



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 366 994**

51 Int. Cl.:  
**G01F 1/84** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **09075497 .9**

96 Fecha de presentación : **10.11.2009**

97 Número de publicación de la solicitud: **2187184**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **19.05.2010**

54 Título: **Caudalímetros máxicos de efecto Coriolis con sensor de movimiento ópticamente reflejante.**

30 Prioridad: **14.11.2008 NL 1036198**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**27.10.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**27.10.2011**

73 Titular/es: **BERKIN B.V.**  
**Nijverheidsstraat 1A**  
**7261 AK Ruurlo, NL**

72 Inventor/es: **Brouwer, Dannis Michel;**  
**Mehendale, Aditya;**  
**Kristiansen, Lars;**  
**Klein, Marvin Ernst Eckhard y**  
**Katerberg, Marcel Ronald**

74 Agente: **De Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 366 994 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

Caudalímetros másicos de efecto Coriolis con sensor de movimiento ópticamente reflejante

5 La invención se refiere a un sistema sensor de circulación de Coriolis con un tubo de circulación vibrante, "tubo" en lo sucesivo, a través del que circula un medio, cuyo sensor de circulación comprende medios que inducen la vibración del tubo, y medios de detección ópticos para la determinación de los movimientos de al menos un punto del tubo, comprendiendo dichos medios de detección ópticos una fuente de luz para tener un haz de luz incidente en la pared del tubo, en una capa dispuesta en la pared, o en un elemento unido a esta pared, y un sensor de luz que tiene una superficie fotosensible para percibir la luz del haz de luz después de la reflexión contra la pared del tubo, una capa dispuesta en esta pared, o en un elemento unido a esta pared.

10 Si en lo que sigue se menciona que el haz de luz incide sobre o se refleja en contra de la pared del tubo, aunque se supone que también están incluidos los casos en que se produce la incidencia sobre o la reflexión contra una capa dispuesta en la pared del tubo, o en un elemento unido a esta pared.

15 Un sensor de circulación de Coriolis (o: sistema de sensor de circulación Coriolis) comprende al menos un tubo o tubo de circulación, a través del cual circula el medio. Este tubo realiza normalmente un movimiento oscilatorio de excitación. Un pequeño movimiento Coriolis adicional superpuesto en dicho lugar se crea por el flujo. Esta combinación de movimientos se va a medir con el fin de determinar el flujo. El sensor de circulación para este fin cuenta con un sistema de detección por medio del cual se detecta el desplazamiento de uno o varios puntos del tubo en función del tiempo. El sistema de detección puede basarse en varios principios, tales como los principios inductivo, capacitivo u óptico. Dentro del campo de los sensores de desplazamiento óptico hay varias realizaciones posibles. El más ampliamente utilizado con diferencia es el tipo que puede ser descrito como "ópticamente transmisivo". Un sensor de desplazamiento de este tipo comprende una carcasa en forma de U que se fija a la estructura del sensor de circulación con una fuente de luz (por ejemplo, un LED) en una pata de la U y una célula fotoeléctrica (por ejemplo, un fototransistor) dispuestos frente a la fuente de luz en la otra pata. Una parte del tubo o una proyección, fijada al tubo, que se mueven entre las dos patas de la U, bloquea una parte del haz de luz entre la fuente de luz y la célula fotoeléctrica, que varía en parte con el movimiento del tubo. El movimiento puede derivarse del cambio en la señal eléctrica generada en dicha célula fotoeléctrica. Un sensor de este tipo se describe en los documentos EP-A-1.719.982 y EP-A-1.719.983.

20 Una realización diferente de un sensor de desplazamiento óptico puede ser descrita como "ópticamente reflectante". Esta realización comprende también una fuente de luz y una célula fotoeléctrica, ambas unidas a la estructura del sensor de circulación. Aquí, sin embargo, un haz dirigido desde la fuente de luz ilumina una parte de la pared del tubo o una proyección sujeta al mismo. La célula fotoeléctrica, que está montada en el mismo lado del tubo, se dispone en parte o totalmente en la trayectoria del haz reflejado, y mide la intensidad en la posición de la luz incidente sobre su superficie fotosensible. El principio básico de un sensor de este tipo se describe también en el citado documento EP-A-1.719.983, así como en el artículo de P. Enoksson et al. "A Silicon Resonant Sensor Structure for Coriolis Mass-Flow Measurements" in Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 6, nº 2, junio 1997. Sin medidas adicionales, sin embargo, la sensibilidad es inadecuada para su uso en un sensor de circulación Coriolis preciso.

30 La presente invención tiene por objeto proporcionar medidas (ópticas) que de forma individual o en combinación mejoran esta sensibilidad considerablemente. De acuerdo con la invención, un sistema sensor de circulación Coriolis del tipo mencionado en el párrafo inicial se caracteriza porque los medios para dar forma al haz se disponen para hacer que el haz converja en la dirección del movimiento del tubo asociado a la fuerzas de Coriolis más pequeñas que la convergencia en la dirección de movimiento del tubo asociado con las fuerzas de excitación.

35 Una medida de la convergencia es el ángulo de convergencia. Este es el ángulo superior del cono de un haz convergente ( $\epsilon$  en la Fig. 1). (De manera análoga, una medida de la divergencia es el ángulo de divergencia, que es el ángulo superior del cono de un haz divergente ( $\delta$  en la Fig. 10)).

Mediante esta construcción se mejora la sensibilidad en la detección de los pequeños movimientos del tubo causados por las fuerzas de Coriolis. En particular, el sensor detecta no sólo los movimientos de traslación, sino también, o de forma posiblemente exclusiva, los movimientos de rotación del tubo. Esta es la razón de que se haga referencia en su mayor parte a un "sensor de movimiento" en el texto siguiente.

50 En el marco de la invención son aplicables varios medios para dar forma al haz de luz, por ejemplo:

una fuente de luz astigmática que hace que el haz tenga divergencias diferentes en direcciones perpendiculares, de manera que en combinación con una lente esférica "normal" se obtienen diferentes convergencias en direcciones diferentes (la mayoría de los láseres son astigmáticos);

55 una placa de fase que hace que la luz en diferentes lugares del haz tenga diferentes retardos de fase; un componente óptico dispuesto en el haz de luz incidente, como una lente o un espejo, por ejemplo, una lente

esférica, que está dispuesta en un ángulo con respecto al haz, dando como resultado diferentes enfoques en diferentes direcciones.

De acuerdo con una realización preferida, el componente óptico comprende al menos una lente convergente cilíndrica o esférica.

- 5 En el marco de la invención, el ángulo formado entre el haz incidente y el reflejado puede estar entre  $0^\circ$  y  $60^\circ$ . Sin embargo, se puede ahorrar espacio si, de acuerdo con una realización preferida, el ángulo formado entre el haz incidente y el reflejado es de  $0^\circ$ .

Realizaciones ventajosas adicionales se describen en las reivindicaciones.

- 10 El sensor de movimiento ópticamente reflectante de acuerdo con la invención es muy adecuado para su uso en sensores de circulación Coriolis de tubo de diámetro muy pequeño ( $<0,1$  mm), como los sensores de circulación de masa fabricados por MST (Micro System Technology) como se describe, por ejemplo, en el artículo de J. Haneveld et al. "Highly sensitive micro Coriolis mass flow sensor" publicada en The Proceedings of the MEMS Conference, 13-17 de enero 2008, Tucson, EE.UU.", que se considera incluido en la presente descripción a modo de referencia, ya que el diámetro del punto de luz incidente sobre el tubo puede hacerse muy pequeño por medios de enfoque. Esta posibilidad no es ofrecida por un sensor ópticamente transmisor, en el que las posibilidades de aplicación están limitadas por las dimensiones disponibles de la fuente luminosa y la célula fotoeléctrica (desde  $0,2$  mm en adelante). El uso del sensor de movimiento ópticamente reflectante de acuerdo con la invención, sin embargo, no se limita a los pequeños diámetros de tubo, sino que es igualmente conveniente para sensores de circulación de Coriolis conocidos más grandes (1 m de diámetro de tubo).

- 20 Unas cuantas realizaciones de la invención se describirán ahora con más detalle a modo de ejemplo, con referencia a las Fig. adjuntas.

La Fig. 1 muestra una realización esquemática de un sistema sensor de circulación de acuerdo con la invención, con cuatro lentes añadidas, cuya función será definida más adelante.

- 25 La Fig. 2 muestra una realización mejorada con incidencia y reflexión perpendiculares, hecha posible por la adición de un espejo que transmite en parte la luz y, opcionalmente, con una placa para conseguir un retardo de la fase de un cuarto de la longitud de onda con lo que la polarización de un haz de luz se puede girar  $90^\circ + n$  veces  $180^\circ$  al tener dos veces el paso de luz.

La Fig. 3 muestra una realización redonda y una cuadrada de la superficie fotosensible de una célula de cuadrante con segmentos A, B, C y D y un punto de luz representado en dicho lugar.

- 30 La Fig. 4 muestra la superficie fotosensible de un Dispositivo Sensible a la Posición, un punto de luz reflejado en dicho lugar, y valores límite típicos de las posibles tensiones representados en los dos ejes.

La Fig. 5 muestra un diseño típico del tubo de circulación de un sensor de circulación de Coriolis, en el que la posición más favorable de un sensor de movimiento de reflexión está indicada esquemáticamente.

- 35 La Fig. 6 muestra dos posibles orientaciones de una célula de cuadrante en relación con la primera y la segunda direcciones de movimiento del punto de luz.

La Fig. 7 muestra la forma del punto de luz adyacente a la superficie de reflexión para dos diferentes valores de convergencia, en los que el haz reflejado se ha invertido a través de la superficie de reflexión por claridad.

La Fig. 8 muestra el principio de una palanca de óptica.

La Fig. 9 muestra las dimensiones de un punto de luz oval en la célula del cuadrante que se va a optimizar.

- 40 La Fig. 10 muestra el principio de la optimización de la relación del ángulo de divergencia al diámetro de la cintura.

La Fig. 11 muestra una realización sencilla basada en la reflexión parcial del haz de luz frente al sensor de luz.

La Fig. 12 muestra un sensor de circulación esquemático de acuerdo con la invención en el que el haz de luz incidente no está enfocado en la pared del tubo, sino en el que el punto de enfoque se encuentra en la trayectoria del haz de luz reflejada.

- 45 La Fig. 1, que muestra una realización de un sistema sensor de circulación de acuerdo con la invención, es una vista en sección transversal de un tubo de Coriolis 1 con una superficie de reflexión 2 unida a él. El sistema sensor consta de una fuente de luz 3 y un sensor de luz 4 como un sensor de desplazamiento. Además, dos lentes se colocan tanto en el haz de luz incidente como en el haz de luz reflejado con las referencias L1 a L4. Estas lentes definen la forma del haz, y la forma en que esto se logra es esencial para la invención. Las lentes pueden ser de tipo esférico,

cilíndrico o esférico. Las lentes L1 y L4 están cerca de la fuente de luz 3 y del sensor de luz 4, respectivamente, y las lentes L2 y L3 están cerca de la superficie de reflexión 2.

5 Estos componentes juntos forman un camino óptico en forma de V para el haz de luz 5. Esta forma de V es por definición simétrica con respecto a la perpendicular 6 de una superficie de reflexión 2 en el tubo 1: el haz incidente forma un ángulo de incidencia  $\alpha$  con respecto a la perpendicular 6 de la superficie de reflexión 2, cuyo ángulo debe ser mayor que cero porque la fuente de luz 3 y el sensor de luz 4 no coinciden. Por definición, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. El cambio en el ángulo de reflexión es el doble de los cambios angulares de la superficie de reflexión 2. La Fig. 1 muestra el plano del camino óptico en forma de V como paralelo a la sección transversal del tubo 1; sin embargo, el principio es igualmente efectivo cuando el plano de la V no está a lo largo de la sección transversal del tubo, sino longitudinalmente a lo largo del tubo, o en cualquier dirección entre ellos.

10 La fuente de luz 3 es preferentemente un láser, pero un LED, en principio, también es adecuado (una o varias longitudes de onda, respectivamente).

15 La superficie de reflexión 2 está dibujada plana, pero una superficie cóncava o convexa también es efectiva, sujeta a la elección de las lentes, como se muestra en la Fig. 1. Esto también comprende una realización en la que la propia pared del tubo o una capa sobre ésta tenga siempre suficientes propiedades reflectantes. La superficie puede hacerse de cualquier material que refleje la luz: vidrio, metal y resina sintética. Sin embargo, una condición para el camino de reflexión en forma de V, es que la superficie deberá ser lo más lisa posible para que la luz reflejada no sea dispersada.

20 El sensor de luz 4 es de un tipo que mide la posición del punto de luz en la superficie fotosensible del sensor. Esta determinación de la posición debe ser de dos dimensiones (2-D) en la realización preferida de tal manera que los desplazamientos del punto en dos direcciones ortogonales entre sí, perpendiculares a la superficie fotosensible del sensor de luz 4 se pueden detectar de forma independiente el uno del otro. Estas direcciones han sido referenciadas "tra 1" y "tra 2" en la Fig. 1, es decir en el plano de V y perpendicular a él.

25 La patente de EE.UU. 5.020.380 muestra un caudalímetro de efecto Coriolis con medios de detección ópticos que comprenden una fuente de luz, un sensor de luz y medios ópticos de guías de onda que transmiten la luz de la fuente de luz después de reflejarse contra el tubo de Coriolis hasta el sensor de luz. De esta manera el movimiento del tubo se mide basado en la intensidad de la luz reflejada, no sobre la posición de un punto de luz sobre el sensor.

Tres movimientos principales del tubo (o una combinación de los mismos) pueden medirse con un sensor de 2-D de este tipo (véase la Fig. 1):

30 Una traslación perpendicular a la superficie del espejo, indicada con "tra" adyacentes al tubo en la Fig. 1. Esto provoca un desplazamiento "tra 1" del punto en el sensor de luz en la primera dirección de acuerdo con una función geométrica ( $2 \times \text{tra} \times \sin \alpha$ ), siendo la principal característica de este desplazamiento que se incrementa con un mayor ángulo  $\alpha$  y por el contrario se reduce con un ángulo  $\alpha$  más pequeño.

35 Una primera rotación alrededor de un eje definido por la línea de intersección de la superficie de reflexión y una sección transversal perpendicular a través del tubo, referenciada "rot 1" en la Fig. 1. Esto provoca un desplazamiento "tra 2" del punto en el sensor de luz 4 en la segunda dirección igual al doble de la primera rotación multiplicado por la distancia entre el tubo y el sensor de luz o una lente de colimación colocada en su parte delantera (lente L3).

40 Una segunda rotación alrededor de un eje que es el eje longitudinal del tubo, referenciada "rot 2" en la Fig. 1. Esto provoca un desplazamiento "tra 1" del punto en el sensor de luz en la primera dirección igual al doble de la segunda rotación multiplicado por la distancia entre el tubo y el sensor de luz o una lente de colimación colocada en su parte delantera (lente 3). Por lo tanto esto se añade al desplazamiento en la primera dirección causado por la traslación.

Dos diferentes realizaciones de un sensor 4 de luz en 2-D son, en particular, aplicables:

45 La célula segmentada, como sensor de luz, en la que la superficie fotosensible se divide en una pluralidad de segmentos independientes cada uno de los cuales mide la cantidad correspondiente de la luz incidente en dicho lugar. Una medida en dos dimensiones requiere al menos tres segmentos que se forman de manera que puedan determinar la posición de un punto de luz reflejado en la superficie en dos direcciones ortogonales entre sí. La versión más ampliamente utilizada de esto es la célula de cuadrante o "célula quad", cuya superficie fotosensible se divide en cuatro cuadrantes, y la parte del punto incidente en cada cuadrante se mide de forma individual (Fig. 3). La siguiente descripción, en consecuencia, se referirá siempre a una célula de cuadrante, pero el principio es importante también para células con un mínimo de tres segmentos de diferente forma, así. Las dimensiones típicas de la superficie fotosensible de una célula de cuadrante son de 1 mm x 1 mm.

50 El PSD (dispositivo sensible a la posición), que determina la posición del centro del punto en relación con los bordes de la superficie fotosensible en dos direcciones ortogonales (Fig. 4) por medio de dos corrientes o tensiones generadas de forma independiente.

La fuente de luz 3 emite un haz de luz hacia el tubo 1. Una primera lente (L1) cerca de la fuente forma un haz paralelo ("colimado"). Dado que el diámetro del haz es a menudo más grande que el diámetro del tubo, sobre todo en el caso de tubos muy pequeños fabricados por MST (Micro System Technology), puede ser necesario añadir una segunda lente (L2), que converja con el haz en un pequeño punto. Este punto está dirigido a la pared del tubo o a una superficie plana o curva sujeta al mismo. El tamaño del punto debe ser menor que dicha superficie más cualquier amplitud de movimiento del tubo, de modo que en todo momento sea reflejado todo el haz. Como un haz convergente después de la reflexión contra una superficie plana o convexa se desviará, puede añadirse una tercera lente (L3), que asegure que el diámetro del haz de luz no llegue a ser demasiado grande. Este efecto puede ser tal que se obtenga un haz paralelo ("colimado"), o que su efecto pueda ser más o menos que eso. Una cuarta lente (L4) se puede añadir opcionalmente justo antes del sensor de luz 4 para una mayor convergencia del haz. Esto depende de la relación entre el diámetro del haz de luz y el diámetro de la superficie fotosensible del sensor de luz. Si hubiera espacio suficiente, sería posible colocar ya sea la fuente de luz o el sensor de luz cerca del tubo. Lo anterior significa que puede requerirse un número de una a cuatro lentes "funcionales", dependiendo de la geometría. A veces, las funciones de dos lentes "funcionales" se pueden combinar, o una lente "funcional" se subdividirá en varias lentes "físicas", por ejemplo, una lente esférica en varias lentes cilíndricas de distancias focales diferentes.

Una opción obvia sería la de hacer el ángulo  $\alpha$  grande, de modo que haya más espacio para los componentes ópticos. Esto aumenta la sensibilidad a la traslación mencionada anteriormente, pero reduce la de la primera rotación, mientras que la sensibilidad a la segunda rotación se mantiene sin cambios. Dicha mayor sensibilidad a la traslación no es deseable, ya que también puede ser cambiada por la temperatura o por la gravedad. Dado un ángulo  $\alpha$  teórico de 0 grados, la medición es totalmente insensible a tales traslaciones del tubo. Esto es así porque se prefiere un pequeño ángulo  $\alpha$  y una medición basada en rotaciones.

Medida de mejora 1: adición de un espejo que transmite parcialmente.

A continuación se describe una primera medida de mejora y se representa en la Fig. 2, en la que mismos números de referencia que en la Fig. 1, indican iguales componentes, comprende la adición de un espejo 7 que transmite parcialmente la luz con lo que resulta posible un ángulo de incidencia  $\alpha$  de 0 grados. Esto tiene el efecto de que el sensor de luz (sensor de desplazamiento) es sólo sensible a las rotaciones ("rot 1", "rot 2") del tubo y no a las traslaciones ("tra"). El principio de funcionamiento es el mismo que el mostrado en la Fig. 1 en todos los demás aspectos. El espejo 7 que transmite en parte la luz (a menudo indicado "divisor de haz") está disponible en dos versiones:

un espejo que transmite parcialmente la luz, es decir, que transmite parte de la luz y refleja otra parte, independientemente de la dirección de polarización,

un divisor de haz polarizante que refleja una cierta dirección de polarización y transmite la dirección perpendicular a ella.

Es el último tipo el que se utiliza en reproductores de CD y que también requiere la adición de una placa 8 de cuarto de onda, que gira en la dirección de polarización del haz de luz de un láser polarizado (onda de entrada y retorno) en  $90^\circ$ .

La Fig. 2 muestra además que las funciones de convergencia y de colimación de "lente L2" y de "lente L3" se han combinado en una "lente L2 = L3", de modo que, al mismo tiempo, está resuelto el problema del espacio justo por encima de la superficie del espejo.

El principio de medición mostrado en las Fig. 1 y 2 puede usarse de la siguiente manera para medir los movimientos de Coriolis en un tubo de circulación. La explicación se basa en una célula quad, pero el proceso es similar para un PSD.

La Fig. 5 muestra una forma de tubo rectangular, pero el principio es aplicable a cualquier otra forma (véase, por ejemplo, el documento EP-A-1.719.982, Fig. 4-6). El tubo es inducido a vibrar alrededor de un eje principal de rotación "rot 1". La posición óptima del sensor de reflexión, en particular en la realización de la Fig. 1, que es algo sensible a las traslaciones, está entonces en el punto de intersección de dicho eje con el tubo ya que las traslaciones son mínimas allí. El movimiento de excitación hace que el punto reflejado en el sensor de luz se mueva en una primera dirección "tra 1" sobre la superficie fotosensible (Fig. 6a). Esto provoca un cambio en las cantidades de luz incidente sobre los segmentos A + D y B + C. La primera diferencia de (A + D) - (B + C), en consecuencia, cambia en el doble de esa cantidad: una medida diferencial.

Un flujo a través del tubo genera las fuerzas de Coriolis (F1, F2) en aquellas partes del tubo que son (en parte) perpendiculares al eje principal de rotación (rot 1) (véase la Fig. 5). Esto da lugar a la segunda rotación "rot 2" alrededor de un segundo eje que es perpendicular al primero (Fig. 5). El punto reflejado se mueve por ello en una segunda dirección "tra 2" perpendicular a la primera (Fig. 6a). Esto provoca un cambio en la cantidad de luz incidente sobre los segmentos A + B y C + D. La segunda diferencia de (A + B) - (C + D) cambia en el doble de la cantidad. La relación de la primera a la segunda diferencias es una medida para el flujo de masa a través del tubo.

La Fig. 6b muestra una realización alternativa en la que la célula de cuadrante ha sido girada  $45^\circ$  con respecto a las direcciones primera y segunda del movimiento del punto de luz. En este caso, la amplitud del primer movimiento se puede determinar a partir de la diferencia B-D y la del segundo movimiento de la diferencia de A-C. Esto cifra es ligeramente menos favorable que la versión de la Fig. 6a, ya que utiliza sólo dos campos para cada dirección, pero funciona. También es posible, en principio, reconstruir las dos direcciones de movimiento desde cualquier posición de la célula de cuadrante entre las Fig. 6a y 6b si se conoce el ángulo formado entre la dirección del movimiento y la célula quad.

Mediciones de mejora adicionales se refieren a la convergencia y a la forma del punto de luz incidente sobre la superficie de reflexión y la célula de cuadrante. Sin estas medidas, la segunda diferencia que se mencionó anteriormente en realidad sería más pequeña que la primera diferencia en muchos órdenes de magnitud (de 1.000 a 10.000 veces) y, en consecuencia, demasiado pequeña para servir como base para determinar el flujo másico.

Antes de una descripción de las medidas pertinentes es deseable explicar en breve tres conceptos ópticos básicos.

Concepto básico 1: convergencia - divergencia - cintura.

La convergencia del haz de luz aguas abajo de la lente L2 en la Fig. 1 hacia la superficie de reflexión también determina la divergencia, tras la reflexión. Dos haces de luz diferentes se muestran en la Fig. 7; los haces reflejados se han invertido a través de la superficie de reflexión por claridad. El haz 1 es menos convergente que el haz 2 y, en consecuencia, es más estrecho a una altura  $h$  dada por encima del espejo. También es evidente que la anchura del haz en el foco no es nunca completamente cero, sino que una anchura mínima o "cintura" permanece, siendo dicha cintura más estrecha en el haz más convergente.

Concepto básico 2: Anchura de haz – palanca óptica.

La divergencia más pequeña del haz 1 en la Fig. 7 da una mayor distancia entre la superficie de reflexión y la lente L3 posible: el diámetro  $D$  de un haz de luz está normalmente limitado por las dimensiones de las lentes utilizadas (sobre todo en una aplicación MST). El valor  $D$  máximo se alcanza a una mayor distancia  $h$  del espejo, en el caso del haz 1. La Fig. 8 muestra la ventaja de esto: dada una cierta rotación  $\alpha$  del espejo (=tubo), una mayor distancia  $h$  ( $h_2$  en lugar de  $h_1$ ) proporciona un mayor desplazamiento lateral del punto ( $s_2$  en lugar de  $s_1$ ). Esto aumenta consiguientemente la sensibilidad de un sensor de luz colocado en el camino del haz reflejado. La distancia  $h$  se designa también la "palanca óptica".

Concepto básico 3: lentes esféricas – cilíndricas - esféricas.

Una lente esférica cambia la convergencia de un haz de luz incidente en la misma cantidad en todas las direcciones; una lente cilíndrica en una sola dirección. La lente esférica es una forma intermedia. Una lente cilíndrica logra que un haz de luz redondo incidente resulte oval después de atravesar la lente, cuya ovalidad cambia con la distancia a la lente, pero lo más importante de la cuestión es que al haz de luz se le da en una convergencia/divergencia diferente en los diferentes planos que se pueden construir a través de la línea central del haz.

Estos conceptos básicos pueden servir para aclarar una serie de medidas de mejorar la sensibilidad de la medición. Medida de mejora 2: diferentes divergencias para las direcciones de excitación y de Coriolis.

La palanca óptica, es decir, la distancia entre la superficie de reflexión y el sensor de luz (o una "lente L3" colocada delante de los mismos en el haz reflejado), se ha ampliado para el movimiento de Coriolis a través del uso de lentes cilíndricas o esféricas, que sean colocadas de manera que la convergencia del haz de luz reflejado contra la pared del tubo es elegida para ser más pequeña en la dirección de Coriolis que en la dirección de excitación. Esto implica, en el caso de las lentes cilíndricas, que el eje longitudinal debe coincidir con el eje de rotación del movimiento de excitación.

Estas lentes (Fig. 1, "lente L2" y "lente L3") deberán ser colocadas tanto en el camino de la luz incidente como en el de la reflejada y se pueden combinar en una sola lente a través de la cual pasan el haz incidente y el reflejado (Fig. 2, "lente L2 = L3"). En una realización alternativa, puede usarse una superficie reflectante cóncava (reflector cóncavo o espejo cóncavo) en lugar de una lente. Esta medida es aplicable en una célula de cuadrante, así como también en un PSD.

Medida de mejora 3: optimizar la relación altura/anchura del punto sobre la célula de cuadrante.

Las lentes cilíndrica y/o esférica en las posiciones de lente L3 y lente L4 forman sobre la relación altura/anchura del punto de luz reflejado en la célula de cuadrante de tal manera que una cantidad mínima de luz pasa de una mitad a la otra mitad por unidad de desplazamiento en la dirección de excitación y una cantidad máxima en la dirección de Coriolis. Razón: una gran longitud de la carrera se desea en la dirección de excitación debido a los grandes desplazamientos, lo que da como resultado una baja sensibilidad de la célula de cuadrante en esta dirección, mientras que en la dirección de Coriolis una alta sensibilidad se desea en vista de los pequeños desplazamientos. No es sólo la convergencia descrita en la medida anterior, sino también la forma del punto en la célula de cuadrante lo que puede contribuir a esto.

5 La Fig. 9 muestra una célula circular con un diámetro D y un hueco g entre los cuadrantes (pero el efecto es el mismo para una célula con forma cuadrada o diferente). Cuando el movimiento de excitación del punto tiene lugar en la dirección "tra 1", una cantidad mínima de la superficie iluminada se desplazará desde la mitad derecha a la mitad izquierda por unidad de desplazamiento si el punto está en su parte más ancha en esa dirección. Dado un valor entre crestas de la amplitud del movimiento de excitación Ae, la máxima anchura posible del punto está dada por:

$$\text{anchura del punto de luz (excitación) } b1 = D1 - g - Ae$$

10 En la dirección de Coriolis (Fig. 9, "tra 2") es deseable desplazar otro tanto la superficie específica iluminada desde la mitad inferior a la mitad superior para un pequeño desplazamiento del punto. Esto requiere un pequeño tamaño del punto de luz en esta dirección. El alcance de la carrera aquí no constituye de hecho una limitación de la práctica. Dado un valor entre crestas de la amplitud del movimiento de Coriolis Ac a flujo máximo, la mínima altura posible del punto de luz viene dada por:

$$\text{anchura del punto de luz (Coriolis) } b2 = g + Ac$$

20 Obviamente, tienen que observarse algunos márgenes en la práctica debido a las tolerancias de ajuste y a las alinealidades. Además, debería impedirse que el punto de luz sea representado por una imagen completamente en una mitad de la célula para cualquier amplitud.

Medida de mejora 4: optimizar la relación entre el ángulo de divergencia y el radio de la cintura, ambos para la dirección de Coriolis.

25 El ángulo de divergencia del punto de luz representado por imagen sobre la pared del tubo multiplicado por la distancia entre la pared del tubo y la "lente L3" colimadora situada en el camino de reflexión se escoge para que sea pequeña en la dirección de Coriolis comparada con la anchura de la cintura del haz de luz en la dirección de Coriolis en la superficie de la pared del tubo. Sólo si se satisface esta condición se estará utilizando de forma óptima la palanca óptica. Razones: esto se demuestra con referencia a la Fig. 10. El haz de luz ilumina un punto en la superficie de reflexión 2 unida a un tubo 1 (no mostrado) que realiza pequeñas rotaciones oscilatorias  $\beta$  en la dirección de Coriolis. Una lente convergente (no mostrada) está dispuesta en el haz de entrada con el resultado de que el haz reflejado diverge con un ángulo de divergencia  $\delta$ . Este se transforma mediante una lente colimadora L3 en un haz colimado que está dirigido al sensor de luz 4 del tipo de célula de cuadrante. La distancia entre la "lente L3" y la célula de cuadrante 4 es irrelevante debido a que el haz sólo experimenta cambios paralelos después de la lente L3.

35 Debido a cambios en el ángulo del tubo  $\beta$ , el centro del punto de luz es desplazado en una distancia "y" en la célula de cuadrante. Se describió con referencia a la medida 2 que este desplazamiento puede incrementarse por medio de una palanca óptica. Se describió con referencia a la medida 3 que el radio del punto de luz en la célula de cuadrante en la dirección de Coriolis debe estar por encima de un cierto mínimo. La relación entre este desplazamiento y este radio se da por la ecuación de más abajo, con el producto del ángulo del tubo  $\beta$  por la palanca óptica h en el numerador y el radio r del punto de luz en el denominador, siendo este radio la suma del radio de la cintura  $r_0$ , y el producto del ángulo de divergencia  $\delta$  por la distancia de la lente h. La relación entre el numerador y el denominador es una medida de la sensibilidad, es decir, la cantidad de superficie específica iluminada que es desplazada desde una mitad de la célula de cuadrante a la otra.

$$45 \quad \frac{y}{r} = \frac{2 \cdot \beta \cdot h}{\delta \cdot h + r_0}$$

50 Es evidente de la ecuación que la distancia h como longitud de palanca se elimina del numerador y del denominador si el radio de la cintura  $r_0$ , es pequeño respecto al producto del ángulo de divergencia por la distancia a la lente h. Al contrario, un alto valor de  $r_0$  conduce a un pequeño valor de  $\delta$  (ángulo de divergencia), y por eso para una acción de la palanca hacia arriba corresponde un elevado valor de h. Sin embargo, un pequeño valor da entonces una menor sensibilidad que en el caso de un elevado valor de  $r_0$ . Esta condición es la cuarta medida de mejora, que es aplicable sólo en una célula de cuadrante no en un PSD.

5 La Fig. 11 muestra una realización particularmente sencilla a la que la primera y segunda medidas de mejora puede aplicarse, es decir el espejo que transmite parcialmente luz y la palanca óptica h. El sensor de movimiento reflectante se coloca no en el centro de rotación de "rot 1" ahora, como se muestra en la Fig. 5, sino fuera de este centro. En el estado base, 50% del haz de luz reflejada cae fuera del sensor de luz en esta realización. Este porcentaje se hace mayor o menor por la combinación de traslación "tra" (en versiones sin espejo que transmite luz parcialmente) y de rotación  $\beta$ . El sensor de luz puede ser un único fotodiodo o fototransistor convencional en este caso, por eso ni célula de cuadrante ni PSD. No es posible ahora medir el desplazamiento y/o rotación angular del tubo 1 (no mostrado) al que está unida la superficie de reflexión 2, en dos direcciones separadas con un único sensor de movimiento (detector de desplazamiento). Varios de esos detectores se requieren en una o varias posiciones del tubo. Esto es comparable al método descrito en el documento EP-A-1.719.983, pero con sensores de movimiento de reflexión en lugar de transmisión.

Medida de mejora 5:

15 Esta medida se refiere a una disposición en la que el haz de luz convergente no está enfocado sobre la superficie de reflexión 2 del tubo 1 (no mostrado), o sobre la pared de tubo, sino que el punto de máxima convergencia (la "cintura") se sitúa en un punto del haz en el camino reflejado entre el tubo (su superficie de reflexión) y el sensor de luz 4. La Fig. 12 muestra el principio. La luz de la fuente de luz 3 está dirigida sobre el tubo 2 por medio de lentes L11 y L12. En el camino de la luz reflejada contra el tubo una lente L13 (de colimación) está dispuesta en una posición entre el tubo y el sensor de luz 4. El sensor de luz 4 podía estar alternativamente dispuesto directamente en esta posición.

20 La diferencia entre esta Fig. y las Fig. previas 1 y 10 es que sólo las dos últimas muestran la situación en la que el enfoque tiene lugar sobre la pared del tubo, es decir el foco (o cintura) del haz coincide con el punto de reflexión (pared del tubo). En lugar de la longitud h de la Fig. 10 ahora hay dos distancias relevantes diferentes, que son referenciadas h1 y h2 en la Fig. 12.

25 La ventaja de esto puede aclararse con referencia a la función sensibilidad  $y/r$  discutida en la medida de mejora 4. El numerador y de la misma contiene la palanca óptica h1, que es todavía la distancia entre la pared del tubo y el sensor de luz (por ejemplo una célula de cuadrante) o una lente colimadora colocada enfrente del mismo también en el caso de que el foco no esté sobre la pared del tubo. El denominador r es el radio del punto representado por imagen que está determinado parcialmente por la distancia h2 entre el foco y el sensor de luz o una lente colimadora colocada en el frente del mismo. En el caso de enfocar sobre la pared del tubo se tiene que : h1=h2=h.

30 De ese modo, la función de sensibilidad resulta ser:

$$\frac{y}{r} = \frac{2 \cdot \beta \cdot h_1}{\delta \cdot h_2 + r_0}$$

35 En la situación de la Fig. 12, la distancia h1 es mayor que h2, y la sensibilidad  $y/r$  es, consecuentemente, mayor que si el enfoque tuviera lugar sobre la pared del tubo. La sensibilidad puede incrementarse un número de veces en esta manera respecto a la situación en la que el enfoque tiene lugar sobre la pared del tubo.

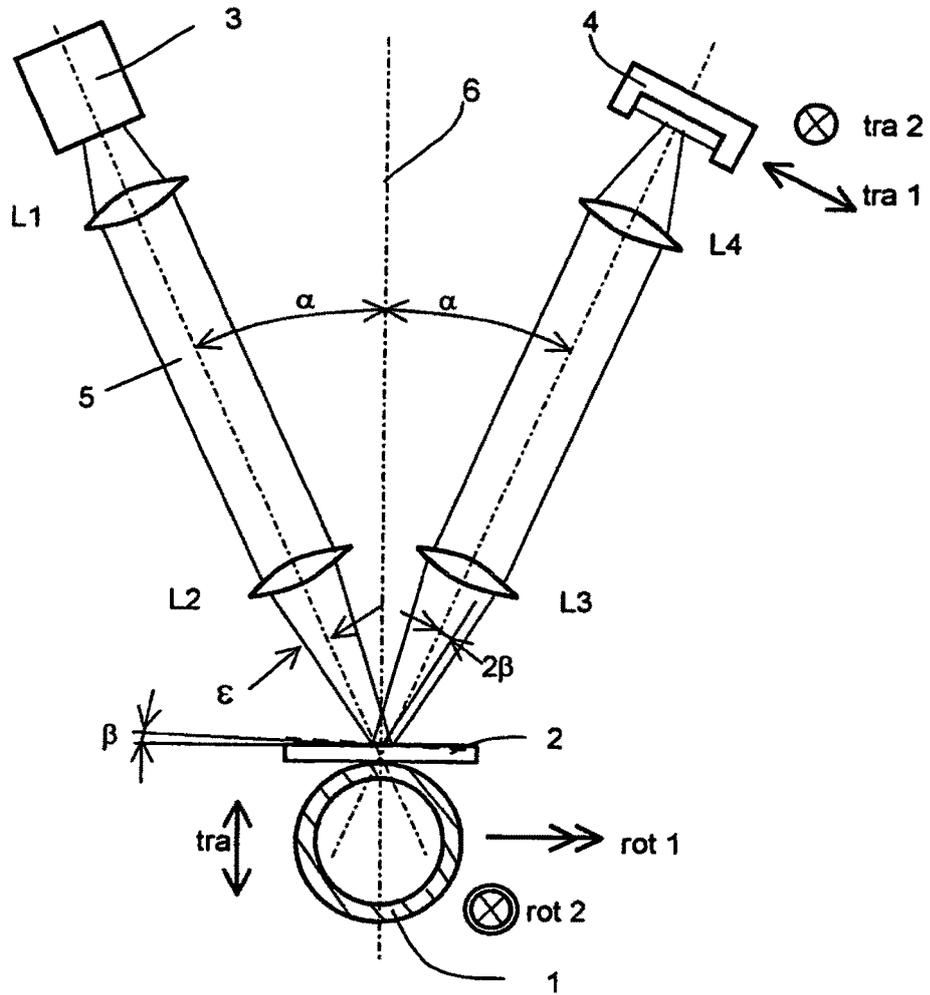
40 El principio es ventajoso especialmente en la dirección de Coriolis del movimiento del haz, que puede lograrse por medio de lentes cilíndricas o esféricas.

Una lente colimadora opcional dispuesta en el camino de luz reflejada se mencionaba anteriormente. La Medida 5 es también eficaz en principio si esta lente es convergente o divergente.

45 En resumen, la invención ofrece un sensor de circulación de efecto Coriolis con al menos un tubo de circulación vibrante a través del que circule un medio, cuyo sensor de circulación comprende medios para excitar el tubo, y medios de detección ópticos para determinar los movimientos de uno o varios puntos del tubo basado en el principio de reflexión de un haz de luz contra la superficie fotosensible de un sensor de luz, cuyo haz de luz está dirigido a la pared del tubo, a una capa dispuesta en esta pared, o a un elemento fijado contra esta pared, en el que se dispone de medios para conformar el haz para hacer la convergencia del haz en la dirección de movimiento del tubo asociado con fuerzas de Coriolis más pequeñas que la convergencia en la dirección del movimiento del tubo asociado con las fuerzas de excitación. Con ello, se mejora la sensibilidad en la detección de pequeños movimientos del tubo, causados por las fuerzas de Coriolis. Más particularmente, los medios para conformar el haz están dispuestos de tal manera que el sensor detectará no sólo desplazamientos (traslaciones) del tubo (puntos del tubo), sino también, o incluso exclusivamente, rotaciones del tubo (puntos del tubo).

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Un sistema sensor de circulación de Coriolis con un tubo de circulación vibrante (1), a través del cual circula un medio, cuyo sensor de circulación comprende medios de excitación para inducir una vibración en el tubo (1), medios ópticos de detección para la determinación de los movimientos de al menos un punto del tubo (1), comprendiendo dichos medios ópticos de detección una fuente de luz (3) que tenga un haz de luz (5) incidente sobre la pared del tubo, sobre una capa dispuesta en esta pared, o en un elemento unido a esta pared, y un sensor de luz (4) que tiene una superficie fotosensible para la detección de la luz del haz de luz (5) después de la reflexión contra la pared del tubo, una capa dispuesta en esta pared, o un elemento unido a esta pared, caracterizado porque los medios para formar el haz (5) están dispuestos para hacer la convergencia del haz (5) en la dirección del movimiento del tubo (1) asociado a la fuerzas de Coriolis más pequeña que la convergencia en la dirección del movimiento del tubo (1) asociado con las fuerzas de excitación.
- 10 2. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 1, caracterizado porque los medios de formación del haz (5) comprenden un componente óptico dispuesto en el haz de luz incidente.
- 15 3. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 2, caracterizado porque el componente óptico comprende al menos una lente convergente (L2) cilíndrica o esférica.
4. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 1, caracterizado porque el ángulo formado entre el haz de luz incidente y el haz de luz reflejado es mayor que  $0^\circ$  y menor de  $60^\circ$ .
- 20 5. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 1, caracterizado porque el ángulo formado entre el haz de luz incidente y el reflejado es  $0^\circ$ .
6. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 5, caracterizado porque un espejo que transmite parcialmente la luz está dispuesto para hacer el ángulo formado entre el haz de luz incidente y el reflejado  $0^\circ$ .
- 25 7. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 5, caracterizado porque un divisor de haz polarizante (7) está dispuesto para hacer el ángulo formado entre el haz de luz incidente y el reflejado de  $0^\circ$ , y porque una placa de cuarto de longitud de onda (8) que gira la dirección de polarización de la luz pasando dos veces por  $90^\circ + n$  veces  $180^\circ$  está dispuesta en el haz de luz entre dicho divisor de haz (7) y el tubo (1).
- 30 8. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 2, caracterizado porque el componente óptico está dispuesto de tal manera que la relación altura / anchura del haz de luz reflejado sobre el sensor de luz (4) es tal que la dimensión del punto en la dirección asociada con el movimiento de Coriolis es sustancialmente menor que la dimensión del punto en la dirección asociada con el movimiento de excitación.
9. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 8, caracterizado porque el componente óptico comprende al menos una lente cilíndrica o esférica.
- 35 10. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 2, caracterizado porque el componente óptico está dispuesto de tal manera que el producto de la divergencia del punto representado sobre la pared del tubo por la distancia medida en la dirección de Coriolis entre la pared del tubo y una lente de colimación (L3) colocada en el camino de la reflexión es pequeño con respecto a la anchura de la cintura del haz de luz en la dirección de Coriolis en la posición de la pared del tubo.
- 40 11. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 2, caracterizado porque el componente óptico está dispuesto de tal manera que el producto de la divergencia del haz de luz por la distancia en la dirección de Coriolis entre el foco de dicho haz y el sensor de luz es menor que la anchura de la cintura del haz de luz en la dirección de Coriolis en la posición del foco, estando dicho foco en el camino de la luz reflejada entre el tubo y el sensor de luz.
12. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 11, en el que un elemento óptico adicional está dispuesto en el camino de la luz reflejada.
- 45 13. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 1, caracterizado porque el sensor de luz es una célula segmentada en la que se crea una imagen del haz de luz completo.
14. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 13, caracterizado porque dicha célula segmentada está dispuesta como una célula de cuadrante.
- 50 15. Un sensor de circulación de Coriolis según la reivindicación 1, caracterizado porque sólo una parte del haz de luz reflejado se representa como imagen sobre la superficie fotosensible del sensor de luz (4), y se proporcionan medios para determinar la fracción de la luz incidente sobre el sensor de luz, que es una medida de los movimientos del punto del tubo.



**Fig. 1**

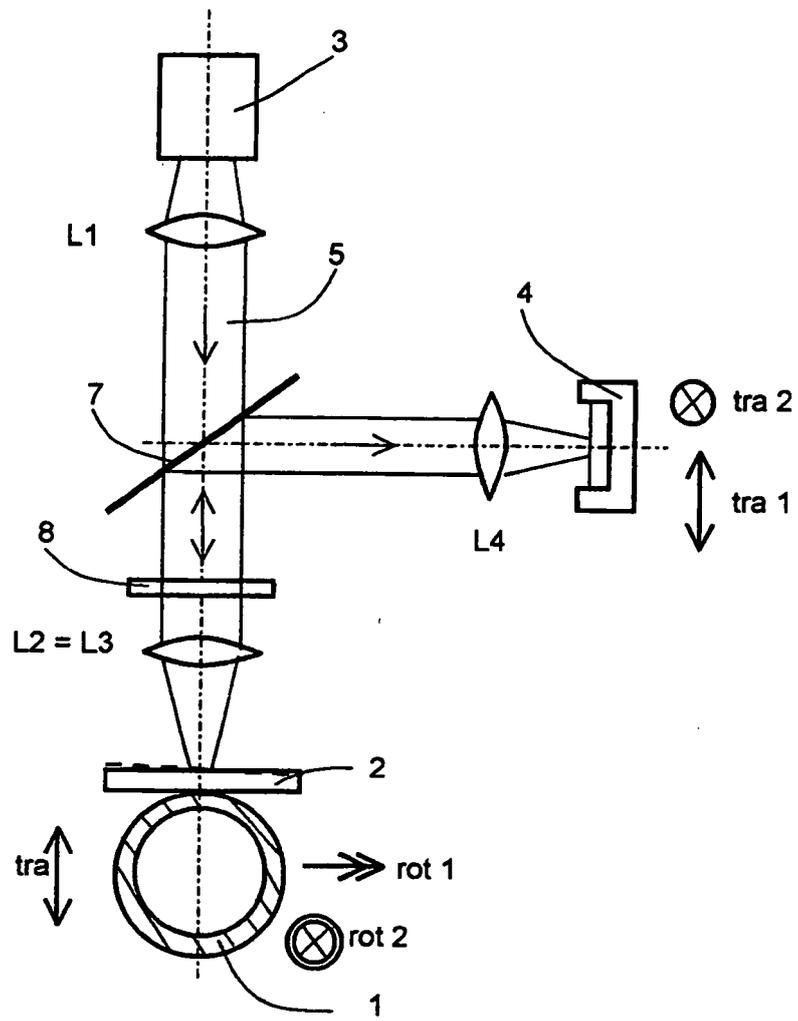


Fig. 2

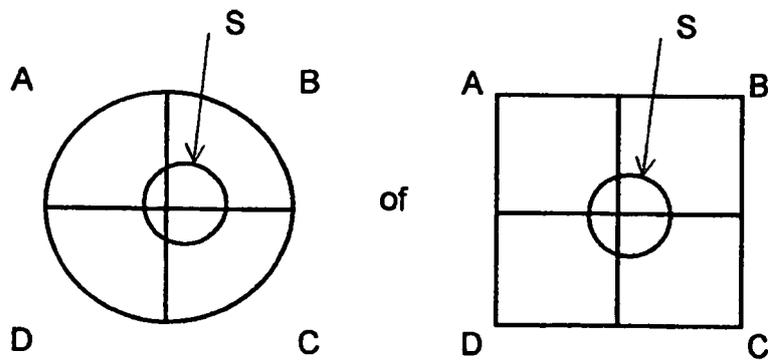


Fig. 3

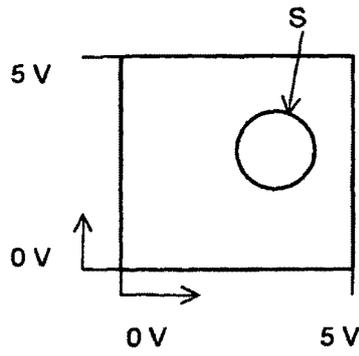


Fig. 4

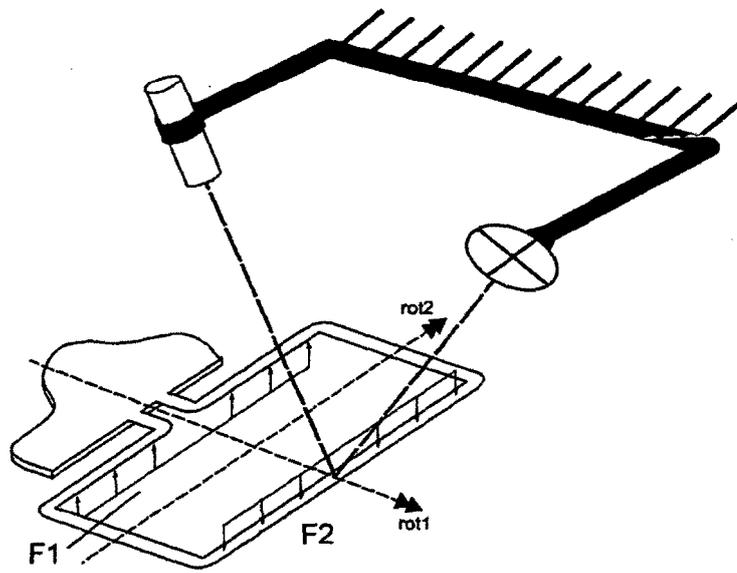


Fig. 5

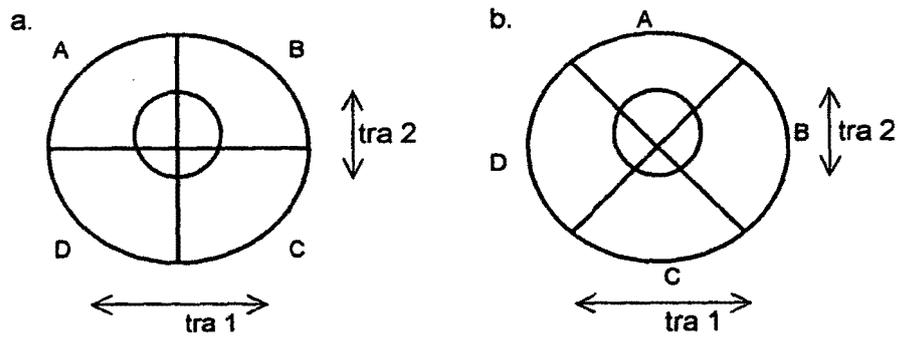


Fig. 6

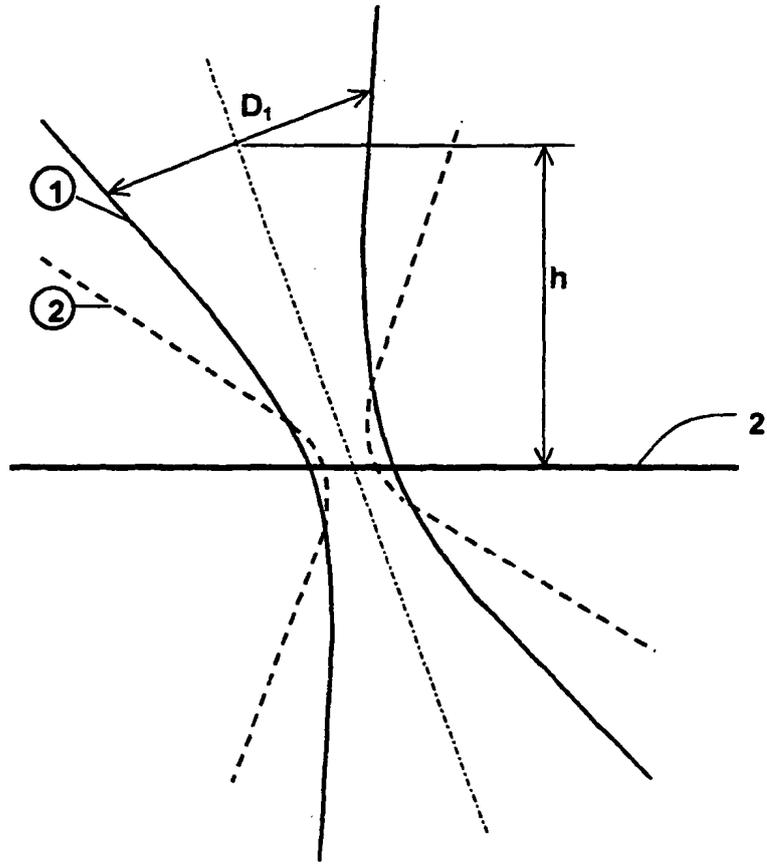


Fig. 7

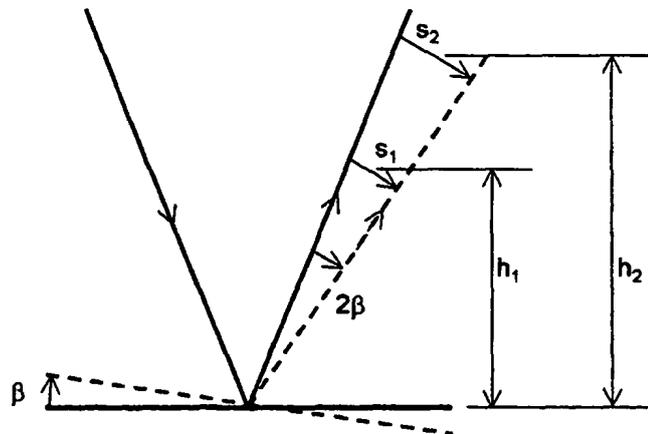
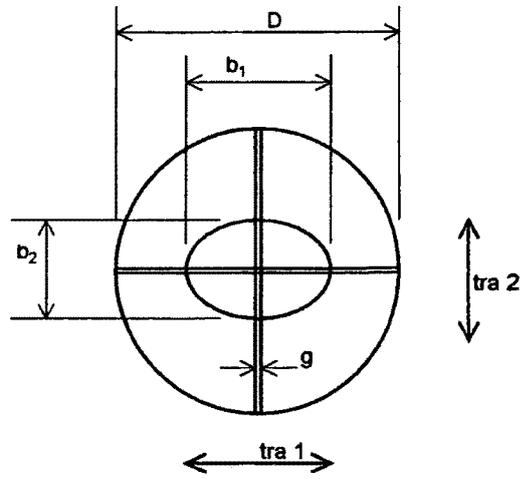
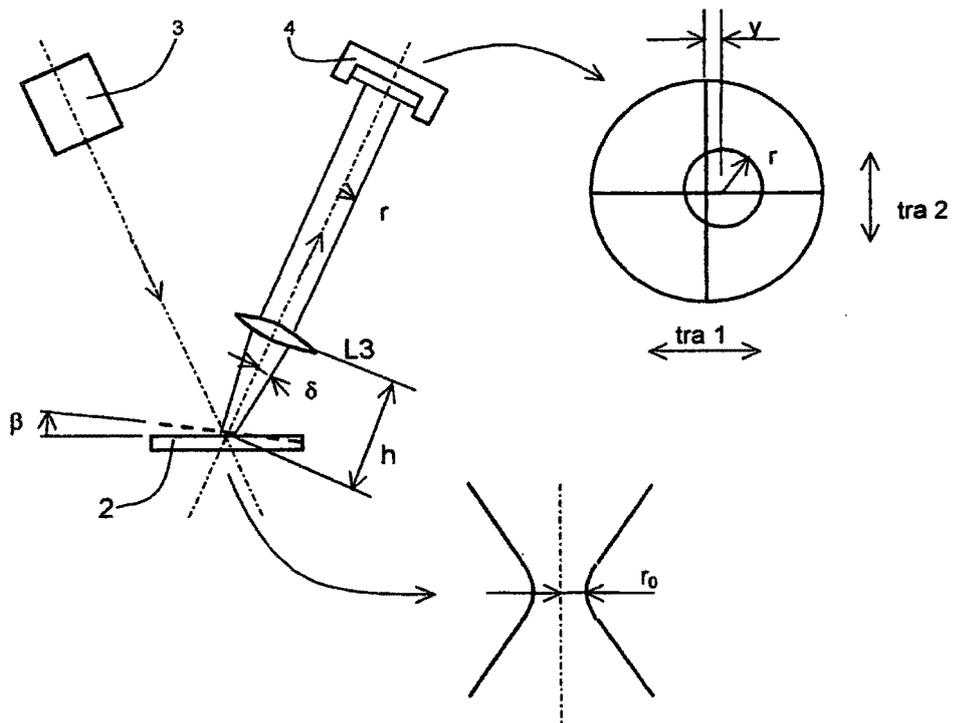


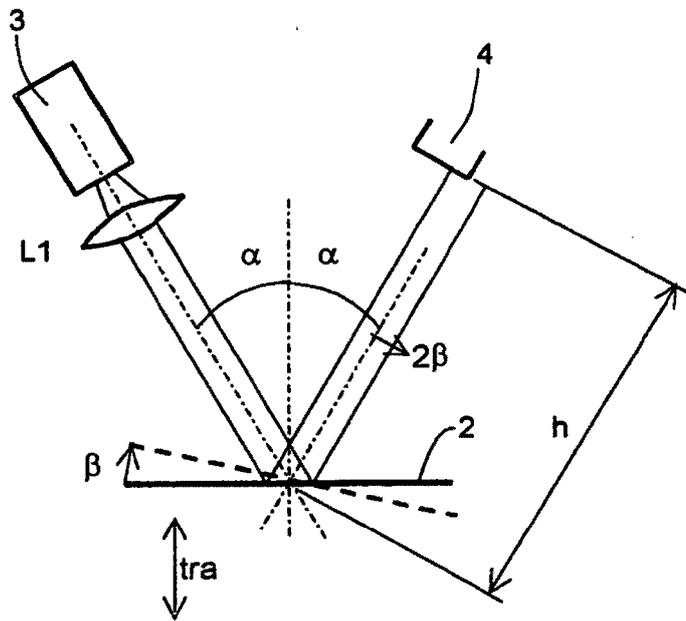
Fig. 8



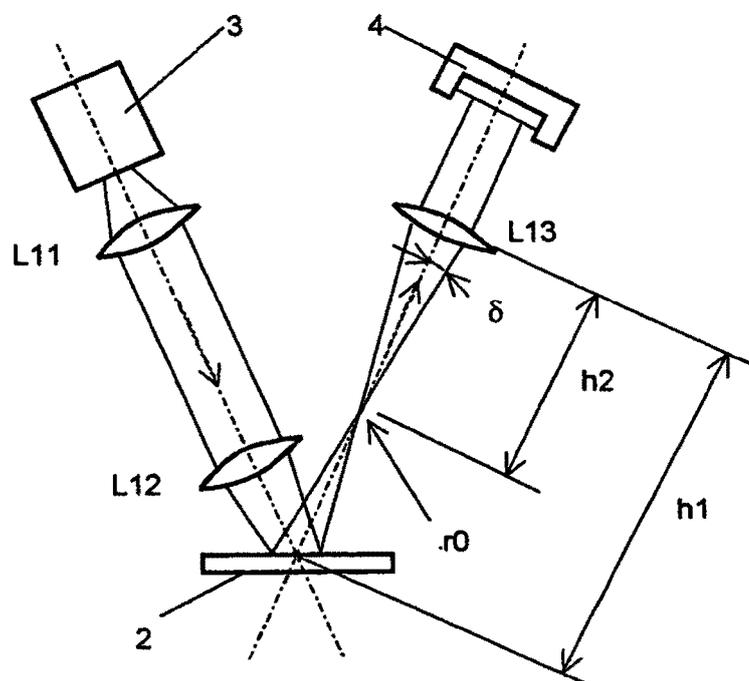
**Fig. 9**



**Fig. 10**



**Fig. 11**



**Fig. 12**