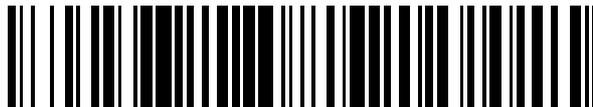


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 387 042**

51 Int. Cl.:  
**G01L 1/24** (2006.01)  
**G01L 11/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **07787245 .5**  
96 Fecha de presentación: **09.07.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2165170**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **24.03.2010**

54 Título: **Sensor de presión**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**12.09.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**12.09.2012**

73 Titular/es:  
**ABB RESEARCH LTD**  
**AFFOLTERNSTRASSE 44**  
**8050 ZÜRICH, CH**

72 Inventor/es:  
**KRAMER, Axel;**  
**BOHNERT, Klaus;**  
**BRÄNDLE, Hubert y**  
**KASSUBEK, Frank**

74 Agente/Representante:  
**Ungría López, Javier**

ES 2 387 042 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

Sensor de presión.

5 **Campo técnico**

El presente documento se refiere al campo de los elementos de detección de presión basados en cambios inducidos de presión en la birrefringencia de cuerpos transparentes, leídos por iluminación con una fuente de luz. Además, el presente documento se refiere a los métodos para el funcionamiento de tales elementos de detección de presión, así como a los usos de tales elementos de detección de presión.

**Antecedentes de la invención**

Hay una serie de posibilidades para medir la presión por medios ópticos: las tecnologías de enrejado de Fabry Perot y Fibre-Bragg, dispersión de Raman, dispersión de Brillouin, guías de onda integradas con membranas, osciladores mecánicos resonantes, acoplamiento del campo evanescente o cristales fotónicos. La tecnología descrita en lo sucesivo utiliza birrefringencia inducida por distribuciones no homogéneas de la tensión para la medición de la presión.

El método para utilizar la birrefringencia para la estimación de la distribución de la tensión se denomina "fotoelasticidad". Se ha desarrollado a principios del siglo pasado y por tanto, está bien establecido. Típicamente, las placas finas de vidrio o de plástico están expuestas a fuerzas externas y la distribución de la tensión dentro de las placas se puede determinar a partir del patrón de franjas creado por la luz polarizada transmitida con ayuda de un filtro de polarización perpendicular. Los detalles de este método se pueden encontrar, por ejemplo, en el libro de texto de Föppl y Mönch (L. Föppl, E. Mönch, Praktische Spannungsoptik, Springer, Berlín 1972).

El uso del efecto de la birrefringencia en fibras estructuradas con núcleo de fibra para medir la presión se ha sugerido a mediados de 1980. Estudios más detallados han seguido más de una década después. Especialmente, se han investigado la dependencia del efecto con respecto a la geometría y temperatura, la estabilidad con respecto a las influencias ambientales y el envejecimiento y configuraciones de detección.

En general, la sensibilidad a la temperatura de la birrefringencia inherente es al menos un orden de magnitud mayor que la de la birrefringencia dependiente de la presión, y por tanto no hay ventaja considerable en minimizar el componente de temperatura inherente o la contribución a la birrefringencia. Si dos longitudes de fibra se hacen idénticas y las fibras se hacen girar 90° una con respecto a la otra alrededor de su eje longitudinal en la unión o empalme, como se enseña por Dakin y Wade (J.P. Dakin y C. Wade. "Compensated polarimetric sensor using polarisation-maintaining fibre in a differential configuration", Electron. Lett., Vol. 20, No. 1, pág. 51-53, 1984), después, la birrefringencia inherente en las dos partes es idéntica, y si las dos partes están sujetas a las mismas condiciones de presión se cancela también la birrefringencia dependiente de la presión. Por tanto, si las dos piezas de núcleo de fibra con un revestimiento son idénticamente sensibles a la presión, sólo se obtendrá una señal útil si las dos piezas de fibra experimentan presiones diferentes. Este es el planteamiento enseñado en la técnica anterior, Dakin y Wade. Mediante este tipo de configuración, se puede minimizar la dependencia de la temperatura del cambio de fase inducido por presión medido.

Existe un enfoque alternativo en el que se puede obtener una señal útil cuando las dos piezas de fibra experimentan la misma presión desde el exterior. Si la birrefringencia dependiente de la presión no se hace igual en las dos partes y, sin embargo la birrefringencia inherente es la misma en las dos partes, la presión en las dos partes puede ser igual, es decir, las dos piezas de fibra pueden experimentar la misma presión, y sin embargo, la compensación de temperatura de la birrefringencia inherente sigue persistiendo. Esta es la base para el concepto que se ha descrito en el documento US 5.515.459, en el que la birrefringencia inducida por presión se hace diferente admitiendo presión externa selectivamente en sólo algunos de los orificios laterales formados en la fibra.

La invención parte del documento GB 2 419 401 A, en el que una fibra con un núcleo de guía de luz y un revestimiento se utiliza para la medición de presión diferencial, y en el que una única presión debe aplicarse al dispositivo en ambas partes de detección con el fin de permitir la medición diferencial total con la porción de polarización ópticamente acoplada en serie con las dos partes de detección.

El documento US 6.597.821 describe un sensor de láser de fibra para medir presiones diferenciales y velocidades de flujo. La cavidad de láser de fibra comprende, además de la fibra de amplificación de láser, dos segmentos de fibra de sensor asimétricos con dependencias de presión mutuamente opuestas de su birrefringencia. La asimetría giratoria permite que la presión isotrópica aplicada a cada segmento de fibra se convierta en una birrefringencia anisotrópica en el láser de fibra. La birrefringencia puede existir entre dos modos polarimétricos o entre dos modos espaciales y genera los cambios de fase dependientes de la presión diferencial y, por tanto, una frecuencia de latido en el láser de fibra. El láser de fibra se mantiene en un alojamiento de presión en una forma libre de tensiones.

El documento US 5.009.107 describe un sensor óptico de presión absoluta. El sensor tiene un cuerpo transparente

con conductos al vacío con orificios laterales asimétricos. La presión exterior isotrópica se transforma en tensión anisotrópica y, por lo tanto, en birrefringencia que es una función de la presión absoluta aplicada desde el exterior.

### Sumario de la invención

5 Por lo tanto, uno de los objetos de la presente invención es proporcionar un conjunto de sensores de presión en el que al menos algunas de las deficiencias de los conjuntos de acuerdo con el estado de la técnica se reduzcan, si no se eliminan. Específicamente un sensor de presión con al menos un elemento de detección de presión ópticamente transparente, los cambios inducidos por presión en las propiedades ópticas de birrefringencia que son leídos por  
10 iluminación con al menos un haz de luz, se puedan mejorar. El objetivo es tener un sensor de presión (diferencial) con una alta precisión y pocos errores que son, por ejemplo causados por efectos de la temperatura.

Este y otros objetos se consiguen por el sensor de presión con al menos un elemento óptico de detección, los cambios inducidos de presión en las propiedades birrefringentes de que se leen a cabo por la transmisión de al  
15 menos un haz de luz, comprenden al menos un cuerpo transparente de un solo material (es decir, que tiene un material uniforme en todo el cuerpo), en el que el cuerpo transparente consta preferiblemente de sólo un cuerpo transparente de un único material, cuerpo que está sometido a al menos dos presiones diferentes en al menos dos regiones distintas a través de al menos dos cámaras de presión, en el que el cuerpo transparente se transmite por un haz de luz paralelo o mínimamente divergente sin reflexión (interna) total o en las interfases de dicho cuerpo, de  
20 tal manera que la birrefringencia de un haz de luz transmitido depende de la diferencia de las presiones diferentes, o dicho de otra manera, de tal manera que el cambio de fase inducido por birrefringencia del haz de luz transmitido depende de la diferencia de las presiones aplicadas, o dicho aún más diferente: de tal manera que una birrefringencia inducida por la presión y el cambio de fase diferencial correspondiente entre los componentes de polarización lineales de este haz de luz dependen la diferencia de las presiones aplicadas.

25 Las fibras ópticas comunes como se utilizan en el estado de la técnica para estos fines siempre poseen secciones que están fabricadas de dos materiales diferentes, un núcleo de guía de luz y un revestimiento. En el núcleo de guía de luz, el haz de luz que se utiliza para la medición se "atrapa" en este núcleo por la reflexión total de la luz en las interfaces que bordean el núcleo de guía. De modo que, es por ejemplo la fibra en la revelación de Dakin y Wade (loc. Cit.), ya que lo contrario no podría enrollarse alrededor de un cilindro deformable tal como se sugiere allí. El núcleo de guía de luz y un revestimiento en los sistemas constituyen juntos, por tanto, el elemento de detección de presión y este elemento de detección de presión no está fabricado de un solo material, ya que el núcleo de guía de luz y el revestimiento nunca se hacen del mismo material. Estas regiones (núcleo y revestimiento) exhiben un comportamiento de expansión térmica diferente. Este hecho conduce a distribuciones de tensiones indeseadas tras  
30 el cambio de temperatura, lo que conduce a señales erróneas. Correspondientemente se ha encontrado que todos los sistemas de acuerdo con el estado de la técnica que utilizan una fibra convencional con un revestimiento no permiten mediciones de presión de alta precisión. Utilizar un sensor fabricado de un único material homogéneo, es decir, un sensor sin un núcleo de guía de luz como se propone en la presente invención, puede evitar inesperadamente y de forma altamente eficiente la interferencia de tales efectos inducidos por la temperatura.

40 En cuanto a la lectura de la señal, la señal de los sistemas descritos en la literatura se basa en el conteo de franjas. En contraste a esto, el sistema propuesto utiliza ventajosamente un intervalo de señal que está basado en un cambio de fase entre  $-\pi/2$  y  $\pi/2$ . Por lo tanto, se garantiza una relación monótona e inequívoca de la señal de presión. Por tanto, en contraste con los sistemas del estado de la técnica y de acuerdo con la presente invención no se utiliza ningún núcleo de guía de luz con un revestimiento, así que no hay sensor multi-componente en el que el núcleo central guíe la luz por reflexión total en las interfaces. Correspondientemente, por lo tanto, el haz de luz de acuerdo con la presente invención debe ser paralelo o mínimamente divergente tras entrar en el sensor. El haz de luz que entra y se transmite a través del sensor es, por tanto, un haz de luz paralelo o mínimamente divergente, que se polariza típicamente linealmente.

50 Preferiblemente, un sensor de presión de este tipo se utiliza para la medición de las diferencias de presión superiores a 500 mbar, y preferiblemente por encima de 0,5 bar hasta 15 bar.

55 De acuerdo con una primera realización de la invención, el cuerpo transparente se somete directamente a al menos dos presiones diferentes, por lo que la cámara de presión o el medio presente en la cámara de presión está inmediatamente adyacente al cuerpo transparente. Sin embargo, también es posible que el cuerpo transparente pueda comprender un recubrimiento o similar para aumentar, por ejemplo, la resistencia química o contra la sobrepresión del medio presente en la cámara de presión.

60 En una realización adicional de la presente invención, el cuerpo transparente es un cuerpo cilíndrico. El cuerpo cilíndrico tiene preferiblemente una sección transversal circular, sin embargo, puede tener también una sección transversal poligonal, por ejemplo, una sección transversal hexagonal, octogonal, etc. regular. Para la medición de la diferencia de presión el cuerpo cilíndrico transparente se somete a al menos dos presiones diferentes en al menos dos regiones distintas. El cuerpo cilíndrico se puede someter para este fin, a dos presiones diferentes en dos (o  
65 más) partes longitudinalmente posteriores, en el que al principio hay una primera parte en la que el cuerpo cilíndrico está (por lo general, circunferencialmente) expuesto a una primera presión y, a después a medida que viaja a lo

largo del eje longitudinal del cuerpo cilíndrico, hay una segunda parte en la que el cuerpo cilíndrico está (por lo general, circunferencialmente) expuesto a una segunda presión. Como alternativa, o además de eso, el cuerpo cilíndrico puede someterse a dos presiones diferentes en cuatro (o más) secciones de presión alternativas equiangulares a lo largo de toda (o parte) la longitud del cuerpo. En este último caso, el cuerpo cilíndrico está expuesto a la primera presión desde la parte superior e inferior, y a la segunda presión desde la izquierda y derecha en una forma totalmente simétrica, aplicándose estas presiones diferentes a lo largo de toda la longitud o esencialmente toda la longitud del cuerpo cilíndrico. Normalmente, la longitud total del cuerpo transparente es menos de 6 cm para las aplicaciones previstas en este documento, pero también puede ser mayor.

Para eliminar, en particular, la influencia de las tensiones térmicas en la birrefringencia puede ser ventajoso si el cuerpo transparente se estructura, en particular internamente (sin orificios internos ni similares), en una región en la que una pared de separación entre las cámaras de presión y/o en la que un alojamiento se fija o está en contacto con el cuerpo transparente.

En aras de la integridad, se señala que también es posible tener un cuerpo transparente que consta de dos mitades (estructuradas) que están espacialmente separadas.

Una realización adicional de la presente invención se caracteriza por que el cuerpo transparente es un cuerpo cilíndrico con dos partes de igual longitud. Preferiblemente, en este caso las dos partes comprenden una estructura interna esencialmente idéntica que conduce a una distribución asimétrica de la tensión en el cuerpo, dando a su vez lugar a los efectos deseados de birrefringencia dependientes de la presión. Esta estructura interna que proporciona esta distribución asimétrica de la tensión puede, por ejemplo, proporcionarse en forma de orificios o aberturas longitudinales, preferiblemente cilíndricas, que conducen a una distribución asimétrica de la tensión en el cuerpo. En cualquier caso, las dos partes se hacen girar  $90^\circ$  alrededor del eje principal del cuerpo cilíndrico una con respecto a la otra, de modo que se cancela la distribución de tensiones en las dos partes en lo que se refiere a la birrefringencia inducida aquí. Esto puede lograrse por que en cada parte, la estructura interna se proporciona como un par de orificios longitudinales, cuyos ejes están igualmente distanciados del eje principal del cuerpo cilíndrico y cuyos ejes están orientados en un mismo plano que incluye el eje principal del cuerpo cilíndrico. Por lo tanto, en esta configuración, en parte los dos orificios longitudinales están, por ejemplo, dispuestos en un plano horizontal que incluye el eje central principal del cuerpo cilíndrico, y en la otra parte, los dos orificios longitudinales están dispuestos en un plano vertical que incluye el eje central principal del cuerpo cilíndrico. A fin de proporcionar la simetría es necesario, los orificios de las dos partes tienen el mismo diámetro y están dispuestos igualmente distanciados del eje central principal del cuerpo cilíndrico.

De acuerdo con una realización preferida de esta configuración, el diámetro  $d$  del agujero cilíndrico está entre  $1/8$  y  $1/3$ , preferiblemente en el intervalo de  $1/4$  del diámetro  $D$  del cuerpo cilíndrico transparente, lo que conduce a un buen compromiso entre la tensión inducida por la presión y la resistencia a la sobrepresión. Normalmente, el cuerpo transparente tiene superficies terminales perpendiculares al eje principal, al menos en las regiones en las que se acopla el haz de luz en el cuerpo transparente. Las dos partes están dispuestas preferiblemente adyacentes entre sí en una junta a tope, pero también es posible tener una distancia entre ambas partes. Esta distancia puede cargarse con vidrio (por ejemplo, el mismo material que el cuerpo cilíndrico) o simplemente mantenerse vacía. La ventaja es que las tensiones ejercidas desde la carcasa exterior en un cuerpo de vidrio de este tipo son menos críticas, si este cuerpo no está estructurado en la región respectiva.

Una realización preferida adicional se caracteriza por que el haz de luz paralelo o mínimamente divergente viaja a lo largo del eje central longitudinal del cuerpo cilíndrico transparente con planos terminales orientados perpendicularmente al eje longitudinal central del cuerpo cilíndrico.

Preferiblemente, el cuerpo transparente se irradia a lo largo del eje central longitudinal desde un lado con un haz de luz y la luz transmitida que abandona el cuerpo transparente se detecta mediante dos detectores en el otro lado. Por otro lado, también es posible permitir que el haz de luz viaje a través del cuerpo transparente varias veces utilizando, por ejemplo, espejos para aumentar el efecto diferencial, sin embargo, la calibración se hace más difícil y debe tenerse cuidado para que la simetría necesaria para la cancelación de interferencias se pueda mantener para múltiples trayectorias de luz a través del cuerpo transparente. Preferiblemente, los detectores están midiendo la intensidad total integrada dentro de cierto intervalo espectral, pero también es posible medir sólo la intensidad dentro de una ventana espectral muy estrecha o medir realmente el propio espectro. Típicamente, los detectores son diodos detectores que se pueden conectar eléctrica o electrónicamente, de alguna manera, por ejemplo, utilizando un puente de Wheatstone, de tal manera que una señal de diferencia se emite y utiliza para la evaluación adicional de la señal diferencial.

Para facilitar la medición de las propiedades de la birrefringencia inducida por la presión aplicada, el haz de luz irradiado en el cuerpo transparente se puede polarizar linealmente. Sin embargo, hay que señalar, que la luz circularmente polarizada o elípticamente polarizada se puede utilizar también. Típicamente, la polarización se produce mediante el uso de un filtro de polarización, pero también es posible utilizar una fuente de luz polarizada, tal como por ejemplo, un láser semiconductor. El haz de luz que sale del cuerpo transparente se divide en sus dos componentes de polarización utilizando un divisor de haz de polarización con la misma orientación que el filtro de

polarización lineal para la detección por los dos detectores. Se prefiere tener un filtro de polarización lineal entre la fuente de luz y el cuerpo transparente orientado a  $\pm 45^\circ$  y tener un divisor de haz de polarización en el otro lado del cuerpo transparente orientado también a  $\pm 45^\circ$  entre el cuerpo transparente y los detectores. Dado que en tal configuración la dependencia de la presión o la señal diferencial medida se proporciona esencialmente por un coseno de la diferencia de presión, el signo de la diferencia de presión no es ambiguo. Por lo tanto, de acuerdo con otra realización de la presente invención, se propone disponer un elemento de cambio de fase adicional, preferiblemente una placa de cuarto de onda, en la trayectoria de la luz. Esta se puede disponer entre el filtro de polarización y el cuerpo transparente o entre el cuerpo transparente y el divisor de haz de polarización. Por lo tanto, de acuerdo con una realización preferida adicional de la presente invención, por detrás del cuerpo transparente se hace pasar el haz de luz a través de un elemento de cambio de fase óptica, preferiblemente a través de una placa de cuarto de onda.

De acuerdo con una realización adicional del sensor de presión de la presente invención, las dos presiones diferentes para la medición de la presión diferencial se aplican al cuerpo cilíndrico transparente por medio de dos cámaras de presión idénticas circunferenciales longitudinalmente espaciadas que se cargan preferiblemente con un líquido, incluso más preferido con aceite de silicona.

Normalmente, el cuerpo transparente es un cuerpo de vidrio, fabricado preferiblemente de sílice fundida.

En una realización adicional de la presente invención, se propone disponer el cuerpo transparente en una carcasa exterior, proporcionándose las cámaras de presión en el espacio interno entre la superficie exterior del cuerpo transparente y la superficie interior de la cubierta exterior. Esto permite lograr una alta resistencia a la sobre presión en la configuración. Preferiblemente, la cubierta exterior es un tubo cilíndrico en el que se monta coaxialmente el cuerpo cilíndrico transparente, y en el que las dos cámaras de presión están separados por una pared de separación que está dispuesta en el plano que separa las dos partes del cuerpo cilíndrico transparente, y en el que en la región de las superficies terminales de las paredes terminales del cuerpo cilíndrico se proporcionan para separar las cámaras de presión. Cualquiera de estas paredes terminales o en la pared cilíndrica de la carcasa, cada cámara de presión tiene una abertura de detección correspondiente para la comunicación con la región o unidad de detección de la presión real. En caso de cámaras de presión circunferencialmente distribuidas (realización de acuerdo con la Figura 5) también es posible una carcasa exterior cilíndrica, y en este caso las paredes de separación están orientadas radialmente y se proporcionan por o están dispuestas en dos planos que incluyen ambos el eje longitudinal central del cuerpo transparente y que están inclinados uno con respecto al otro en  $90^\circ$ .

De acuerdo con una realización adicional de la carcasa exterior se fabrica de acero. Preferiblemente, el acero se selecciona para tener una característica de expansión térmica esencialmente igual o al menos similar al cuerpo transparente, y preferiblemente el cuerpo transparente se fija dentro de la carcasa por soldadura fuerte. Como alternativa, una junta tórica flexible puede utilizarse para permitir diferencias de expansión térmica entre la carcasa y el cuerpo de vidrio sin grandes tensiones críticas en el cuerpo de vidrio que puedan afectar a la medición. Con el fin de tener una alta resistencia a la sobrepresión se propone proporcionar las cámaras de presión con bordes redondeados.

De acuerdo con otra realización de la presente invención, el haz de luz se proporciona por una fuente de luz, preferiblemente por un diodo emisor de luz, que está preferiblemente modulado en intensidad para una mayor sensibilidad de medición. Preferiblemente, antes de la transmisión a través del cuerpo transparente el haz de luz se hace pasar a través de un filtro de polarización.

Con el fin de reducir aún más la influencia de, por ejemplo, la temperatura en la medición, puede ser ventajoso que se proporcionen adicionalmente un sensor de medición de temperatura y/o un sensor de intensidad de luz para medir la intensidad de la fuente de luz, y que los datos de estos sensores se incluyan en la evaluación de la presión diferencial.

La presente invención se refiere además a un método para detectar una presión utilizando preferiblemente un sensor de presión como se ha descrito anteriormente. El método utiliza un sensor de presión con al menos un elemento de detección óptico, cuyos cambios inducidos por presión en las propiedades birrefringentes se leen mediante la transmisión del al menos un haz de luz. En este método, el sensor de presión comprende, preferiblemente consiste en, al menos uno, preferiblemente sólo un, cuerpo transparente de un solo material que se somete a al menos dos presiones diferentes en al menos dos regiones distintas a través de al menos dos cámaras de presión, en el que el cuerpo transparente se transmite por un haz de luz paralelo o mínimamente divergente sin reflexión total en dicho cuerpo de tal manera que la birrefringencia de un haz de luz transmitido depende de la diferencia de las diferentes presiones, y en el que la presión diferencial en las dos cámaras de presión se evalúa en base a la salida diferencial de estos detectores, en base a la suma o diferencia de salida de estos detectores, en base a la relación de la salida de estos detectores, o en base a una combinación de los mismos. Otras realizaciones de la presente invención se describen en las reivindicaciones dependientes.

## Breve descripción de las figuras

En los dibujos adjuntos, se muestran realizaciones preferidas y/o pruebas documentales que soportan la invención, en los que:

La Figura 1 muestra un boceto de un sensor de presión diferencial fabricado de dos cuerpos de vidrio estructurados;

La Figura 2 muestra en a) un boceto del estado de tensión no homogénea: la presión conduce a una fuerza normal constante (por área) en la superficie; los orificios protegen el centro de la presión horizontal; el estado de tensión (simplificado) en el centro está indicado por las flechas; un boceto de la amplitud de la luz (b) antes y después (c) de la transmisión a través de una varilla con una distribución de presión no homogénea;

La Figura 3 muestra la configuración del sensor investigado con dimensiones [m] indicas en el eje, en la que sólo una cuarta parte del sistema total se representa; a la izquierda, cerca del eje inferior, un orificio de la estructura se puede observar; arriba hay dos hendiduras correspondientes a las cámaras presurizadas; la parte interna (hasta el radio inferior de las hendiduras) se fabrica de sílice fundida, la parte exterior se compone de acero;

La Figura 4 muestra un dibujo de la configuración investigada con la definición de las dimensiones utilizadas; la fuente de luz y el detector no se muestran;

La Figura 5 muestra una configuración alternativa en una sección transversal esquemática; las paredes exteriores de las cámaras de presión no están dibujadas;

La Figura 6 muestra en (a) la configuración en un boceto de una sección transversal y de la presión aplicada en los bordes, (b) los componentes del tensor de tensión calculada; x e y son el eje horizontal y vertical en la Figura, z es el eje longitudinal del cuerpo de vidrio, (c) muestra la intensidad relativa resultante de la luz paralela que se propaga a través del cuerpo de vidrio; y

La Figura 7 muestra la resolución de presión (en Pa) como una función de la presión diferencial (Pa) para las condiciones de referencia, en la que la curva en forma de u (cuasi-parabólica) indica la resolución de presión calculada y las curvas lineares en forma de v indican un objetivo típico de  $10^{-5}$  de la presión diferencial para comparación.

### Descripción detallada de las realizaciones preferidas

En la presente descripción, el concepto de "efecto de birrefringencia en cuerpos de vidrio estructurados" se examina en detalle. La birrefringencia en un material hace que las dos polarizaciones ortogonales de la luz se propaguen con diferentes velocidades de fase, debido a los diferentes índices de refracción. El efecto de birrefringencia se observa cuando una tensión o presión unidireccional actúa sobre un material isotrópico. En el presente caso, un cuerpo de vidrio se debe estructurar de tal manera que transforme de forma muy eficaz una presión en una tensión uniaxial.

Con el fin de evaluar si este principio es adecuado para la detección de la presión en un entorno industrial, una configuración de sensor explícito se ha diseñado y se ha verificado su rendimiento. Un modelo de la física del sensor se describe en detalle. El sensor propuesto utiliza la birrefringencia inducida por presión de un cuerpo de vidrio estructurado. Una posible realización de un sensor de vidrio se muestra en la Figura 1. El sensor 18 se fabrica con una estructura cilíndrica 10 que consta de dos varillas de vidrio idénticas 11 y 12 que están coaxialmente fusionadas y giradas 90° una con respecto a la otra. La parte interior de la varilla de vidrio está estructurada con los orificios 19, 20 de tal manera que transforma de3 forma muy eficaz la presión en un estado de tensión no homogénea en el centro de la varilla (Figura 2 a)). Este estado de tensión no homogénea conlleva a birrefringencia, que puede medirse, de la luz que se propaga en el centro de la varilla. Se utiliza un sistema de coordenadas ortogonales, en el que z denota la dirección de propagación del haz y x e y denotan las direcciones transversales, es decir, la polarización de la luz está oscilando en el plano xy y, en particular, los componentes de polarización lineal x e y están oscilando a lo largo del eje x e y.

La birrefringencia es causada como sigue: debido a la tensión, la velocidad de la luz en el material se ve ligeramente alterada. La tensión diferente en la dirección x e y (Figura 2) conlleva a diferentes velocidades para la luz polarizada en estas direcciones. Por lo tanto, la luz que inicialmente está en la fase (Figura 2 b)) queda fuera de fase después de la transmisión (Figura 2 c)) a través de la varilla. El cambio de fase  $\delta_p$  está relacionado con el tiempo de transmisión en función de las velocidades. El cambio de fase  $\delta_p$  viene dado por

$$\delta_p = \frac{2\pi}{\lambda} K \int dx (\sigma_x - \sigma_y),$$

en el que  $\lambda$ , K, L,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , son la longitud de onda de la luz, la constante de tensión óptica, la longitud de la varilla y la tensión en las respectivas direcciones (transversales) x e y, respectivamente. El cambio de fase  $\delta_p$  se puede medir usando filtros de polarización cruzados antes y después del cuerpo de vidrio.

Para la medición de la presión diferencial, hay dos cámaras de presión 8 y 9 que están separadas por una junta 7 de

tal manera que las dos varillas 11, 12 con secciones transversales giradas en 90° encuentran la presión p1 y p2, respectivamente. La luz 2 de una fuente de luz 1 (por ejemplo, un LED) es linealmente polarizada (dirección de polarización 45° dentro del plano xy) por un filtro de polarización lo que conlleva a un haz de luz polarizada paralelo o mínimamente divergente 21 que se introduce en el cuerpo de vidrio 10. En el otro extremo, la luz emitida 22 se divide en dos polarizaciones ortogonales por un divisor de haz de polarización (PBS) 16 orientado a 45°, y está dirigido a los detectores 17 y 17', respectivamente. Los detectores proporcionan señales de intensidad I1 e I2. La señal final se calcula como

$$S = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) \sim \sin(c \delta_p),$$

en la que  $\delta_p$  es la diferencia de presión y c es una constante que depende de los detalles de la configuración.

El concepto utiliza el hecho de que la presión induce un cambio de fase diferencial ( $\delta_p$ ) entre las dos polarizaciones ortogonales, cambio fase que es proporcional a la presión aplicada en cada varilla de vidrio. Para  $p_1 = p_2$ , los cambios de fase mutuos  $\delta_{p1}$  y  $\delta_{p2}$  causados por las varillas de vidrio se cancelan, ya que  $\delta_{p1} = -\delta_{p2}$ , debido a que las varillas de vidrio 11, 12 se hacen girar 90°. Para  $p_1 \neq p_2$ , un cambio de fase que no se anula proporcional a la diferencia de presión se mantiene y conduce a una señal no nula en el detector, que es una medida de la diferencia de presión.

Modelo de sensor: Para la física del sensor, el modelado del cuerpo de vidrio y la birrefringencia es lo más importante. De acuerdo con la ecuación anterior, el cambio de fase debido a la birrefringencia se determina por el estado de tensión integrado a lo largo de la trayectoria de la luz. Hemos utilizado modelos de elementos finitos bi- y tridimensionales para calcular los estados de tensión en el cuerpo de vidrio. La teoría de elasticidad lineal estándar se ha utilizado. Las presiones aplicadas se incluyen a través de condiciones de contorno. Las tensiones máximas se han calculado en base a la sobrepresión máxima aplicable.

El estado de tensión es lineal en la presión aplicada, es decir, soluciones para presiones aplicadas arbitrarias se pueden encontrar mediante la superposición de (dos) soluciones básicas. Debido a la estructuración del cuerpo de vidrio, la solución tiene ciertas propiedades de simetría debido a que el cambio de fase debido a birrefringencia tiene un punto de asentamiento en el eje de simetría, que es la región de viaje destinada para la trayectoria de la luz. La configuración del sensor investigado con las dimensiones aproximadas [m] indicadas en el eje se proporciona en la Figura 3. Sólo una cuarta parte del sistema total se representa. A la izquierda, cerca del eje inferior, un orificio de la estructuración se puede observar. Por encima hay dos hendiduras correspondientes a las cámaras presurizadas. La parte interna (hasta el radio inferior de las hendiduras) se fabrica de sílice fundida, la parte exterior se compone de acero.

#### Especificación y Evaluación del sistema

Elemento de detección de la birrefringencia: El sensor de presión investigado se fabrica de un bloque de vidrio 10 de sílice fundida unido a una cubierta exterior 5 fabricada de acero. Las dos partes se unen, por ejemplo, por soldadura fuerte. Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 1; un dibujo más detallado del sistema con la definición de los parámetros que describen las dimensiones se proporciona en la Figura 4.

Esta configuración se ha elegido con el fin de cumplir los siguientes requisitos:

1. Sensibilidad a la presión: El tamaño, posición y longitud de los orificios dentro del cuerpo de vidrio determinan la magnitud del efecto de la medición. Una gran o pequeña distancia entre los orificios resulta en grandes tensiones en el centro del dispositivo y, por lo tanto, una mayor sensibilidad a la presión. Por otro lado, si las tensiones son demasiado grandes, el sistema no es estable con respecto a la sobrepresión. Por otra parte, las asimetrías geométricas se hacen cada vez más críticas. La posición y el tamaño de los orificios se han elegido así en nuestro caso principalmente con el fin de permitir una producción precisa y simétrica. La sensibilidad se determina principalmente entonces por la longitud del sensor. Hemos elegido una longitud total de aproximadamente 5,8 cm, que demuestra ser razonable para el tamaño de un elemento de detección de presión. Si altas sensibilidades son necesarias (por ejemplo, para intervalos de presión más pequeños), en lugar de aumentar el tamaño del sistema, se pueden utilizar espejos para, por ejemplo, duplicar la trayectoria de la luz. En nuestro diseño, se asume que el cambio de fase total en la región está entre  $\pm\pi/2$  con el fin de garantizar una relación no ambigua entre el cambio de fase y la presión aplicada. En principio, uno podría ir al extremo opuesto que tiene cambios de fase que son (grandes) múltiplos de  $\pi/2$  y contar el número de cero transiciones inducidas al cambiar la presión diferencial (conteo de franjas). Aparte de la complejidad mayor, un dispositivo de este tipo necesitaría más espacio en comparación con la configuración sugerida preferiblemente en el presente documento.

2. Protección de la estabilidad y sobrepresión: El sistema está diseñado para ser intrínsecamente seguro a la sobrepresión. Desafortunadamente, el vidrio (es decir, sílice fundida) es inestable con respecto a tensiones relativamente pequeñas (8 MPa) en las superficies. La compresión es acrítica. Por lo tanto, las

cámaras de presión no deben incluirse en el cuerpo de vidrio, puesto que la aplicación de presión conlleva generalmente a tensiones. Por esta razón, es aconsejable utilizar una carcasa exterior 5 fabricada de acero. El uso de un segundo material es principalmente desafortunado ya que los cambios de temperatura en los compuestos del material resultan en tensiones térmicas. En lugar de una conexión rígida por soldadura fuerte se prefiere y es posible una junta más flexible con una junta tórica. Las tensiones asimétricas pueden dar como resultado errores en la medición de la presión. En nuestro caso, la carcasa de acero sólo está conectada al cuerpo de vidrio en su posición media y en su posición final. A fin de no generar grandes picos de tensión indeseados, se sugiere redondear los bordes de la estructura, especialmente en el extremo interior de los orificios.

3. Simetría: El efecto de medición se basa en la asimetría de la distribución de tensiones en el centro del cuerpo de vidrio debido a los orificios. Es evidente que el sistema tiene que construirse tan simétrico como sea posible a fin de excluir otros efectos que podrían resultar en tensiones no homogéneas. Por lo tanto, se han elegido formas cilíndricas para el cuerpo de vidrio y para los orificios. En principio, el sensor se puede dividir en dos partes separadas en la posición media con algún espaciamiento entre las mismas, de manera que las tensiones en un lado no inducen tensiones en el otro lado. Entonces, incluso las dos partes se pueden separar espacialmente. Sin embargo, estas soluciones hacen que surjan problemas, puesto que se necesita una alineación muy simétrica de las dos partes. Por lo tanto, se prefiere utilizar una sola pieza de vidrio en la que la alineación se fija y no cambia debido a las condiciones ambientales.

4. Fácil de producir: El sistema tiene que ser fácilmente reproducible. Hemos elegido dimensiones adecuadas para este propósito. Las formas redondeadas y orificios circulares también son ventajosos.

Aquí sólo se desea mencionar una alternativa principal que es de interés similar al a las soluciones mencionadas hasta ahora. Esta configuración se representa en la Figura 5: El sensor consiste en una sola pieza con cámaras de presión 8, 9 dispuestas a lo largo del bloque cilíndrico de vidrio 10. No hay orificios presentes en el bloque. Se proporciona un cuerpo de vidrio 10 y las paredes de acero 25 de las cámaras de presión 8, 9. Las paredes exteriores de las cámaras de presión no están representadas. La capacidad de convertir la presión (diferencial) en una diferencia de tensión no homogénea se puede caracterizar por un factor de mejora adimensional dado por la relación de la presión (diferencial) y la diferencia de tensión. Este factor de mejora es del orden de la unidad para esta configuración alternativa (de manera similar a nuestro dispositivo con orificios laterales). En lugar de simetría entre las dos mitades en el dispositivo con orificios laterales, la simetría de las cámaras de presión a lo largo de la estructura es decisiva. La principal ventaja de este diseño es que la diferencia de tensión entre la dirección z e y es bastante constante cerca del centro y, por lo tanto, la alineación del haz de luz no es tan crítica como en el diseño actual.

La Tabla 1 muestra los valores experimentales que se utilizan también para los cálculos del modelo:

Tabla 1: Dimensiones y parámetros físicos que definen el sensor específico investigado.

	Dimensiones		
Longitud total	L	0,058	m
Diámetro del cuerpo de vidrio	D	0,03	m
Longitud de los orificios	$d_1$	0,025	m
Distancia entre los orificios	$2d_2$	0,008	m
Diámetro de los orificios	$d$	D/4	
Distancia centro-centro de los orificios	b	D/4	
Anchura de las cámaras de presión	h	0,0025	m
Espesor de la carcasa de acero	t	0,005	m
<b>Parámetros ópticos</b>			
Longitud de onda	$\lambda$	572	nm
Constante óptica de tensión	K	$3,4 \cdot 10^{-12}$	1/Pa
<b>Parámetros mecánicos</b>			
Módulo de elasticidad de Young (sílice fundida)	E	73,1	GPa
Número de Poisson (sílice fundida)	$\nu$	0,17	

La Figura 4 proporciona la definición de las dimensiones de nuestro diseño seleccionado; en la Tabla 1 se especifican los parámetros reales utilizados también en el cálculo. Como la carcasa exterior de acero no se utiliza en

los cálculos explícitos, los valores dados son solo estimaciones.

Iluminación y detección: Para la iluminación del sistema se utiliza un diodo emisor de luz estándar 1 (LED). Fuentes alternativas de luz con menor anchura espectral (láseres, diodos de superluminiscencia, etc.) son posibles. El uso de la luz LED es posible ya que en nuestro caso preferido sólo se consideran cambios de fase menores a  $\pi$ . Cualquier LED estándar se puede elegir para ese propósito. Hemos optado por un LED de Osram Semiconductors, de la serie LG con una longitud de onda máxima de 572 nm y una anchura espectral (ancho completo en la mitad del máximo) de 30 nm.

El circuito detector consta de dos fotodiodos y un amplificador diferencial. Una configuración de puente de Wheatstone se utiliza para el circuito de detección junto con un amplificador de transimpedancia.

Con el fin de reducir el consumo de energía del LED y para alcanzar una sensibilidad óptima de la señal, el LED se modula por un circuito oscilador. Hemos elegido una frecuencia de oscilación de 10 kHz y un ciclo de trabajo de 1:10.

#### Estimaciones de rendimiento

Intervalo de presión: Un sensor de presión se caracteriza por el límite de presión diferencial del intervalo superior. Este límite determina el intervalo de presión dentro del que el sensor funciona con la precisión requerida. Para el sensor especificado, se han evaluado cuáles son los límites de presión del intervalo superior que se pueden elegir para cumplir este requisito (véase Figura 7). El análisis muestra que el límite de presión del intervalo superior puede elegirse entre 0,68 bar y 10,2 bar. El intervalo de presión determinado para un dispositivo dado depende de la relación señal a ruido del detector y la sensibilidad del cambio de fase a la presión diferencial. Un dispositivo (más corto) más largo tiene una sensibilidad de presión mayor (menor) y se puede utilizar para la detección de presiones menores (mayores).

Otro criterio importante para un elemento de detección de presión es su protección con respecto a la sobrepresión. Para el sensor especificado, encontramos un límite de presión superior de 250 bar para la presión estática y de 92 bar para la presión diferencial, respectivamente. Estas cifras son estimaciones conservadoras y tienen cierto grado de incertidumbre o error. Los límites se causan por las tensiones en el cuerpo de vidrio cerca de los bordes y límites.

Errores: Hay dos tipos de errores pueden ser críticos para la configuración recomendada: errores debidos a las influencias ambientales y errores debido a la falta de simetría del dispositivo. La influencia principal desde el exterior está determinada por la temperatura. Debido a la temperatura, la longitud de onda máxima y la anchura espectral del LED cambian. Como el efecto medido depende de la longitud de onda (véase la ecuación anterior), se observa un cambio directo en la sensibilidad que es aproximadamente el 0,19% para un cambio de temperatura de 10K. Sin embargo, como el coeficiente óptico de la tensión  $K$  depende también de la longitud de onda, hay un cambio adicional en dirección contraria de aproximadamente - 0,05%. Finalmente, el coeficiente óptico de la tensión en sí depende de la temperatura por una cantidad del 0,13%. Tomando estos efectos juntos, tenemos un cambio en la sensibilidad de alrededor de 0,3% por 10K. A fin de lograr los pequeños errores requeridos y, en particular, una histéresis de temperatura menor que el 0,03%, es apropiado para corregir este error. Sin embargo, esto puede hacerse fácilmente, si la temperatura y/o la intensidad de la luz se miden adicionalmente.

La temperatura también puede dar lugar a tensiones térmicas, ya que se utilizan diferentes materiales (sílice fundida y acero). Puede ser importante elegir un acero con un coeficiente de expansión térmica bastante similar al del vidrio con el fin de mantener pequeñas tensiones. Sin embargo, para el dispositivo simétrico "ideal", las tensiones térmicas sólo conducen a distribuciones simétricas de tensiones que no contribuyen al efecto de medición. Por lo tanto, es decisivo para construir y producir el dispositivo tan simétrico como sea posible.

Esto se puede ver a partir de las estimaciones de los errores debidos a las asimetrías. Hemos analizado alrededor de unos cuantos casos representativos de los cambios en la geometría del vidrio o en la trayectoria de la luz. La falta de simetría conduce a dos efectos: (i) un cambio de sensibilidad con respecto a la presión diferencial (relativamente no crítica), (ii) un desfase de la señal que depende de la presión estática. Esta dependencia de señal de la presión estática es importante, ya que no se puede corregir fácilmente.

Una longitud diferente de los dos lados de presión (diferencia de longitud de 0,1 mm), conlleva por tanto a un desfase del 1,8% del límite de presión diferencial del intervalo superior en una presión estática de 10 bar. El desfase es proporcional a la presión estática aplicada. Un cambio en el diámetro del orificio es aún peor: 1% de variación de un solo orificio (de los cuatro orificios) arroja un desfase del 10% a una presión estática de 10 bar. Los errores debidos a las asimetrías del haz de luz son similares en magnitud.

Se puede concluir que los errores críticos debido a la simetría deberían evitarse mediante el uso de un dispositivo preciso y simétrico. El vidrio puede ser tratado con alta precisión (por ejemplo, para sistemas ópticos) y la simetría de un cuerpo o dispositivo de vidrio dado se puede probar fácilmente.

Información detallada

Las propiedades del vidrio (sílice fundida): La sílice fundida como material para el cuerpo transparente tiene varias ventajas: es barata, fácil de manipular y tiene, en principio, buena inercia contra las influencias externas químicas y físicas. El vidrio como material es bastante frágil y es inestable con respecto a la tensión en las superficies. Las tensiones conllevan a un crecimiento de grietas pequeñas y finalmente a la rotura de toda la estructura. La resistencia a la tracción de la sílice fundida es 48,3 MPa, pero debido a la propagación de las grietas, la resistencia real de un vidrio depende en gran medida de sus dimensiones y propiedades superficiales (por ejemplo, rugosidad). Schott recomienda limitar la resistencia a la tracción a 8 MPa para el vidrio óptico; de lo contrario se deben hacer cálculos detallados de las tensiones y estimaciones de riesgo y duración.

En nuestro sistema, si la estructura se carga con una presión desde el exterior, no se produce ninguna tensión sino sólo compresión del cuerpo de vidrio (es decir, las tensiones en principio tienen todas el mismo signo, negativo). En este caso, la resistencia a la tracción y la rotura del vidrio no es problemático. Sin embargo, pueden ocurrir tensiones de tracción en los límites entre ambas cámaras de presión que debe controlarse. La tensión de compresión máxima se establece para ser mayor que 1,1 GPa. Por encima de 3 GPa, comienza la reordenación de la estructura atómica en el vidrio y las densidades de vidrio. No está claro si similar al estrés tensional algún factor de seguridad se tiene que utilizar para que ninguna deformación plástica pueda ocurrir en lo absoluto. Al utilizar el mismo factor de seguridad para la tensión de tracción, encontramos una tensión máxima de 140 MPa correspondiente a 1400 bar.

En las mediciones con fibras ópticas de sílice, se han reportado inestabilidades del material a alta presión y temperaturas. Grupos OH de agua (o sustancias similares) se están difundiendo en el vidrio. Especialmente, esto conduce a tensiones que - en el caso de la fibra - cambian las tensiones utilizadas para medir la presión. Por lo tanto, para una operación a largo plazo de los sensores de fibra óptica el cuerpo de vidrio se debe revestir para evitar dichos procesos o se debe utilizar un medio de presión que no sea agresivo para la sílice. Además, se ha demostrado que el uso de aceite de sílicona que se ha procesado previamente para eliminar cualquier traza de humedad es suficiente para evitar el efecto de envejecimiento. Por lo tanto, con una selección adecuada del aceite usado en las cámaras 8, 9, el efecto de difusión no es relevante para el cuerpo de vidrio macroscópico utilizado en nuestro dispositivo.

Teoría de la birrefringencia inducida por tensión: La birrefringencia es una consecuencia de la anisotropía del tensor dieléctrico. Debido a las propiedades de simetría de este tensor, se puede diagonalizar en general y tres constantes para tres direcciones perpendiculares caracterizan el comportamiento dieléctrico. Si estas constantes no son iguales [es decir, uniaxial (para dos valores diferentes) o biaxial (tres valores diferentes)], la propagación de las ondas eléctricas muestra ciertas peculiaridades: para la misma dirección de propagación, existen diferentes ondas con diferente polarización lineal. Debido a las constantes dieléctricas diferentes, se propagan a velocidades diferentes.

Importante para la configuración actual es la dependencia de la intensidad de la señal I en el cambio de fase  $\delta$ , que puede mostrarse mediante:

$$I = (\vec{a}')^* \cdot \vec{a}'$$

$$= \cos^2(2\beta) \sin^2(\delta/2).$$

en la que el vector  $a'$  es el vector de luz final y  $\beta$  es el ángulo entre el eje principal "rápido" de la tensión y el eje x. Como era de esperar, la señal se anula por un cambio de fase cero  $\delta = 0$ , y es máxima para  $\delta = \pi$ .

Se han realizado cálculos bi- y tri-dimensionales; en dos dimensiones, se asume que se puede utilizar una aproximación de tensión plana. Para los cuerpos largos con una sección transversal constante (a lo largo de 3 ejes), las tensiones en esta dirección se pueden establecer en cero, simplificando de este modo el cálculo debido a la dimensión inferior. Para la luz monocromática, una primera estimación de la magnitud del efecto es la siguiente:

Se han considerado tres casos diferentes de secciones transversales del cuerpo de vidrio y la distribución de la presión. Los siguientes supuestos para las constantes materiales necesarios se hacen:

longitud de onda de la luz:	550 nm
longitud de cuerpo de vidrio:	0,2 m
presión	$10^5$ Pa
constante K	$2,0 \cdot 10^{-12}/\text{Pa}$ .

Es fácil convertir los resultados a otras presiones, longitudes de muestras, etc.

En el caso más simple descrito aquí, la presión se aplica sobre la parte exterior del cuerpo que se estructura con dos orificios. La presión en los orificios se supone que es cero. La situación se esquematiza en la Figura 6b, junto con la distribución de la tensión calculada. Las mayores tensiones se producen cerca de los límites de los orificios en la estructura; en el centro del cuerpo también hay una distribución no homogénea de la tensión debido a la alineación horizontal de los orificios: existen tensiones de -0,52 Pa en xx ( $\sigma_{xx} = -0,52$  Pa), -2,65 Pa en yy ( $\sigma_{yy} = -2,65$  Pa), cero en xy ( $\sigma_{xy} = 0$  Pa), y -0,54 en la dirección zz ( $\sigma_{zz} = -0,54$  Pa) en este punto.

A partir de los datos, se puede calcular la intensidad de un haz de luz que se propaga a través del cuerpo de vidrio a lo largo de la dirección z. Suponemos que el haz se prepara y filtra como se ha descrito anteriormente. La intensidad como una función de coordenadas xy elegidas se muestra en la Figura 6 c). En los puntos con grandes tensiones no homogéneas, la señal cambia notablemente (tenga en cuenta que una señal de cero que se espera cuando no se aplica presión). En el medio, existe una señal de aproximadamente el 20% de la amplitud máxima de luz posible. Los cambios en este orden de magnitud se pueden medir fácilmente por los detectores ópticos. Para un sensor de presión diferencial, se podrían combinar secciones con presión p1 aplicada desde el exterior y secciones con presión p2 aplicada desde el exterior.

La configuración experimental del sensor propuesto se muestra en la Figura 1. Luz de un LED 1 se utiliza para vigilar el cambio de fase inducido por la presión. Antes de entrar en el dispositivo la luz del LED se polariza por medio de un filtro de polarización 3 orientado en 45° de tal manera que dos modos de polarización lineales ortogonales se introducen en el cuerpo de vidrio 10 modos que están oscilando en la dirección x e y, respectivamente. Se debe prestar especial atención para garantizar que la dirección del haz sea paralela al eje de la varilla de vidrio. La luz del LED sólo debe propagarse en la región entre los orificios de aire cerca del eje del dispositivo, es decir, la divergencia del haz de LED debe ser menor que  $\phi < \arctan((2b-d)/L)$ . Esta condición define bajos haces divergentes para el sistema en consideración. Para fuentes con mayor divergencia del haz o para sensores de mayor longitud una colimación del haz de luz de LED con una lente adicional es aconsejable.

La luz 22 que emerge de la cara extrema 27 del sensor lleva la señal deseada, es decir, el cambio de fase acumulado entre los dos modos de polarización. En el caso general, la luz saliente 22 tiene caracterizarse por la fase entre las diferentes direcciones principales. Una placa  $\lambda/4$  se utiliza para añadir un desfase adicional de  $\pi/2$  entre las dos direcciones de polarización. Esto permite detectar la señal de la presión diferencial aplicada: la señal total es proporcional al seno de la presión y no el coseno. Un divisor de haz de polarización exitoso 16 divide la luz en los dos modos 23 y 24 orientados a 45° con respecto al eje x e y (es decir,  $\pm 45^\circ$  con respecto al eje x) y los dirige a los detectores separados 17, 17'. La presión diferencial se mide tomando la diferencia de las dos señales en el detector 17 y 17', y esta diferencia está además dividida entre la suma, con el fin de compensar las fluctuaciones de la salida óptica del LED o variar las pérdidas de luz que ocurren en el trayectoria de luz.

Los detalles de la iluminación y la detección de la luz (por ejemplo, elección de componentes): La fuente de luz puede ser un LED estándar. Se elige principalmente de acuerdo con su perfil de haz: una divergencia de haz más bien pequeña es necesaria como se ha descrito anteriormente. La longitud de onda del LED no es importante para nuestra aplicación y se puede elegir libremente. Generalmente, una pequeña anchura espectral y un pequeño coeficiente de temperatura son favorables. Para la configuración, se ha optado por un LED de la serie LG de Osram con una longitud de onda máxima de 572 nm.

Para reducir el consumo de energía del LED y para lograr la detección óptima de la señal, el LED se modula por un circuito oscilador. Se utiliza una frecuencia de oscilación de 10 kHz con un ciclo de trabajo de 1:10 (funcionamiento actual: 10mA a 3V). Esto conduce a una potencia media de 3 mW. Esto está de acuerdo con el uso de una fuente de alimentación de cable doble de 4-20 mA para el dispositivo según se requiera.

Una configuración del circuito detector incluye una configuración de puente de Wheatstone para los fotodiodos que permite una medición exacta de la diferencia de las intensidades de luz. Por lo tanto, una relación de señal-ruido de  $1,2 \cdot 10^5$  se consigue. Se utilizan fotodiodos Hamamatsu S6865-02 y un amplificador BurrBrown OPA124. Otros parámetros son: frecuencia de modulación LED 10 kHz, anchura de banda de medición 1 kHz, fotocorriente 10  $\mu$ A, resistencia de retroalimentación 5 k  $\Omega$ .

Consideraciones de diseño: nuestra configuración actual y sus dimensiones se representan en la Figura 2 y en la Figura 3. Esta geometría se ha elegido por las siguientes razones:

i) Protección contra sobrepresión: Como se ha indicado anteriormente, los orificios a presión en el cuerpo de vidrio son críticos para la ruptura del sensor. Por lo tanto, los orificios utilizados para la estructuración vertical y/u horizontal del cuerpo de vidrio están conectados a la presión ambiente. La presión en las cámaras de presión dará lugar a la compresión sólo del cuerpo de vidrio, y no a las tensiones. Las tensiones se producen únicamente en la parte de acero.

ii) Magnitud del efecto de medición: Al seleccionar de tamaño de los orificios y su distancia al centro del cuerpo de vidrio, se puede cambiar la sensibilidad del sistema a la presión: Las tensiones en el centro están

conectadas a la presión aplicada por un factor de mejora que depende de la geometría. Es peligroso elegir este factor demasiado grande: en este caso, pueden aparecer grandes tensiones y los pequeños errores en la geometría podría conducir a grandes errores. Se han elegido dimensiones que conducen a un factor de mejora de 2-3 para el tubo de longitud infinita, los factores eficaces para el dispositivo real son menores debido a la transición entre las diferentes regiones (véase más adelante).

iii) Dimensiones totales: Teniendo en cuenta la sección cilíndrica infinita de un sensor, el sistema se puede hacer a escala en las dimensiones transversales y cualquier radio exterior se puede elegir. Para el dispositivo real, esta escala no es cierta porque la relación de longitud a anchura es del orden de la unidad y juega un papel para el efecto de la medición (se reduce el factor de mejora). Se han elegido dimensiones que se pueden realizar. Pequeñas dimensiones requeriría producir un haz de luz muy paralelo o mínimamente divergente, lo que es difícil de lograr, o requeriría un núcleo de fibra que traería un material adicional y los correspondientes problemas de tensión térmica.

iv) Simetría y las tensiones térmicas: La configuración debe ser lo más simétrica posible. Por lo tanto un cuerpo cilíndrico con orificios cilíndricos es más favorable. En particular, se evitarán bordes. La cubierta exterior de acero sólo se une al cuerpo cerca de los bordes y en la parte media de modo que las tensiones térmicas se pueden acoplar sólo de una manera simétrica. La parte asimétrica de tensiones térmicas se debe mantener lo más baja posible.

v) Cambios con intervalo de presión: El diseño actual está, en principio, adaptado fácilmente a otro intervalo de presión, ya que es suficiente cambiar la longitud de las cámaras de presión. Sin embargo, para intervalos pequeños de presión esto puede dar lugar a diseños muy torpes y algunas alternativas, tales como trayectorias de luz que incluyan reflejos en los espejos, se proponen. Se ha elegido una longitud que es adecuada para el tamaño de los sensores de presión típicos, y los intervalos de presión correspondientes para esta configuración se ha calculado.

Se describen varios diseños e ideas alternativas y sus respectivas ventajas y desventajas:

i) Forma diferente de los orificios: en lugar de orificios circulares, se podría considerar la posibilidad de usar orificios que tengan otras formas. Sin embargo, los orificios en forma de pajarita conllevan a una mejora considerable de la presión en los bordes. Los orificios rectangulares tienen una mejora menos significativa y conducen a una pendiente muy pequeña o variación de la tensión cerca del centro de la estructura. Ventajosamente, una forma óptima de los orificios que tienen un factor de mejora de presión pequeño, en particular, que tienen tensiones bajas y/o ningún borde redondeado, por un lado y que tienen una gran área de tensión no homogénea casi constante cerca del centro de la estructura será elegida. Sin embargo, el uso de orificios circulares tiene la ventaja de que pueden fabricarse fácilmente y con mayor precisión.

ii) Aplicación de presión en el interior de los orificios: Un cuerpo de vidrio con dos orificios por sección transversal como se ha descrito anteriormente se puede utilizar, y la presión se puede aplicar en los orificios. Esto es ventajoso para el efecto de medición, pero no es posible proteger una estructura de este tipo contra la sobrepresión, en particular para grandes presiones por encima de -80 bar. Como una idea, la protección contra la sobrepresión puede efectuarse mediante la aplicación de la pretensión al cuerpo de vidrio, por ejemplo, mediante la contracción de un cuerpo exterior que está, por ejemplo, fabricado de acero.

iii) Configuración con cámaras de presión paralelas en lugar de una configuración en serie: Una configuración alternativa sin estructuración del cuerpo de vidrio se muestra en la Figura 5. Una presión se aplica en un cuarto de superficie superior e inferior, otra presión un cuarto de superficie derecha e izquierda del cuerpo de vidrio. Esta configuración no tiene un factor de mejora grande, sino que permite medir directamente la presión diferencial. La ventaja más importante es la forma muy simple del cuerpo cilíndrico, sin necesidad de orificios en el cuerpo de vidrio. Con ello los errores resultantes de las desviaciones de la simetría ideal del cuerpo de vidrio se reducen o incluso eliminan. Además, la presión diferencial se transfiere directamente al efecto de medición, ya que la birrefringencia en cada posición depende directamente de la presión diferencial aplicada, y no hay necesidad de inducir la diferencia de cambios de fase en partes separadas espacialmente como en los diseños anteriores. Como una alternativa, las cámaras de presión pueden estar rodeadas completamente por una carcasa de acero, que normalmente tiene una superficie interior cilíndrica, y entonces este alojamiento se contrae sobre el bloque de vidrio (véase Figura 5). Las tensiones térmicas entre el alojamiento y el vidrio se mantienen bajas, garantizando una configuración de alta simetría durante la producción y/o durante la operación. Posiblemente, los esquemas de compensación se pueden aplicar (por ejemplo, mediante post-tratamiento mecánico o térmico del sensor, o por la corrección de la señal) para hacer frente a las tensiones integradas residuales de las asimetrías.

iv) Uso de espejos: Con el fin de acortar la longitud del dispositivo y aumentar la magnitud del efecto de medición de la birrefringencia inducida por presión, se puede usar espejos en el extremo y, en particular, en la parte delantera del cuerpo metálico a fin de dejar que la luz atravesase el dispositivo varias veces. De este

modo, el cambio de fase inducido por birrefringencia es aditivos múltiples veces en consecuencia. Además, esto permite tener iluminación y detección en un lado, con la reducción de costes debido a una sola placa electrónica en lugar de dos. Por otro lado, el uso de espejos complica ligeramente el dispositivo y los problemas adicionales, por ejemplo, pérdidas de intensidad y la simetría del haz de luz con respecto al cuerpo de vidrio, se resolverán mediante las medidas adecuadas (por ejemplo, mediante medios de alineación del haz y colimación del haz mejorados).

v) Separación espacial de las cámaras de presión: En nuestro dispositivo de sensor sugerido, el sensor de presión está fabricado de un único bloque de vidrio. Como alternativa, un pequeño espacio se puede disponer entre los dos bloques que están diseñados para la aplicación de las presiones  $p_1$  y  $p_2$  a fin de eliminar la diafonía mecánica de la tensión entre ambos bloques. La ventaja de utilizar un único bloque con dos secciones de presión es que la diafonía se puede eliminar por medio de una capa de separación mayor entre ambas secciones, y los errores que, debido a la desalineación no se producen para un único bloque. Como una tercera alternativa, es posible que existan dos bloques posiblemente conectados por fibra óptica en distintos lugares, por ejemplo, para la medición de nivel. Sin embargo, los errores debidos a diferencias de temperatura entre los dos puntos o regiones de medición serán eliminados, lo que es en principio posible.

#### Cambio de fase y generación de señal

La dependencia de la intensidad de la luz en la birrefringencia inducida por presión o cambio de fase, respectivamente, para filtros de polarización perpendiculares se ha proporcionado en la ecuación anterior. En el caso especial del sensor descrito, las direcciones principales de las tensiones vienen dadas por la dirección  $z$  e  $y$ . Por lo tanto, se puede definir el ángulo  $\beta = 0$ . Además, un cambio de fase adicional de  $\pi/2$  se crea por la placa de cuarto de onda con el fin de garantizar una señal monótona en la presión diferencial. Esto conduce a una intensidad en el primer detector propuesta por

$$I_1 = I^0 (1 - \sin(\delta))/2.$$

Aquí  $I^0$  es la intensidad de la luz inicial que incide en el dispositivo, en la que las pérdidas en las interfaces superficiales, etc. se descuidan. Para el segundo detector, el filtro de polarización antes del detector es paralelo al filtro antes del dispositivo (es decir, a un ángulo de  $+45^\circ$ ). La intensidad de este sensor, que incluye la placa de cuarto de onda, es igual a

$$I_2 = I^0 (1 + \sin(\delta))/2.$$

La diferencia de las dos señales del detector dividida entre su suma se puede utilizar como una señal  $S$  para la medición de la presión o de la birrefringencia inducida por presión:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin(\delta).$$

Debido a la placa de cuarto de onda, se tiene el seno en lugar de un coseno lo que permite medir el signo del cambio de fase  $y$ , por tanto, la presión diferencial. La señal  $S$  no depende de la intensidad de la fuente de luz.

#### Intervalo de $y$ sensibilidad a la presión

La sensibilidad a la presión y el intervalo de presión adecuado para que un sensor cumpla los requisitos de precisión pertinentes se pueden calcular a partir del cambio de fase como una función de la presión. Suponemos que el detector alcanza una señal a ruido SNR de  $10^6$  a plena escala (en la que la escala máxima o total de la señal es 1; se utiliza una SNR optimista puesto que la señal máxima encontrada será  $<1$ ). El detector de señal viene dado por la fórmula anterior para  $S$  con el cambio de fase:

$$\delta = K_d \delta p,$$

La sensibilidad  $s$  de la señal  $S$  con respecto a la presión diferencial  $\delta p$  (también denominada  $d_p$ ) viene, por lo tanto, dada por

$$s = \frac{\partial S}{\partial \delta p} = K_d \cos(K_d \delta p).$$

El intervalo de presión admisible se puede encontrar como sigue: las Res. La resolución de presión Res a una determinada presión diferencial  $d_p$  viene dada por la inversa de la sensibilidad  $s$  multiplicada por la relación señal a

ruido de la configuración de detección. En la Figura 7, las resolución de presión Res (en Pascal) se representa como una función de la presión (diferencial) dp (en Pascal) por curva en forma de u (cuasi-parabólica). Para la presión máxima admisible (límite de presión superior) y todas las presiones más pequeñas, la resolución deberá ser inferior a, por ejemplo,  $10^{-5}$  del límite de presión superior. Este objetivo de resolución de presión para la presión diferencial dp se representa en la Figura 7 por las curvas lineales en forma de v. Esto implica que el límite de presión superior de la curva en forma de u (cuasi-parabólica) tiene que estar por debajo de la curva lineal en forma de v como en la Figura 7, definiendo de este modo el intervalo de presión admisible. Debido a la forma de la curva en forma de u, para un límite de presión superior fijo elegido en este intervalo presión, el error para todas las presiones más pequeñas que este límite de presión superior es menor que el error en el límite de presión superior y, por tanto, cumple también con los criterios de resolución requeridos. La Figura 7 muestra, por lo tanto, que los límites de presión superiores se pueden elegir dentro del intervalo de presión entre los dos puntos de intersección de la curva en forma de u y en forma de v de la Figura 7, es decir, entre 0,68 bar (límite inferior de presión, que está limitado por el ruido) y 10,2 bar (límite de presión superior, que es el intervalo de medición de presión limitado). Si se desean otros intervalos de presión, la longitud del sensor deberá aceptarse.

Resumiendo las conclusiones:

Un cuerpo homogéneo en estado sólido, que es transparente a la luz, se utiliza para la detección de presión diferencial utilizando birrefringencia inducida por presión en el cuerpo del sensor. Si una fuerza o presión actúa sobre el cuerpo de tal manera que el índice de refracción del material cambia debido a la tensión inducida, la propagación de la luz paralela o mínimamente divergente que se envía a través del cuerpo se altera. Una realización posible del cuerpo del sensor es un cuerpo de vidrio estructurado. El sensor está hecho de una estructura cilíndrica que consta de dos varillas de vidrio idénticas estructuras que están coaxialmente fusionadas y giradas en 90° una con respecto a la otra. La parte interior de la varilla de vidrio está estructurada con los orificios de tal manera que transforma de manera muy eficaz la presión en un estado de tensión no homogénea en el centro de la varilla. Este estado de tensión no homogénea resulta en la birrefringencia de la luz que se propaga en el centro de la varilla, birrefringencia que puede medirse.

La principal novedad de la invención es el uso de un cuerpo más grande, no de una fibra, en el que el material del cuerpo más grande es homogéneo en comparación con las fibras de vidrio ópticas que tienen un núcleo y un revestimiento. Por lo tanto, la tensión inducida por temperatura debido a la expansión de diversos materiales, incluyendo materiales diferentemente dopados, tal como se presentan en las fibras ópticas, se elimina. Además, mediante el uso de un cuerpo más grande se ve facilitado el acoplamiento de la luz en el cuerpo.

La birrefringencia dependiente de la presión de un cuerpo de vidrio estructurado se puede utilizar para medir la presión diferencial. En el presente documento, se ha demostrado que la configuración es adecuada como elemento de detección primario para sensores de presión industriales. Un sensor específico está físicamente construido de acuerdo con el modelo y su rendimiento se estima. Se ha encontrado que el sensor propuesto que tiene una longitud < 6 cm se puede utilizar para medir intervalos entre 0,68 bar y 10,2 bar con la resolución requerida. Para otros intervalos de presión, la geometría del sensor se puede adaptar fácilmente. La sobrepresión de hasta 250 bar (presión estática) y 92 bar (presión diferencial) es posible; estos límites se puede aumentar mediante la optimización de la geometría. El consumo de energía del sensor de presión óptico está dentro de los límites requeridos para un dispositivo de 4-20 mA.

Los requisitos para la simetría del dispositivo y haz de luz son importantes. Con el fin de mantener los errores esperados bajos, el cuerpo de vidrio se debe fabricar con gran precisión.

#### Lista de números de referencia

- |    |         |   |
|----|---------|---|
| 50 | 1       | fuente de luz, LED  |
|    | 2       | haz de luz  |
|    | 3       | filtro de polarización 45°  |
|    | 4       | alojamiento del elemento de detección                               |
|    | 5       | carcasa de acero  |
| 55 | 6       | paredes terminales  |
|    | 7       | pared de separación entre las cámaras de presión, junta             |
|    | 8       | primera cámara de presión   |
|    | 9       | segunda cámara de presión   |
|    | 10      | cuerpo de vidrio (estructurado)                                     |
| 60 | 11      | primera parte de cuerpo de vidrio                                   |
|    | 12      | segunda parte del cuerpo de vidrio                                  |
|    | 13      | sección transversal de la primera parte del cuerpo de vidrio        |
|    | 14      | sección transversal de la segunda parte del cuerpo de vidrio        |
|    | 15      | placa de cuarto de onda   |
| 65 | 16      | divisor de haz de polarización orientado a 45° Dentro del plano x/y |
|    | 17, 17' | primer y segundo detectores, respectivamente                        |

## ES 2 387 042 T3

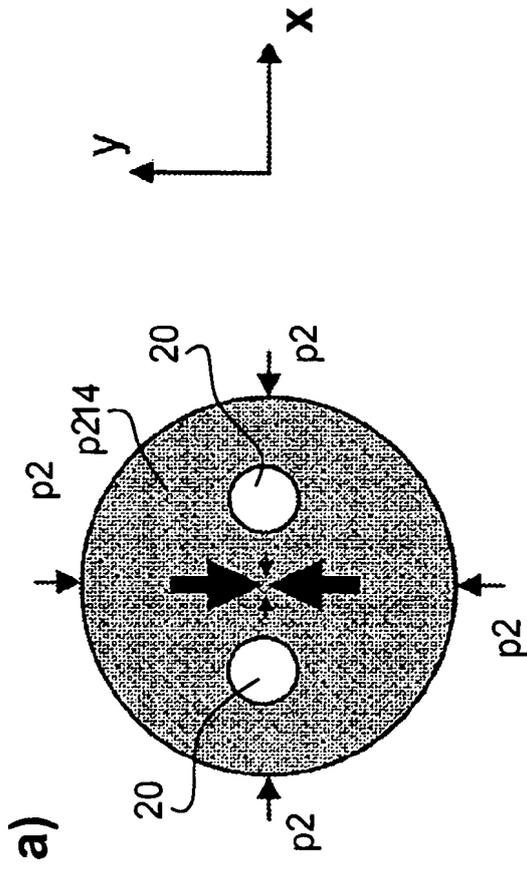
	18	sensor de presión
	19	orificios en la primera parte del cuerpo de vidrio
	20	orificios en la segunda parte del cuerpo de vidrio
	21	luz con dirección de polarización 45° dentro del plano x, y
5	22	haz de luz que sale de la varilla de vidrio
	23, 24	dos componentes ortogonales de 22
	25	paredes de acero de las cámaras de presión
	26	eje central
	27	planos terminales del cuerpo de vidrio
10	p1	presión en la primera cámara de presión
	p2	presión en la segunda cámara de presión
	I	intensidad medida en primer detector
	I <sub>2</sub>	intensidad medida en el segundo detector
	δ <sub>p</sub> , dp	diferencia de presión, presión diferencial
15	δ <sub>p</sub>	cambio de fase inducido por presión diferencial entre los componentes de polarización lineal x e y de la luz que viaja
	A <sub>x</sub>	amplitud del componente x
	A <sub>y</sub>	amplitud del componente y
	λ	longitud de onda de la luz
20	K	constante de tensión óptica
	L	longitud de la varilla
	σ	tensión en la dirección correspondiente (σ <sub>xx</sub> , σ <sub>xy</sub> , σ <sub>yy</sub> )
	t	tiempo t; espesor de la carcasa de acero
	E	módulo de elasticidad de Young
25	ν	Número de Poisson
	d1	longitud del orificio
	d2	distancia de la parte inferior del orificio desde P
	d3	distancia de la primera cámara de presión desde el extremo terminal
	d	diámetro del orificio
30	b	distancia del centro del orificio desde el eje central
	D	Diámetro del cuerpo de vidrio
	P	Plano de separación
	h	anchura de las cámaras de presión
	A, B	secciones transversales
35	Res	resolución de presión

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Sensor de presión (18) con al menos un elemento de detección óptico (10) los cambios inducidos por presión en las propiedades birrefringentes que se leen por la transmisión del al menos un haz de luz (2, 21), caracterizado por que
- 10 el sensor de presión (18) comprende al menos un cuerpo transparente de un solo material (10) que se somete a al menos dos presiones diferentes ( $p_1$ ,  $p_2$ ) en al menos dos regiones distintas a través de al menos dos cámaras de presión (8, 9), en el que el cuerpo transparente (10) se está transmitiendo por un haz de luz paralelo o esencialmente no-divergente o mínimamente divergente sin reflexión total en dicho cuerpo (10) de tal manera que el cambio de fase inducido por la birrefringencia del haz de luz transmitido (22) depende de la diferencia de las presiones aplicadas ( $p_1$ ,  $p_2$ ),
- 15 el cuerpo transparente (10) está dispuesto en una carcasa exterior (5), proporcionándose las cámaras de presión (8, 9) en el espacio intermedio entre la superficie exterior del cuerpo transparente (10) y la superficie interior de la cubierta exterior (5), y la cubierta exterior (5) está fabricada de acero, en el que el acero se selecciona preferiblemente para tener una característica de expansión térmica esencialmente igual o similar a la del cuerpo transparente (10).
- 20 2. Sensor de presión de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el cuerpo transparente (10) se somete directamente a al menos dos presiones diferentes ( $p_1$ ,  $p_2$ ).
- 25 3. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cuerpo transparente (10) es un cuerpo cilíndrico, preferiblemente se sección transversal circular o poligonal, que está sometido a al menos dos presiones diferentes ( $p_1$ ,  $p_2$ ) en diferentes partes y/o regiones, en el que está preferiblemente sometido a dos presiones diferentes ( $p_1$ ,  $p_2$ ) en múltiples, preferiblemente dos, partes longitudinalmente posteriores (11, 12) y/o a dos presiones diferentes ( $p_1$ ,  $p_2$ ) en múltiples, preferiblemente cuatro, secciones equiangulares de presión alternativa a lo largo de toda la longitud del cuerpo (10).
- 30 4. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cuerpo transparente (10) es un cuerpo cilíndrico (10) con una sección transversal circular que tiene dos partes (11, 12) de igual longitud, en el que las dos partes (11, 12) comprenden una estructuras internas esencialmente idénticas, preferiblemente en forma de orificios o aberturas longitudinales, preferiblemente cilíndricos (19, 20), lo que resulta en una distribución asimétrica de la tensión en el cuerpo (10), si se aplica presión, y en el que las dos partes (11, 12) se hacen girar una con respecto a la otra en  $90^\circ$  alrededor del eje principal del cuerpo cilíndrico (10).
- 35 5. Sensor de presión de acuerdo con la reivindicación 4, en el que en cada parte (11, 12) la estructura interna se proporciona como un par de orificios longitudinales (19, 20), cuyos ejes están igualmente distanciados del eje principal del cuerpo cilíndrico (10) y cuyos ejes están orientados en un mismo plano que incluye el eje principal del cuerpo cilíndrico (10).
- 40 6. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4-5, en el que el diámetro ( $d$ ) de los orificios cilíndricos (19, 20) está comprendido entre  $1/8$  y  $1/3$ , preferiblemente en el intervalo de  $1/4$ , del diámetro ( $D$ ) del cuerpo cilíndrico transparente (10).
- 45 7. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3-6, en el que el cuerpo transparente (10) tiene superficies terminales (27) perpendiculares al eje principal, y en el que las dos partes (11, 12) están dispuestas adyacentes entre sí en una junta a tope.
- 50 8. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el haz de luz paralelo o mínimamente divergente (22) se desplaza a lo largo del eje central longitudinal del cuerpo cilíndrico transparente (10) con los planos terminales (27) orientados perpendicularmente al eje central longitudinal del cuerpo cilíndrico (10).
- 55 9. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cuerpo transparente (10) se irradia en paralelo a y/o a lo largo del eje central longitudinal desde un lado con un haz de luz (21), y en el que la luz transmitida (22) que abandona el cuerpo transparente (10) se detecta mediante dos detectores (17, 17') en el otro lado, en el que preferiblemente los detectores (17, 17') están midiendo la intensidad total integrada dentro de un cierto intervalo espectral, y en el que preferiblemente los detectores (7, 8) son diodos detectores que están eléctricamente o electrónicamente conectados de alguna manera, por ejemplo, utilizando un puente de Wheatstone, de tal manera que se emite una señal de diferencia o la diferencia dividida entre la suma de las señales.
- 60 10. Sensor de presión de acuerdo con la reivindicación 9, en el que el haz de luz (21) irradiado en el cuerpo transparente (10) se polariza linealmente, preferiblemente mediante el uso de un filtro de polarización (3), y en el que el haz de luz (22) que abandona el cuerpo transparente (10) se divide en sus dos componentes (23, 24) utilizando un divisor de haz de polarización (16) con la misma orientación que el filtro de polarización (3) para la detección por los dos detectores (17, 17').
- 65

- 5 11. Sensor de presión de acuerdo con la reivindicación 9 ó 10, en el que por detrás del cuerpo transparente (10) del haz de luz (22) se hace pasar un elemento de cambio de fase óptico, preferiblemente a través de una placa de cuarzo de onda (15).
- 10 12. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las dos presiones ( $p_1$ ,  $p_2$ ) son aplicadas a un cuerpo cilíndrico transparente (10) por medio de dos cámaras de presión circunferenciales, idénticas, espaciadas longitudinalmente (8, 9), que se cargan preferiblemente con un líquido, incluso más preferiblemente con aceite de silicona.
- 15 13. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cuerpo transparente (10) es un cuerpo de vidrio, preferiblemente de sílice fundida.
16. Sensor de presión de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el cuerpo transparente (10) se fija dentro de la carcasa (5) por soldadura fuerte o mediante una junta tórica flexible
- 20 15. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 13-14, en el que las cámaras de presión (8, 9) están provistas de bordes redondeados.
- 25 16. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cuerpo transparente (10) está estructurado, en particular, internamente, en una región en la que una pared de separación (7) entre las cámaras de presión (8, 9) y/o en la que un alojamiento (4) está fijado o está en contacto con el cuerpo transparente (10), en particular, para eliminar la influencia de las tensiones térmicas en birrefringencia.
- 30 17. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cuerpo transparente (10) consiste en dos mitades estructuradas que están espacialmente separadas.
18. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el haz de luz (2, 21) es proporcionado por una fuente de luz, preferiblemente por un diodo emisor de luz (1), que está preferiblemente modulado en intensidad, y en el que antes de la transmisión a través del cuerpo transparente (10) el haz de luz (2, 21) se hace pasar a través de un filtro de polarización.
- 35 19. Sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se proporcionan adicionalmente un sensor de medición de temperatura y/o un sensor de intensidad de luz para medir la intensidad de la fuente de luz, y en el que los datos de estos sensores se incorporan en la evaluación de la presión diferencial .
- 40 20. Método para la detección de una presión utilizando un sensor de presión (18), de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que tiene al menos un elemento de detección óptico (10), cuyos cambios inducidos por presión en las propiedades birrefringentes se leen por la transmisión de al menos un haz de luz (2, 21), caracterizado por que el sensor de presión (18) comprende al menos un cuerpo transparente de solo material (10) que está sometido a al menos dos presiones diferentes ( $p_1$ ,  $p_2$ ) en al menos dos regiones distintas a través de al menos dos cámaras de presión (8, 9), en el que el cuerpo transparente (10) se está transmitiendo por un haz de luz paralelo o mínimamente divergente (22) sin reflexión total en dicho cuerpo (10) de tal manera que el cambio de fase inducido por birrefringencia del haz de luz transmitido (22) depende de la diferencia de las diferentes presiones ( $p_1$ ,  $p_2$ ), y en el que la presión diferencial en las dos cámaras de presión (8, 9) se evalúa en base a la salida diferencial de estos detectores (17, 17'), en base a la suma o diferencia de salida estos detectores (17, 17'), en base a la relación de la salida de estos detectores (17, 17'), o en base a una combinación de los mismos, preferiblemente en la relación entre la diferencia y la suma.
- 45 21. Uso de un sensor de presión de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-19 para la medición de las diferencias de presión superiores a 500 mbar, y preferiblemente en un intervalo de presión superior a 0,5 bar hasta 15 bar.
- 50





b) c)

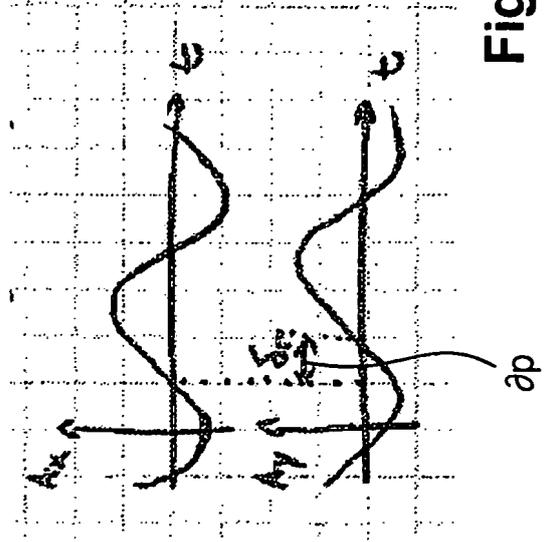
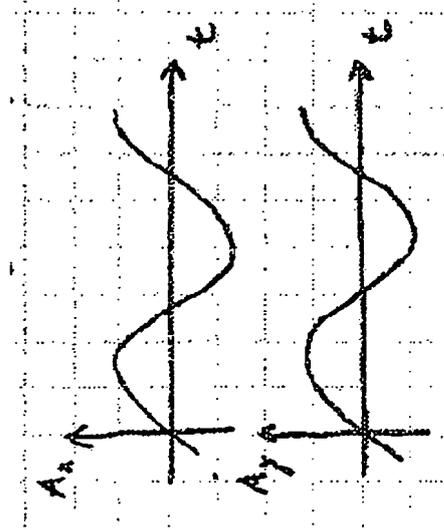


Fig. 2

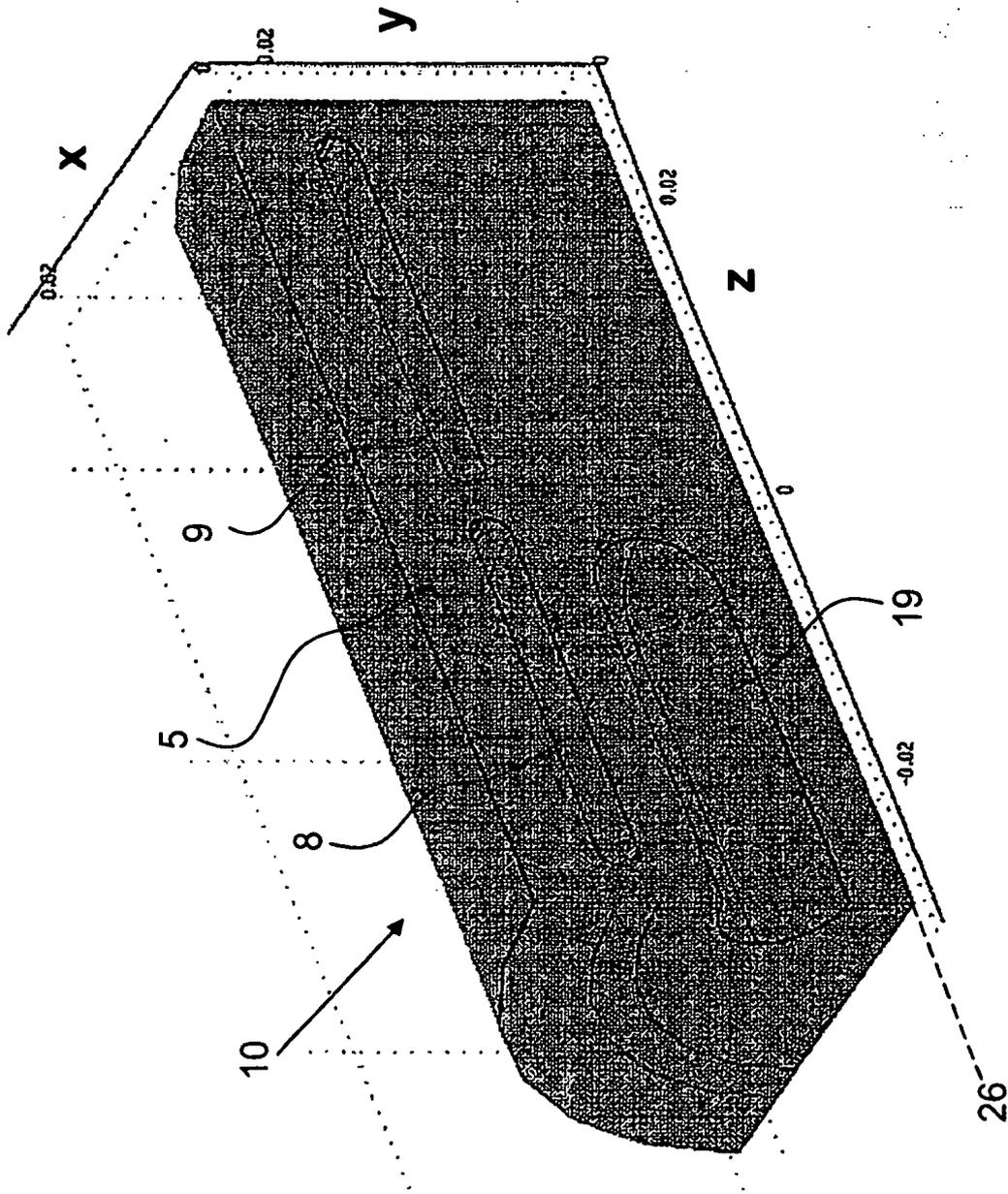


Fig. 3

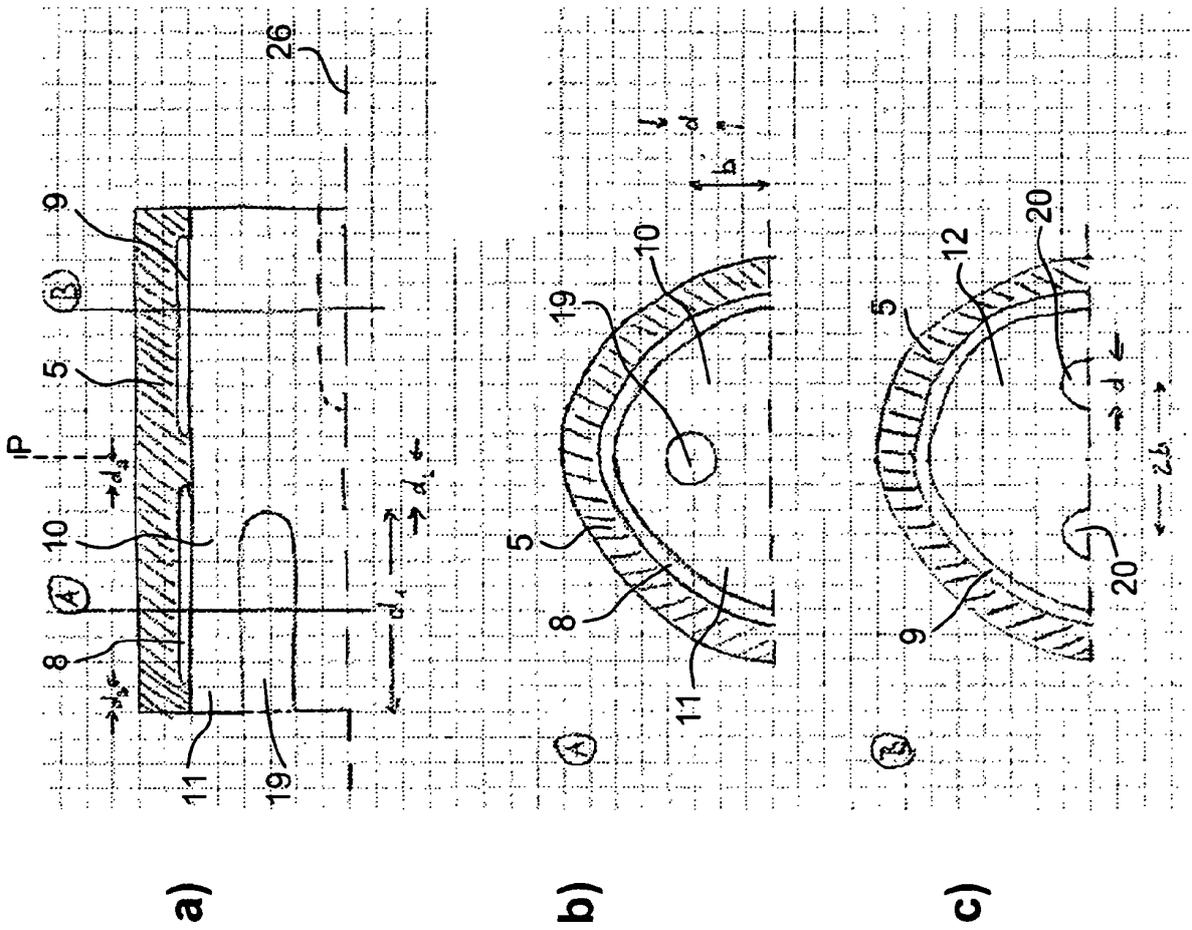


Fig. 4

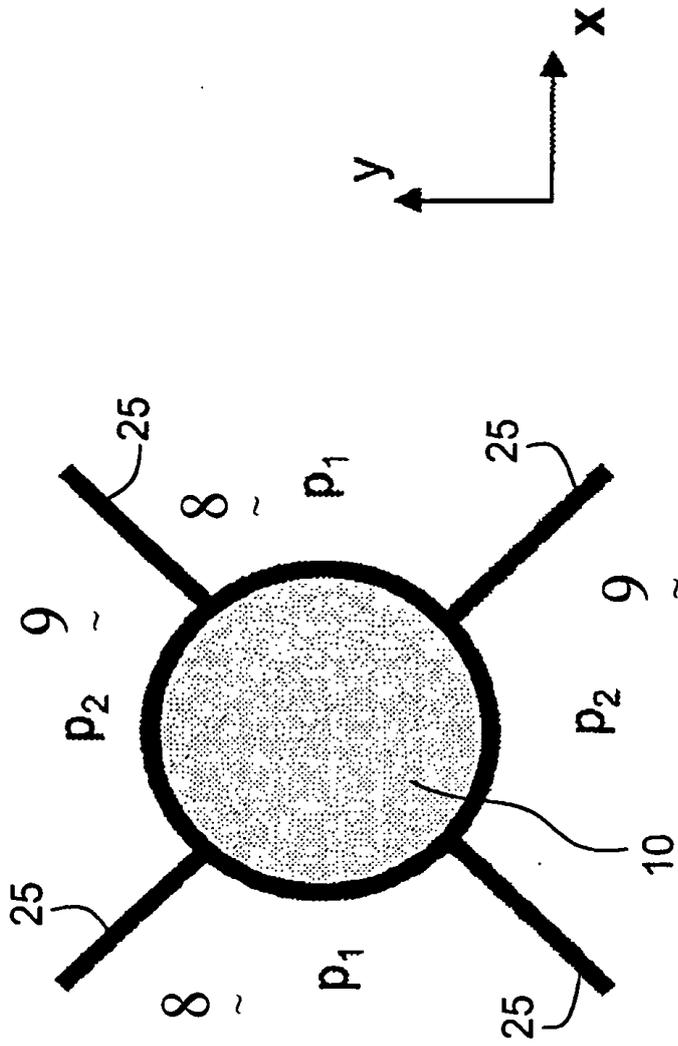


Fig. 5

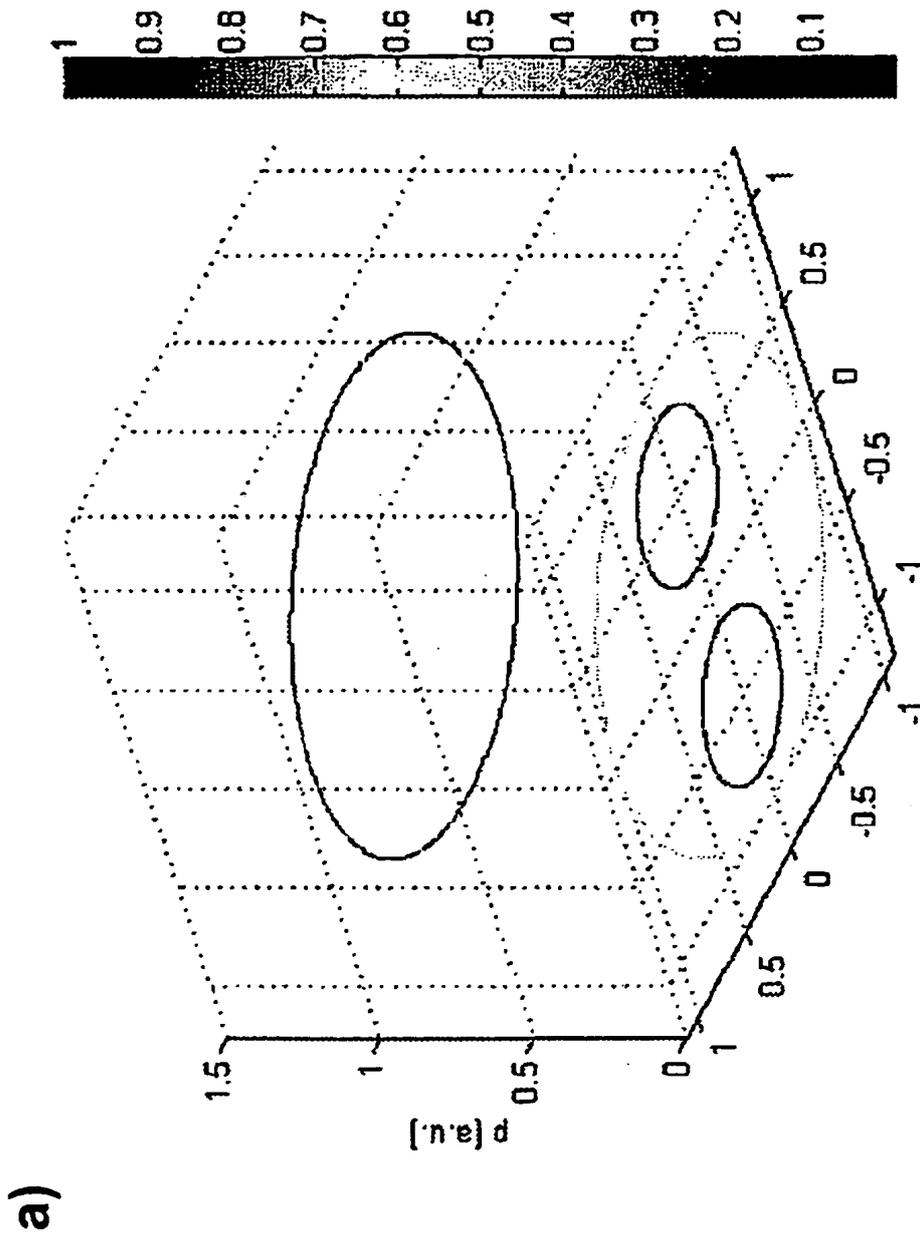
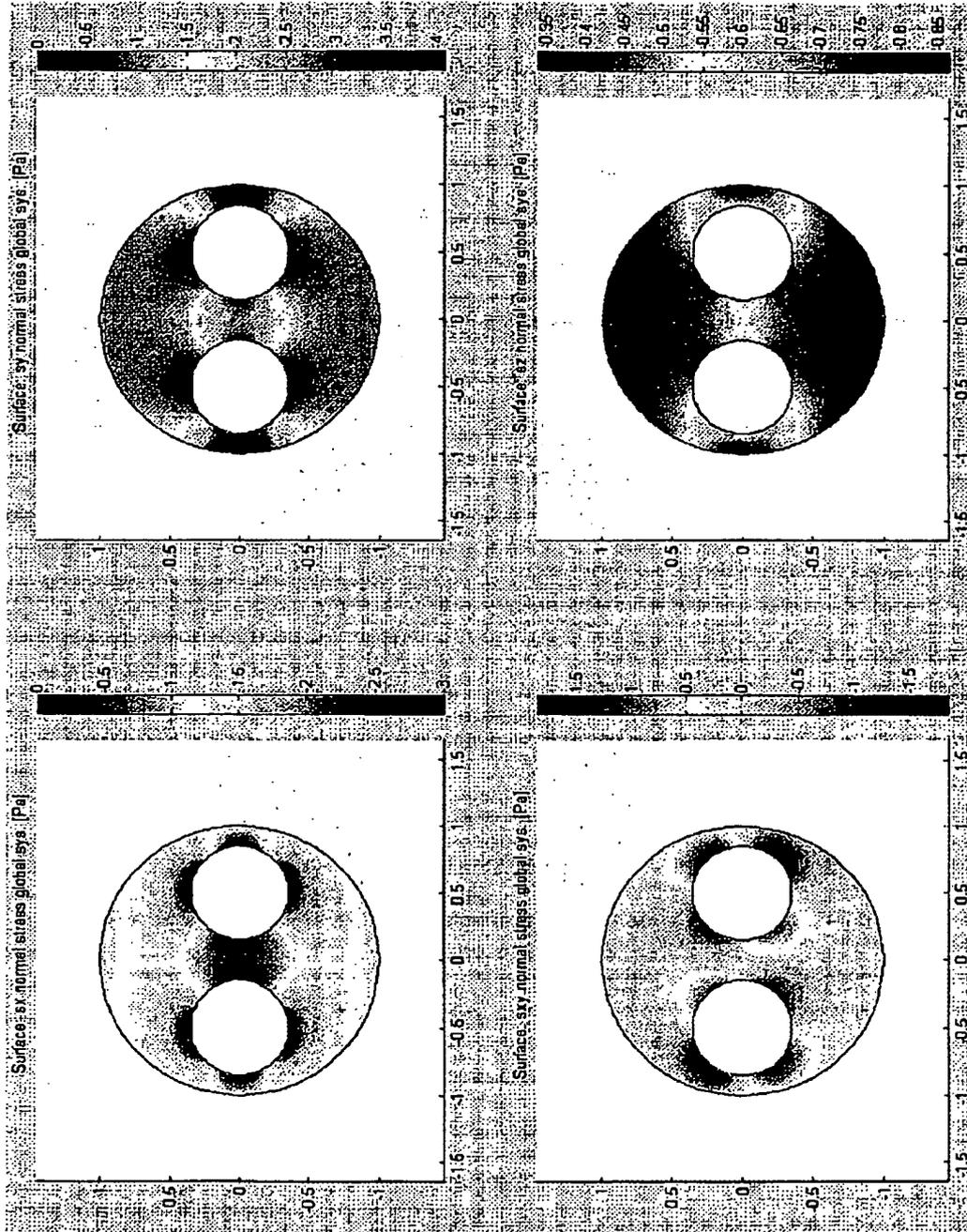
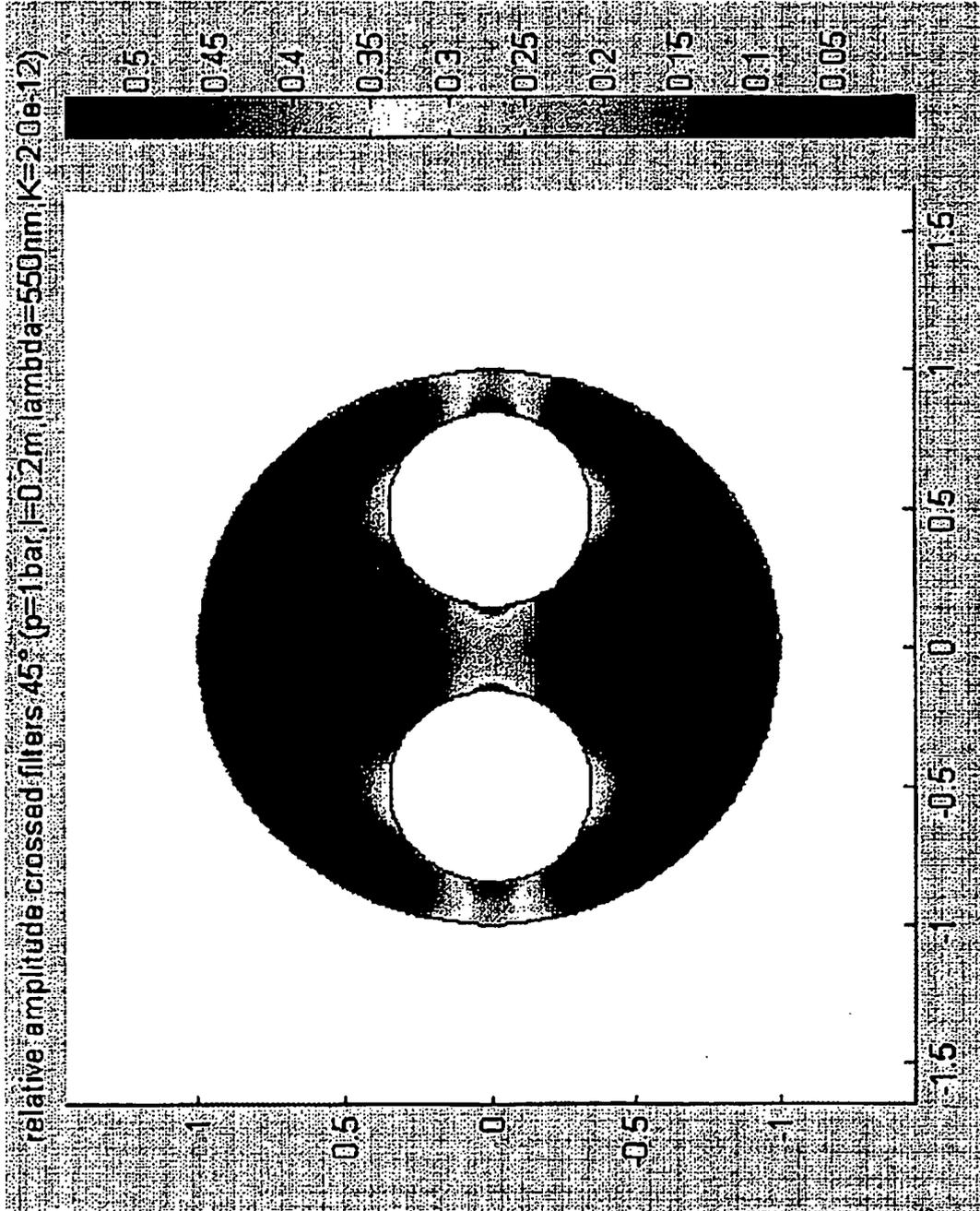


Fig. 6



b)

Fig. 6



c)

Fig. 6

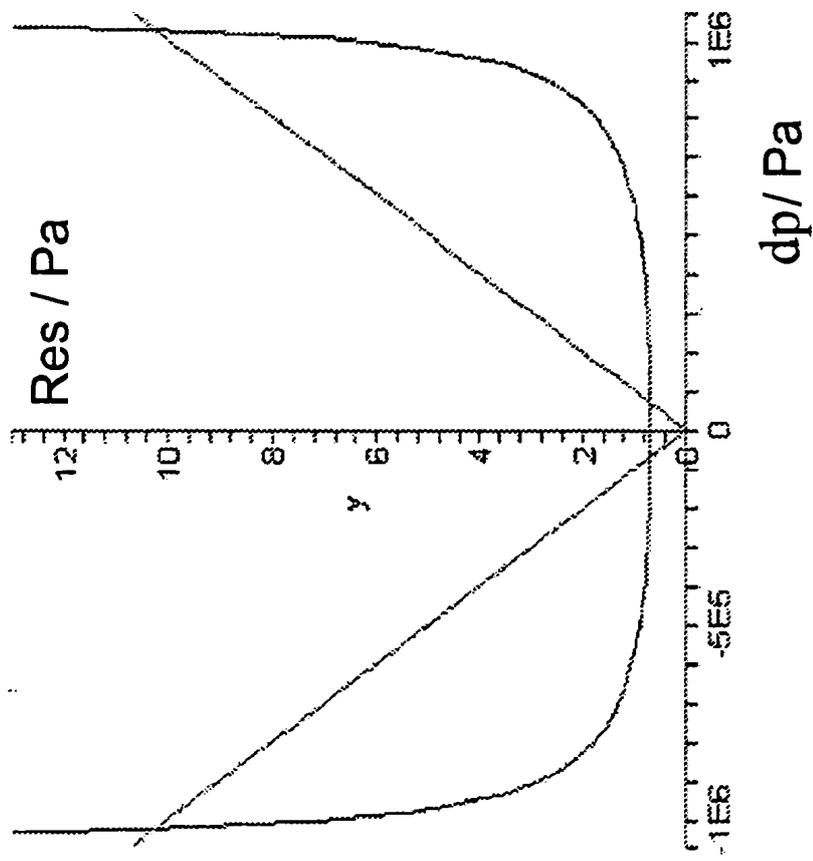


Fig. 7