular del al menos un ojo (112) del usuario de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 10 a 14.

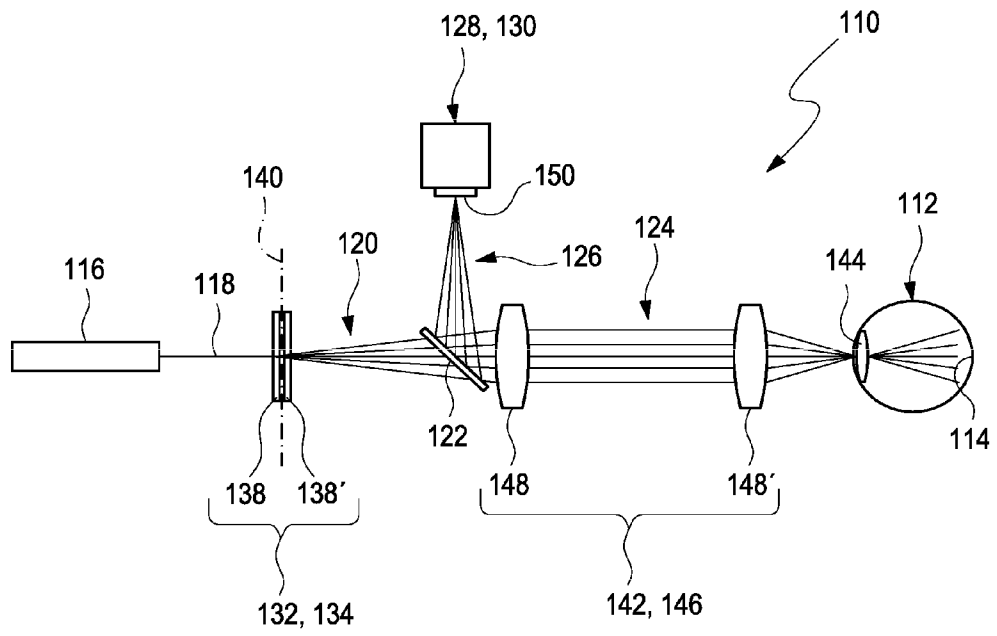


Fig. 1

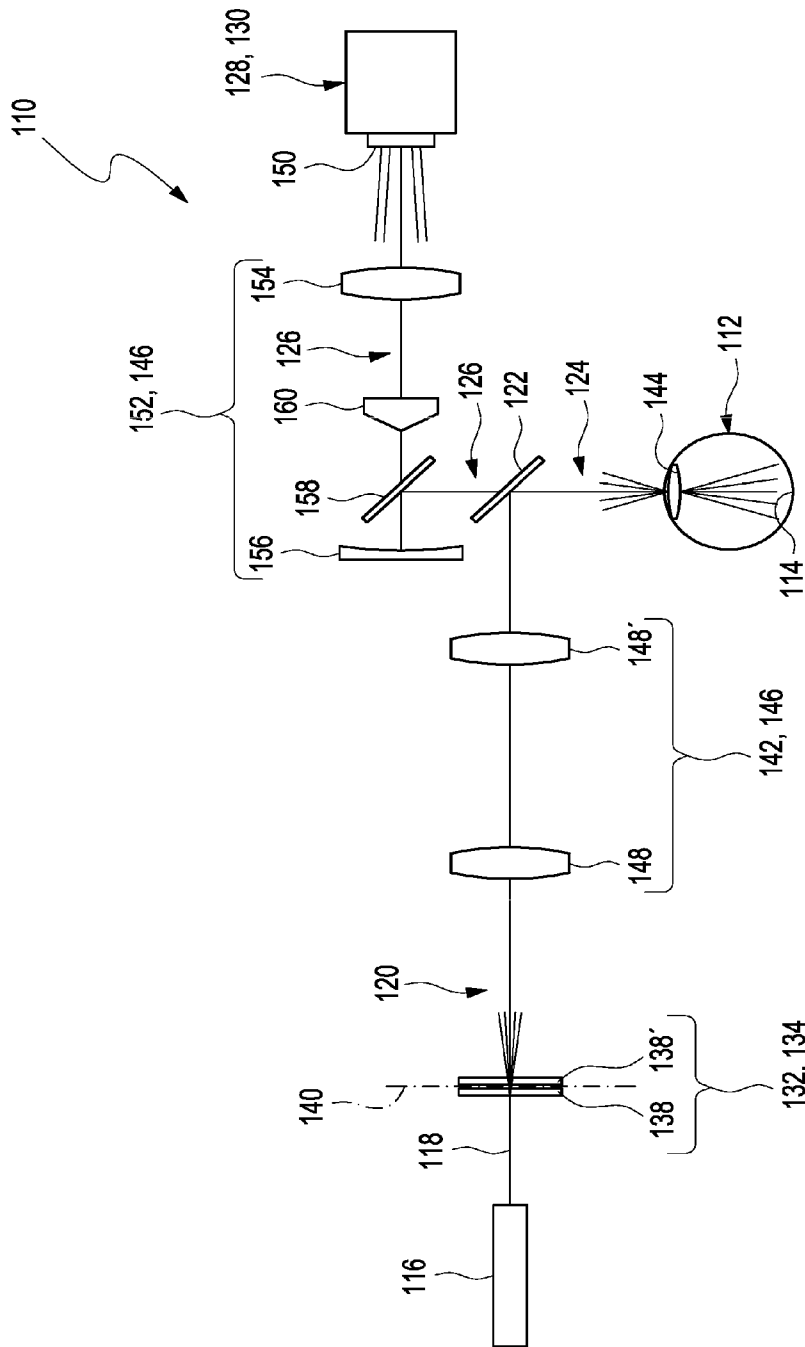


Fig. 2

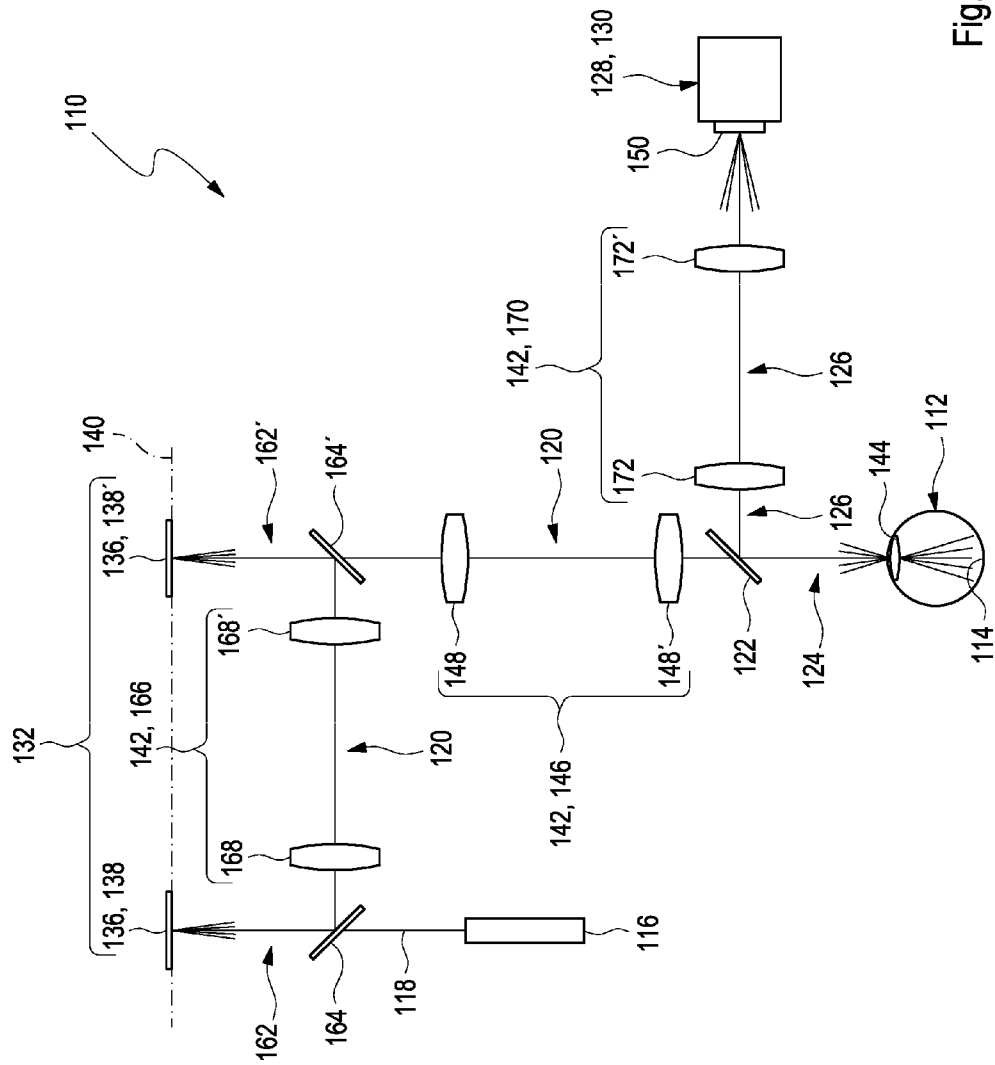


Fig. 3

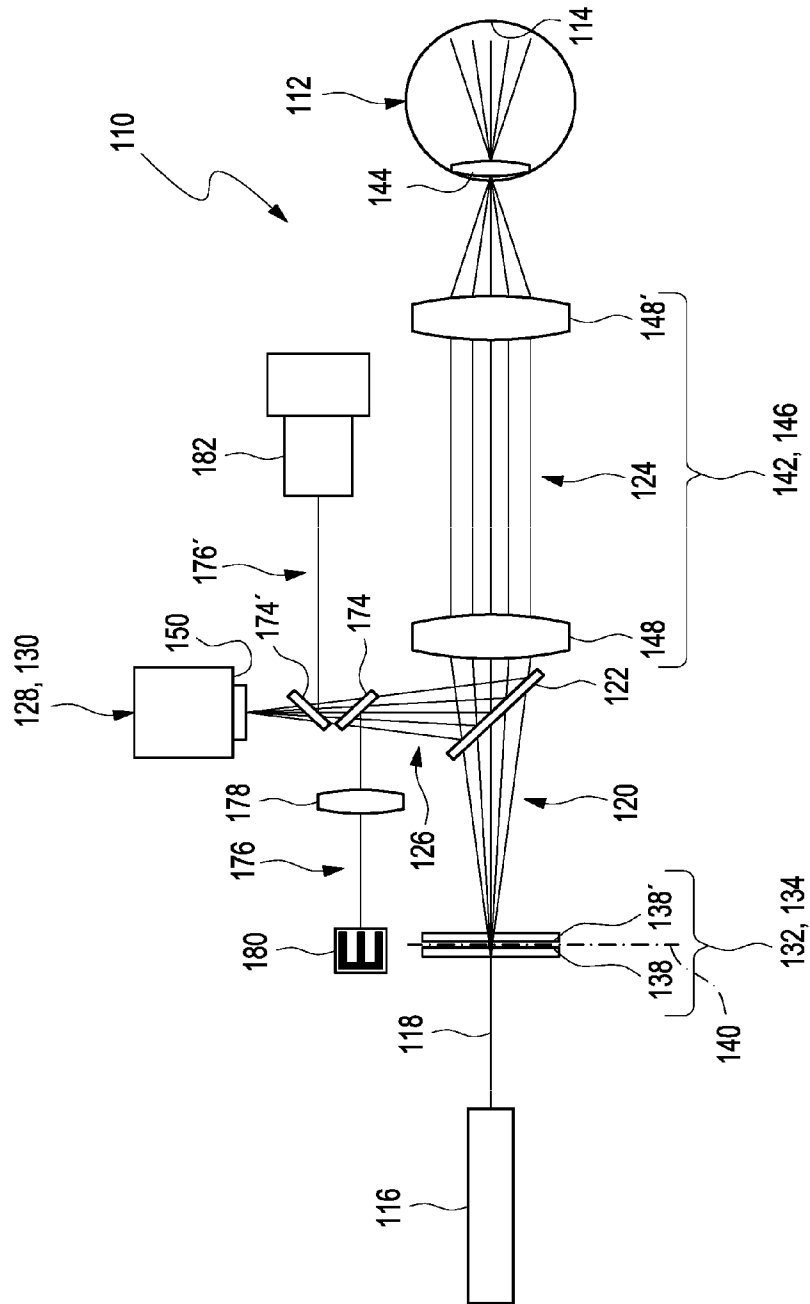


Fig. 4

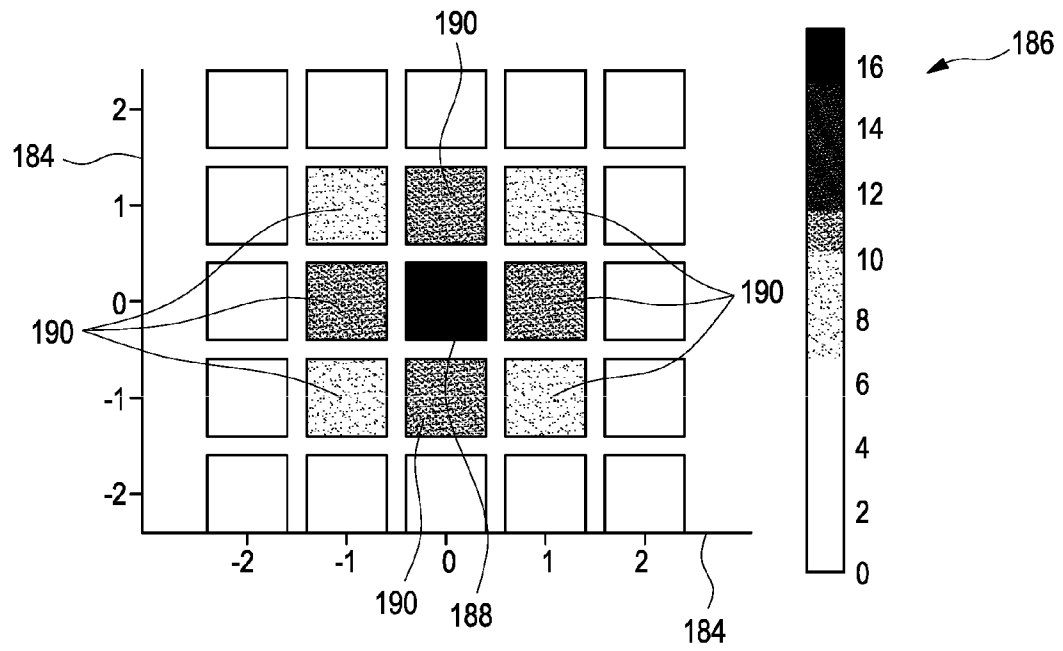


Fig. 5

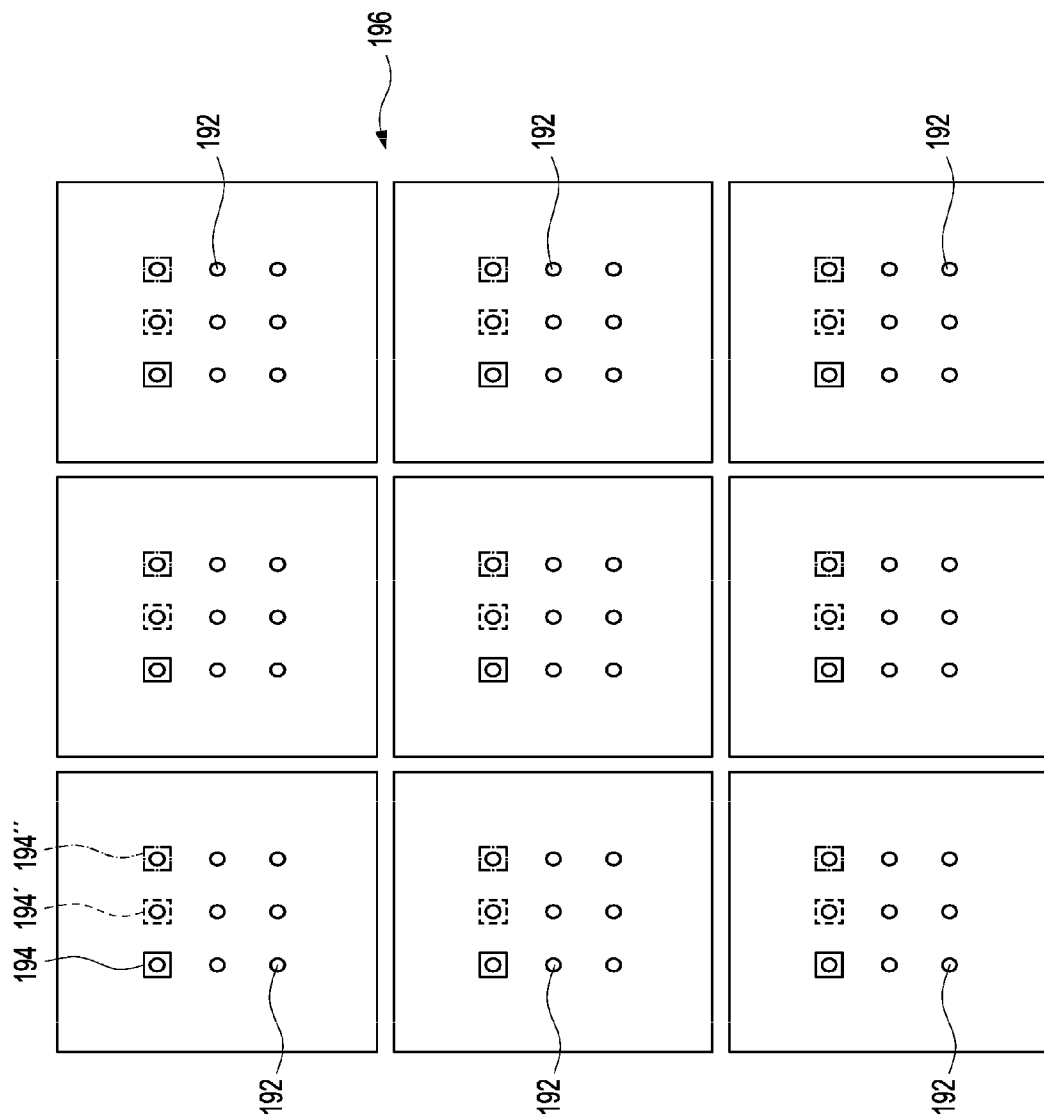


Fig. 6

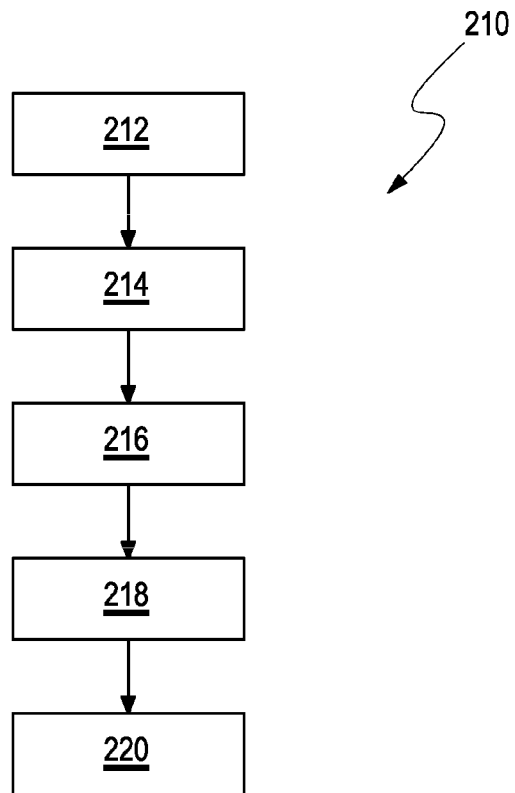


Fig. 7