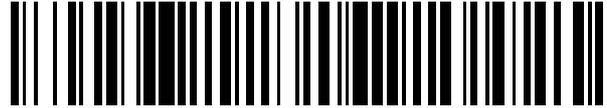


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 461 188**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.01.2012 E 12000514 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.03.2014 EP 2620742**

54 Título: **Procedimiento para medir longitudes absolutas y dispositivo para medir longitudes**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.05.2014

73 Titular/es:

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND,
VERTRETEN DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM
FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE, DIESES
VERTRETEN DURCH DEN PRÄSIDENTEN DER
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN
BUNDESANSTALT (100.0%)
Bundesallee 100
38116 Braunschweig, DE**

72 Inventor/es:

**MEINERS-HAGEN, KARL y
POLLINGER, FLORIAN**

74 Agente/Representante:

ZUAZO ARALUZE, Alexander

ES 2 461 188 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para medir longitudes absolutas y dispositivo para medir longitudes.

5 La invención se refiere a un procedimiento relativo a un dispositivo para medir longitudes, en particular para medir longitudes absolutas.

10 Según un segundo aspecto, se refiere la invención a un dispositivo para medir longitudes absolutas con (a) una fuente de luz para generar un primer rayo y al menos un segundo rayo (b) un dispositivo para generar un decalaje de frecuencias, para generar un decalaje de frecuencias distinto de cero entre ambos rayos, (c) una trayectoria de medida, en la que cuando opera el dispositivo de medición de longitudes absolutas discurre al menos uno de los rayos y (d) al menos un detector, que está dispuesto tal que sobre el mismo se interfieren el primer y el segundo rayos, tal que resulta al menos una señal de batido, en base a la cual puede determinarse una longitud absoluta de la trayectoria de medida.

15 Existen sistemas de medición de longitudes que realizan mediciones absolutas y otros que realizan mediciones relativas. Mientras que los sistemas de medición de longitudes que realizan mediciones relativas, por ejemplo en forma de interferómetros de láser, logran elevadas precisiones y tienen una estructura comparativamente sencilla y por lo tanto son económicos, los sistemas de medición de longitudes que realizan mediciones absolutas son muy costosos o bien claramente más imprecisos que los sistemas que realizan mediciones relativas.

20 Por el artículo "Rapid and precise absolute distance measurements at long range" (Mediciones de distancia absoluta rápidas y precisas en un amplio rango), de Coddington y colab., Nature Photonics, vol. 3, junio 2009, se conoce un procedimiento en el que se combina una medición del tiempo de recorrido con un procedimiento interferométrico. No hay referencia alguna a la separación selectiva por filtrado de líneas del peine de frecuencias.

25 Por el artículo "A distance meter using a terahertz intermode beat in an optical frequency comb" (Distanciómetro que utiliza un batido intermodal de terahertzios en un peine de frecuencias ópticas) de Yokoyama y colab. Optics Express, vol. 17, 20, 28.09.2009 se conoce la mezcla de frecuencias ópticas de dos peines de frecuencias, que están ligeramente desplazados entre sí, mediante un cristal no lineal, tal que resulta una señal de radiofrecuencia. En base a la señal de radiofrecuencia puede determinarse una longitud absoluta. En este procedimiento es un inconveniente que tengan que utilizarse dos láser de peines de frecuencias.

30 La invención tiene como tarea básica proponer un aparato medidor de longitudes adecuado para medir longitudes absolutas, de estructura comparativamente sencilla y que logre una elevada precisión de medida.

35 La invención soluciona el problema mediante un procedimiento para medir longitudes, en particular para medir longitudes absolutas, con las etapas (a) generación de un peine de frecuencias, que puede describirse como compuesto por una pluralidad de líneas de peine equidistantes, a continuación (b) separación por filtrado de cada línea de peine número n del peine de frecuencias, tal que resulta un primer rayo y (c) separación por filtrado de cada línea de peine número m del peine de frecuencias, tal que resulta un segundo rayo, (d) generación de un decalaje de frecuencias distinto de cero entre ambos rayos, (e) emisión de al menos una parte de al menos uno de los rayos sobre una trayectoria de medida, (f) hacer interferir el primer rayo y el segundo rayo, tal que al menos resulta una señal de batido y (g) cálculo de la longitud absoluta a partir de la señal de batido, de las que al menos hay una.

40 Es una ventaja de la invención que como fuente de luz se necesite solamente un láser de femtosegundos. Los interferómetros de longitudes de ondas múltiples precisan de una pluralidad de longitudes de onda ópticas sintonizadas entre sí, que deben realizarse mediante una pluralidad de fuentes de luz. Esto convierte a la estructura en compleja y por el contrario los láser de femtosegundos son de estructura sencilla.

45 Además es ventajoso que puedan lograrse precisiones que hasta ahora sólo podían lograrse con sistemas de medición de longitud relativa. La invención posibilita por ejemplo dotar un aparato medidor de coordenadas de un aparato medidor de longitudes correspondiente a la invención, logrando así directamente las máximas precisiones de medida. Los sistemas de medida utilizados hasta ahora son prescindibles.

50 Además es posible utilizar el sistema de medición de longitudes correspondiente a la invención en máquinas herramienta o alineadores de máscaras (mask-aligner) en la fabricación de chips, donde se necesita la máxima precisión. Otra ventaja adicional de la invención es que la misma se realiza con pocos componentes, siendo por ello muy robusta.

55 Por ejemplo puede discurrir la trayectoria de medida hacia un retroreflector y de retorno. El sistema de medición de longitudes correspondiente a la invención puede ser por ejemplo parte de un laser-tracker (rastreador de láser) o laser-tracer (trazador de láser). En otras palabras, puede posicionarse el retroreflector automáticamente en el espacio y/o en el plano. En particular incluye el dispositivo de medición de longitudes absolutas un dispositivo posicionador del reflector para posicionar el retroreflector en el espacio y/o en el plano y un dispositivo de

seguimiento para realizar el seguimiento del rayo láser, tal que la trayectoria de medida siempre discurre hacia el retroreflector.

5 Según un segundo aspecto, soluciona la invención el problema mediante un dispositivo de medición de longitudes absolutas de tipo genérico en el que la fuente de luz (i) es un dispositivo generador de un peine de frecuencias, para emitir un peine de frecuencias que puede describirse como compuesto por una pluralidad de líneas de peine equidistantes, (ii) un primer dispositivo de filtrado del peine de frecuencias, para separar por filtrado cada línea de peine número n del peine de frecuencias, con lo que resulta un primer rayo y (iii) un segundo dispositivo de filtrado del peine de frecuencias para separar por filtrado cada línea del peine número m del peine de frecuencias, con lo que resulta un segundo rayo.

10 A continuación se describirá la invención más en detalle en base a una forma de ejecución. Las hipótesis realizadas relativas a los parámetros en el curso de la explicación, no han de entenderse como limitaciones de la idea general de la invención, sino solamente como mejoras ventajosas.

15 Etapa (a):

20 Primeramente se genera un peine de frecuencias. Un peine de frecuencias puede considerarse como un rayo láser que emite luz en forma de impulsos cortos de anchura fija y frecuencia de repetición fija. Un peine de frecuencias puede describirse como compuesto por una suma de frecuencias de peine. La frecuencia ν_k de la línea de peine número k es

$$\nu_k = f_{CEO} + k f_{rep} \quad (\text{fórmula 1})$$

25 siendo k un índice correlativo de números naturales. Puesto que el peine de frecuencias posee una envolvente, no comienza k en cero, sino en un número natural mayor.

Etapa (b):

30 Del peine de frecuencias se separa a continuación por filtrado cada línea de peine número n, con lo que resulta un primer rayo S_1 . El primer rayo S_1 tiene los siguientes componentes de frecuencias:

$$\nu_{S1,k1} = f_{CEO} + k_1 n f_{rep} \quad (\text{fórmula 2})$$

35 Aquí n es un número natural fijo y k_1 es un índice correlativo $k_1 = 0, 1, 2, \dots$. Para separar por filtrado se utiliza por ejemplo un estalón que está estabilizado a una primera frecuencia de resonancia $f_{cav,1}$ con

$$f_{cav,1} = n f_{rep} \quad (\text{fórmula 3})$$

40 Etapa (c):

Del peine de frecuencias se separa por filtrado además cada línea de peine número m, con lo que resulta un segundo rayo S_2 . El segundo rayo S_2 tiene los siguientes componentes de frecuencias

$$45 \nu_{S2,k2} = f_{CEO} + k_2 m f_{rep} \quad (\text{fórmula 4})$$

Aquí es m \neq n un número natural fijo y k_2 un índice correlativo $k_2 = 0, 1, 2, \dots$. Para simplificar (y sin limitar el carácter general), son n y m primos entre sí. Para la separación por filtrado se utiliza por ejemplo un estalón estabilizado a una frecuencia de resonancia $f_{cav,2}$ con

$$50 f_{cav,2} = m f_{rep} \quad (\text{fórmula 5})$$

Etapa (d):

55 Se genera además un decalaje de frecuencias Δf_{AOM} entre ambos rayos. El decalaje de frecuencias Δf_{AOM} puede generarse directamente mediante un AOM. También es posible que un primer AOM genere para el primer rayo S_1 un decalaje de frecuencias $f_{A-OM,1}$, con lo que primer rayo S_1 tiene entonces los siguientes componentes de frecuencias

$$60 \nu_{S1,k1} = f_{CEO} + k_1 n f_{rep} + f_{AOM,1} \quad (\text{fórmula 6})$$

En el ejemplo se modula sobre el segundo rayo S_1 una segunda frecuencia de modulación $f_{AOM,2}$, con lo que el segundo rayo S_1 tiene entonces los siguientes componentes de frecuencias:

$$65 \nu_{S2,k2} = f_{CEO} + k_2 m f_{rep} + f_{AOM,2} \quad (\text{fórmula 7})$$

Resulta entonces el decalaje de frecuencias Δf_{AOM}

$$\Delta f_{AOM} = f_{AOM,2} - f_{AOM,1} \quad (\text{fórmula 8})$$

5 Etapa (e):

Al menos un fragmento de rayo de al menos uno de los rayos, por ejemplo S_1 , se envía a través de una trayectoria de medida de la longitud de trayectoria de medida L. Bajo trayectoria de medida se entiende una trayectoria que recorre al menos uno de los rayos y que varía cuando varía la longitud a medir. Por ejemplo discurre la trayectoria de medida hacia un retroreflector y de retorno.

10 Cuando varía la longitud de la trayectoria de medida, varía la fase de la luz en el rayo que ha recorrido la trayectoria de medida. Esto da lugar, tal como se calcula bastante más abajo, a una pluralidad de efectos de interferencia.

15 El envío de al menos un fragmento de rayo de uno de los rayos sobre una trayectoria de medida se realiza en particular tal que la trayectoria de medida es parte de un interferómetro heterodino, en el que corren los rayos S_1, S_2 . A continuación se toma como base una estructura de heterodino, pero también una estructura de homodino corresponde a la invención.

20 Supongamos por ejemplo que recorre un fragmento de rayo S_1^R del primer rayo S_1 una primera trayectoria de referencia de la longitud z_1^R y un fragmento de rayo S_2^R del segundo rayo S_2 recorre una segunda trayectoria de referencia de la longitud z_2^R . El índice superior R representa la trayectoria de referencia. Ambos rayos se interfieren en el fragmentador del rayo 30 (ver más abajo).

25 El fragmento de rayo que queda S_1^M del rayo S_1 se lleva sobre la trayectoria de medida que tiene la longitud de trayectoria de medida L. El mismo recorre entonces la trayectoria óptica z_1^M antes de interferir con la señal de referencia, que previamente ha recorrido la trayectoria óptica fija S_2^M . El índice superior M representa la trayectoria de medida.

30 Etapa (f):

Los rayos que interfieren en cada caso se conducen a detectores (36, 64), donde los mismos generan una señal de medida o bien de referencia en forma de una señal eléctrica.

35 Puesto que ambos rayos incluyen numerosas frecuencias, resulta una señal de batido (Schwebung), que igualmente incluye numerosas frecuencias.

$$f_{Schwebung} = |v_{S1} - v_{S2}| \quad \text{aporta} \quad (\text{fórmula 9})$$

$$40 \quad f_{Schwebung} = |f_{CEO} + k_1 n f_{rep} + f_{AOM,1} - (f_{CEO} + k_2 m f_{rep} + f_{AOM,2})| \\ = |f_{rep}(k_1 n - k_2 m) - \Delta f_{AOM}| \quad (\text{fórmula 10})$$

utilizando la fórmula 6 y la fórmula 7.

45 La provocación de la interferencia se realiza preferiblemente tal que los fragmentos del rayo que han recorrido las trayectorias de referencia (aquí: S_1^R, S_2^R), se llevan sobre un detector de referencia y tal que el fragmento de rayo S_1^M se lleva a realizar interferencia con otro fragmento de rayo en un fragmentador de rayo (por ejemplo en el fragmentador de rayo 58, ver más abajo)

50 Tanto en los detectores de referencia como también en los detectores de medida, se encuentran ahora todas las señales de interferencia de las frecuencias ópticas de los peines. El campo eléctrico $E_{S_j}(j = 1,2)$ de un peine de frecuencias puede describirse mediante la superposición de las intensidades de campo $E_{S_j,k_j}(v_{S_j,k_j}, z, t)$ de los distintos modos de peine:

$$55 \quad E_{S_j}(z, t) = \sum_{k_j} E_{S_j,k_j}(v_{S_j,k_j}, z, t) \quad (\text{fórmula 11})$$

Cuando recorre el rayo S_j la trayectoria z_j , entonces pueden describirse las distintas amplitudes en el plano de los números complejos mediante

$$E_{S_j}(v_{S_j,k_j}, z, t) = E_{S_j,k_j}^0 \exp(-i(\tilde{\varphi}_{S_j,k_j}(z_j, t) - 2\pi v_{S_j,k_j} t)) \quad (\text{fórmula 12})$$

El término de fase $\tilde{\varphi}_{S_j,k_j}(z_j, t)$ está compuesto por perturbaciones que son función del tiempo y un término de fase que depende de la trayectoria óptica z_j y de la frecuencia v_{S_j,k_j} del correspondiente rayo S_j

$$\varphi_{S_j,k_j}(z_j) = \frac{2\pi v_{S_j,k_j}}{c} z_j := K_j z_j \quad (\text{fórmula 13})$$

Rige por lo tanto

$$\tilde{\varphi}_{S_j,k_j}(z_j, t) = \tilde{\varphi}_{S_j,k_j}^{\text{rand}}(t) + \varphi_{S_j,k_j}(z_j) \quad (\text{fórmula 14})$$

Si sólo interfieren con carácter muy general los rayos S_1 y S_2 , entonces resulta como campo eléctrico E_{S_1,S_2} sobre el fotodiodo

$$E_{S_1,S_2}(z_1, z_2, t) = \sum_{k_1} E_{S_1,k_1}(v_{S_1,k_1}, z_1, t) + \sum_{k_2} E_{S_2,k_2}(v_{S_2,k_2}, z_2, t) \quad (\text{fórmula 15})$$

La señal eléctrica resultante del fotodiodo es proporcional a la intensidad I que se presenta de

$$I(z_1, z_2, t) = c\epsilon\epsilon_0 E_{S_1,S_2}(z_1, z_2, t) E_{S_1,S_2}^*(z_1, z_2, t) \quad (\text{fórmula 16})$$

El asterisco * designa la conjugación compleja. Aplicando la fórmula 15 a la fórmula 16, resultan los siguientes términos de autointerferencia (selbst) y de mezcla (misch)

$$\begin{aligned} I(z_1, z_2, t) &= |I_{S_1}^{\text{selbst}}(z_1, t) + I_{S_2}^{\text{selbst}}(z_2, t)| + (I_{S_1 S_2}^{\text{misch}}(z_1, z_2, t) + I_{S_2 S_1}^{\text{misch}}(z_2, z_1, t)) \\ &= c\epsilon\epsilon_0 \sum_{k_1} \left[E_{S_1,k_1}(v_{S_1,k_1}, z_1, t) \left(\sum_{k_2} E_{S_1,k_2}(v_{S_1,k_2}, z_1, t) \right)^* + E_{S_2,k_1}(v_{S_2,k_1}, z_2, t) \left(\sum_{k_2} E_{S_2,k_2}(v_{S_2,k_2}, z_2, t) \right)^* \right] + \\ & c\epsilon\epsilon_0 \sum_{k_1} \left[E_{S_1,k_1}(v_{S_1,k_1}, z_1, t) \left(\sum_{k_2} E_{S_2,k_2}(v_{S_2,k_2}, z_2, t) \right)^* + E_{S_2,k_1}(v_{S_2,k_1}, z_2, t) \left(\sum_{k_2} E_{S_1,k_2}(v_{S_1,k_2}, z_1, t) \right)^* \right] \end{aligned} \quad (\text{fórmula 17})$$

La señal del fotodiodo se conduce, según una forma de ejecución preferente, a través de un filtro pasabajo con la frecuencia límite $f_g = a \cdot f_{\text{rep}}$, eligiéndose $f_g = a \cdot f_{\text{rep}} \in \mathbb{R}$ (a es un número real) mucho más pequeño que n ó m (p.e. $a=5, n=100, m=101$). De esta manera se simplifica claramente el término suma de la fórmula 17, tal como se muestra a continuación.

Los sumandos del término de autointerferencia (aquí realizado para S_1 , sin que ello limite el carácter general) pueden transformarse con la fórmula 12 en:

$$I_{S_1}^{\text{selbst}}(z_1, t) = c\epsilon\epsilon_0 \sum_{k_1, k_2} E_{S_1,k_1}^0 E_{S_1,k_2}^0 \exp[-i(\tilde{\varphi}_{S_1,k_1}(z_1, t) - \tilde{\varphi}_{S_1,k_2}(z_1, t))] \exp(-i2\pi t f_{\text{schweb}}^{S_1, S_1}(k_1, k_2)) \quad (\text{fórmula 18})$$

Las frecuencias de batido $f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(k_1, k_2)$ resultan entonces con la fórmula 10

$$f_{\text{schweb}}^{S_1, S_1}(k_1, k_2) := |f_{\text{rep}}(k_1 n - k_2 n) + f_{AOM,1} - f_{AOM,1}| = |f_{\text{cav},1}(k_1 - k_2)| \quad (\text{fórmula 19})$$

Al ser $f_{\text{cav},1} = n f_{\text{rep}} \gg f_g$ queda tras el filtrado pasabajo en la señal eléctrica a partir de los términos de autointerferencia sólo $k_1 = k_2$, es decir, $f_{\text{schweb}} = 0$, o sea, sólo queda el decalaje (offset) constante.

$$I_{S_1}^{\text{selbst}}(z_1, t) = c\epsilon\epsilon_0 \sum_{k_1} E_{S_1, k_1}^0 E_{S_1, k_1}^0 \exp[-i(\tilde{\varphi}_{S_1, k_1}(z_1, t) - \tilde{\varphi}_{S_1, k_1}(z_1, t))] \quad (\text{fórmula 20})$$

$$= c\epsilon\epsilon_0 \sum_{k_1} E_{S_1, k_1}^0 E_{S_1, k_1}^0$$

Para el término de interferencia de mezcla rige análogamente

$$I_{S_1}^{\text{misch}}(z_1, z_2, t) = c\epsilon\epsilon_0 \sum_{k_1, k_2} E_{S_1, k_1}^0 E_{S_2, k_2}^0 \exp[-i(\tilde{\varphi}_{S_1, k_1}(z_1, t) - \tilde{\varphi}_{S_2, k_2}(z_2, t))] \exp(-i2\pi t f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(k_1, k_2)) \quad (\text{fórmula 21})$$

con las frecuencias de batido

$$f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(k_1, k_2) = |f_{\text{rep}}(k_1 n - k_2 m) + f_{AOM,1} - f_{AOM,2}| = |f_{\text{rep}}(k_1 n - k_2 m) - \Delta f_{AOM}| \quad (\text{fórmula 22})$$

Estas señales eléctricas con estas frecuencias de batido recorren preferiblemente un filtro pasobajo. Cuando se han dividido las señales ópticas previamente tal como se indica en la reivindicación 3 en intervalos de frecuencias, pueden expresarse los índices de peine k_1 y k_2 mediante

$$k_1 = \kappa m + r_1 \text{ und } k_2 = \kappa n + r_2, \quad (\text{fórmula 23})$$

siendo $k = 0, 1, 2, \dots$ el número de orden del intervalo de frecuencias y r el índice de líneas del peine. Rige

$$r \in \left\{ -\left\lfloor \frac{\min(n, m)}{2} \right\rfloor, -\left\lfloor \frac{\min(n, m)}{2} \right\rfloor + 1, \dots, \left\lfloor \frac{\min(n, m)}{2} \right\rfloor - 1, \left\lfloor \frac{\min(n, m)}{2} \right\rfloor \right\} \quad (\text{fórmula 24})$$

La función $\lfloor \cdot \rfloor$ o función de suelo (floor) asigna a un número el mayor de todos los números enteros más pequeños.

Con ello puede expresarse la frecuencia de batido $f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(k_1, k_2)$ aplicando la fórmula 19 mediante

$$f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(\kappa m + r_1, \kappa n + r_2) = |f_{\text{rep}}(\kappa m n + r_1 n - \kappa n m - r_2 m) - \Delta f_{AOM}| = |f_{\text{rep}}(r_1(n - m) - (r_2 - r_1)m) - \Delta f_{AOM}| = |f_{\text{rep}}(r_1(n - m) - \Delta r m) - \Delta f_{AOM}| \quad (\text{fórmula 25})$$

con el orden diferencial

$$\Delta r = r_2 - r_1 \quad (\text{fórmula 26})$$

Si se han elegido n y m – tal como se prevé en una forma de ejecución preferente – tal que es $|n - m| \ll m$ y se filtra en pasobajo la señal de batido, entonces separa el filtro pasobajo todas las frecuencias de batido que procedían de la interferencia de líneas de peine de distintos índices de líneas de peine r . Por lo tanto en la señal eléctrica sólo

quedan las frecuencias de batido (schweb) $f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(k_1, k_2)$, en las que se cumple la condición $r_1 = r_2 = r$ y $f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(\kappa m + r, \kappa n + r) < f_g$. Aquí es f_g la frecuencia límite del filtro pasobajo.

Con la fórmula 25 resulta

$$f_{\text{schweb}}^{S_1, S_2}(\kappa m + r, \kappa n + r) = |f_{\text{rep}} r(n - m) - \Delta f_{AOM}| \quad (\text{fórmula 27})$$

Los términos de mezcla de la fórmula 17 y la fórmula 21 se simplifican así convirtiéndose en

$$I_{S_1, S_2}^{misch}(z_1, z_2, t) = c\epsilon\epsilon_0 \sum_r E_{S_1, \kappa m+r}^0 E_{S_2, \kappa n+r}^0 \exp[-i(\tilde{\varphi}_{S_1, \kappa m+r}(z_1, t) - \tilde{\varphi}_{S_2, \kappa n+r}(z_2, t))] \exp[-i2\pi t f_{schweb}^{S_1, S_2}]$$

(fórmula 28)

5 Mediante la representación compleja de la función coseno, resulta para la suma de los términos de mezcla (misch)

$$I_{S_1, S_2}^{misch}(z_1, z_2, t) + I_{S_2, S_1}^{misch}(z_2, z_1, t) = \sum_r I_{Kr}^0 \cos(2\pi t f_{schweb}^{S_1, S_2}(\kappa m+r, \kappa n+r) + (\tilde{\varphi}_{S_1, \kappa m+r}(z_1, t) - \tilde{\varphi}_{S_2, \kappa n+r}(z_2, t)))$$

(fórmula 29)

10 con la amplitud de batido

$$I_{Kr}^0 = c\epsilon\epsilon_0 E_{S_1, \kappa m+r}^0 E_{S_2, \kappa n+r}^0$$

(fórmula 30)

15 Mediante el filtrado pasabajo resulta por lo tanto a partir de la fórmula 17 un peine de frecuencias eléctrico, cuya intensidad de señal U resulta aplicando la fórmula 20 y la fórmula 29 en la fórmula 17:

$$U(z_1, z_2, z) = U_{offset} + \sum_r U(\kappa, r) \cos(2\pi f_{schweb}(\kappa, r)t + \Delta\tilde{\varphi}(\kappa, r, z_1, z_2, t))$$

(fórmula 31)

20 con las notaciones simplificadas

$$f_{schweb}(\kappa, r) := f_{schweb}^{S_1, S_2}(\kappa m+r, \kappa n+r)$$

(fórmula 32)

$$\Delta\tilde{\varphi}(\kappa, r, z_1, z_2, t) := \tilde{\varphi}_{S_1, \kappa m+r}(z_1, t) - \tilde{\varphi}_{S_2, \kappa n+r}(z_2, t)$$

25 Resulta U_{offset} cuando en un peine de frecuencias con la intensidad de señal $U(z_1, z_2, t)$ se calcula la componente constante $U_{offset}(z_1)$ aplicando la fórmula 20 a la fórmula 17. El espectro de amplitudes del peine de frecuencias resulta aplicando la fórmula 29 a la fórmula 17.

Las frecuencias eléctricas de batido pueden ahora separarse una de otra mediante filtros electrónicos pasabanda.

30 Las fases $\Delta\tilde{\varphi}(\kappa, r, z_1, z_2, t)$ de las líneas así aisladas con las frecuencias de batido $f_{schweb}(\kappa, r)$ se determinan entonces mediante mezcla electrónica con las correspondientes frecuencias de referencia $f_{ref}(\kappa, r) = f_{schweb}(\kappa, r)$ ("detección sensible a fase"). Esto se realiza por ejemplo mediante un amplificador lock-in (de bloqueo).

35 Esta medición de fase se realiza en el detector de referencia y en el detector de medida en los instantes t_a y t_b . A partir de estas mediciones de fase puede determinarse como sigue la trayectoria de medida L recorrida entre t_a y t_b .

Se denominan a continuación $\Delta\varphi^R(t)$ y $\Delta\varphi^M(t)$ los valores de fase obtenidos según la fórmula 32 a partir de los detectores de referencia y de medida en el instante t. Según la fórmula 14 y la fórmula 32 pueden expresarse los mismos mediante

$$40 \Delta\varphi^{R, M}(t_a) = \varphi_{S_1, k_1}^{rand}(t_a) + \varphi_{S_1, k_1}(z_1^{R, M}(t_a)) - \varphi_{S_1, k_2}^{rand}(t_a) - \varphi_{S_2, k_2}(z_2^{R, M}(t_a))$$

(fórmula 33)

Si se sustrae ahora la fase de batido de la referencia $\Delta\varphi^R(t_a)$ de la fase del diodo de medida $\Delta\varphi^M(t_a)$, entonces se eliminan (aproximadamente) variaciones de fase aleatorias $\varphi_{S_{1,2}, k_{1,2}}^{rand}(t_a)$ del resultado y se obtiene:

$$45 \Delta\varphi^R(t_a) - \Delta\varphi^M(t_a) = [\varphi_{S_1, k_1}(z_1^R(t_a)) - \varphi_{S_1, k_1}(z_1^M(t_a))] - [\varphi_{S_2, k_2}(z_2^R(t_a)) - \varphi_{S_2, k_2}(z_2^M(t_a))]$$

(fórmula 34)

Esta diferencia depende, debido a la fórmula 13, sólo de las diferencias de trayectoria entre los interferómetros de referencia y de medida, así como de ambas frecuencias del rayo que se interfieren:

$$\Delta\phi^R(t_a) - \Delta\phi^M(t_a) = K_1(z_1^R(t_a) - z_1^M(t_a)) - K_2(z_2^R(t_a) - z_2^M(t_a)) \quad (\text{fórmula 35})$$

Si se determina ahora de nuevo esta diferencia de fases en el instante t_b , varía sólo la longitud del rayo de medida $z_1^M(t_b)$, permaneciendo iguales todas las otras vías ópticas y rige:

$$\begin{aligned} z_2^M(t_a) &= z_2^M(t_b) \quad \text{y} \\ z_{1,2}^R(t_a) &= z_{1,2}^R(t_b) \end{aligned} \quad (\text{fórmula 36})$$

Con las condiciones adicionales según la fórmula 36 resulta por lo tanto de la fórmula 35 para la diferencia de fases Φ en los distintos tiempos t_a y t_b :

$$\begin{aligned} \phi(t_a, t_b) &= [\Delta\phi^R(t_a) - \Delta\phi^M(t_a)] - [\Delta\phi^R(t_b) - \Delta\phi^M(t_b)] = \\ &= K_1(z_1^M(t_a) - z_1^M(t_b)) \end{aligned} \quad (\text{fórmula 37})$$

Cuando se recorre la trayectoria a medir L con un retrorreflector, entonces la diferencia de trayectorias ópticas recorridas $z_1^M(t_a) - z_1^M(t_b)$ tiene exactamente un tamaño doble. Junto con la definición de la fórmula 13, resulta entonces

$$\phi(t_a, t_b) = \frac{4\pi\nu_{S_1, k_1}}{c} n_L L = \frac{4\pi}{\lambda_{S_1, k_1}} n_L L \quad (\text{fórmula 38})$$

siendo n_L el coeficiente de refracción del aire. La fase $\phi(t_a, t_b)$ medida de tal forma heterodina de la frecuencia de batido fija

$$f_{\text{schweb}}(\kappa, r) = |f_{\text{rep}}r(n - m) - \Delta f_{\text{AOM}}| \quad (\text{fórmula 39})$$

es por lo tanto igual a la variación de fase que se mide con un láser cw (láser continuo) de la frecuencia óptica

$$\nu_{S_1, \kappa n + r} = f_{\text{ceo}} + (\kappa m + r)n f_{\text{rep}} + f_{\text{AOM}, 1} \quad (\text{fórmula 40})$$

con la correspondiente longitud de onda en vacío

$$\lambda_{S_1, \kappa n + r} = \frac{c}{\nu_{S_1, \kappa n + r}} \quad (\text{fórmula 41})$$

al recorrer la trayectoria de medida L .

La frecuencia de decalaje (offset) f_{DBO} y la frecuencia de activación AOM f_{AOM} se determinan independientemente. El índice de líneas del peine resulta cuando se conocen m y n a partir de la frecuencia de batido medida. El número de orden κ del intervalo de frecuencias utilizado se determina por ejemplo con un analizador de espectro óptico con resolución nm. Por ello puede asociarse inequívocamente a cualquier fase ϕ_i medida de esta manera la correspondiente frecuencia óptica de la longitud de onda correspondiente ν_i o bien óptica λ_i de la línea de peine "a medir".

Se obtiene por lo tanto mediante la mezcla descrita de ambos peines una pluralidad de fases ópticas ϕ_i . Al igual que en cada medición de longitudes interferométrica, queda limitada la zona de inequívocidad de cada medición de fase a la mitad de la longitud de onda óptica λ_i . La idea conocida de la interferometría de longitud de ondas múltiples es combinar la información de fase de distintas longitudes de onda y aumentar así la zona de inequívocidad.

Para la diferencia de fases $\Delta\phi_{\alpha,\beta}$ entre dos fases ópticas ϕ_α y ϕ_β con longitudes de onda asociadas ($\lambda_\beta > \lambda_\alpha$), rige:

$$\Delta\phi_{\alpha,\beta} := \phi_\alpha - \phi_\beta = 4\pi L \left(\frac{n_{L\alpha}}{\lambda_\alpha} - \frac{n_{L\beta}}{\lambda_\beta} \right) =: 4\pi \frac{n_g}{\Lambda_{\alpha,\beta}} L \quad (\text{fórmula 42})$$

5 con el índice de refracción del grupo

$$n_g := n_{L\alpha} - \frac{n_{L\alpha} - n_{L\beta}}{\lambda_\alpha - \lambda_\beta} \quad (\text{fórmula 43})$$

10 y la longitud de onda sintética

$$\Lambda_{\alpha,\beta} := \frac{\lambda_\alpha \lambda_\beta}{\lambda_\beta - \lambda_\alpha}. \quad (\text{fórmula 44})$$

15 Etapa (g):

Finalmente se realiza el cálculo de la longitud absoluta a partir de la señal de batido. Esta etapa puede incluir una detección sensible a fase de la frecuencia eléctrica de batido.

20 Cada una de las frecuencias sintéticas indicadas muestra una interferencia que varía cuando varía la longitud de la trayectoria de medida L. En general rige

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda_1} n_{L1} L \quad (\text{fórmula 45})$$

25 con la fase ϕ_1 de la correspondiente onda, su longitud de onda λ_1 , el índice de refracción n_1 perteneciente a la longitud de onda λ_1 y la longitud L de la trayectoria de medida (¡en la fórmula 45 se indica la fase "no módulo 2π "!).

Para la diferencia entre dos fases ϕ_1 y ϕ_2 , que pertenecen a dos longitudes de onda distintas λ_1 y λ_2 , resulta:

$$\Delta\phi_{1,2} := \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda_1} n_{L1} L - \frac{4\pi}{\lambda_2} n_{L2} L = 4\pi L \left(\frac{n_{L1}}{\lambda_1} - \frac{n_{L2}}{\lambda_2} \right)$$

$$\Leftrightarrow L = \frac{\Delta\phi_{1,2} \lambda_1 \lambda_2}{4\pi (n_{L1} \lambda_2 - n_{L2} \lambda_1)} \quad (\text{fórmula 46})$$

30 La diferencia de fases medida $\Delta\phi_{1,2}$ conocida es "sólo módulo 2π ", con lo que el cálculo, igual que siempre en la interferometría, sólo es inequívoco cuando la longitud L buscada se conoce a excepción de un valor dentro de media longitud de onda.

35 Según una forma de ejecución preferente, se separan por filtrado frecuencias elevadas en la señal de batido. Sólo contribuyen a la señal de batido las componentes de frecuencia correspondientes a frecuencias bajas. Para estas frecuencias $f_{\text{schweb},\alpha}$ consideradas en la medición rige para los índices numéricos k_1 y k_2 de la fórmula 10 (página 3)

$$k_1 = \kappa_1 m + \Delta k_{\alpha,1} \text{ und}$$

$$k_2 = \kappa_1 n + \Delta k_{\alpha,2} \text{ mit } \Delta k_\alpha = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{fórmula 47})$$

40

Mediante los índices $\Delta k_{\alpha,1}, \Delta k_{\alpha,2} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ resultan las frecuencias ópticas $\nu_{\alpha,1}, \nu_{\alpha,2}$ que contribuyen al batido. Para las frecuencias de batido más bajas prácticamente relevantes, rige la condición

$$\Delta k_{\alpha,1} = \Delta k_{\alpha,2} = \Delta k_{\alpha}, \quad (\text{fórmula 48})$$

5

con la que a continuación seguiremos contando por razones de simplicidad sin limitar el carácter general.

La fase ϕ_{α} detectada en la correspondiente frecuencia de batido, puede asociarse según la fórmula 40 a la frecuencia óptica

10

$$\nu_{\alpha} = f_{\text{CEO}} + (\kappa_1 m + \Delta k_{\alpha}) n f_{\text{rep}} + f_{\text{AOM},1} \quad (\text{fórmula 49})$$

15

Ahora, mediante combinación de las fases de distintas señales de batido de diferentes órdenes Δk_{α} y Δk_{β} dentro de un intervalo de frecuencias I (es decir, resulta $k_{\alpha} = k_{\beta}$) y entre diversos intervalos de frecuencias (es decir, resulta $k_{\alpha} \neq k_{\beta}$), puede encontrarse la cantidad de secuencias que se quiera de longitudes de onda sintéticas $\Lambda(q)$ con el índice numérico $q = 1, 2, \dots$ para las que rige

$$\frac{\Lambda(q)}{N(q)} < \frac{\Lambda(q+1)}{4} \quad (\text{fórmula 50})$$

20

Para cada longitud de onda óptica $\lambda_{\kappa_0}^{k_0}$ hay por lo tanto una secuencia finita de longitudes de onda sintéticas, es decir $q = 0, 1, \dots, q_{\text{end}}$, por lo que rige

$$\frac{\Lambda(q_{\text{end}})}{N(q_{\text{end}})} < \frac{\lambda_{\kappa_0}^{k_0}}{4} \quad (\text{fórmula 51})$$

25

Con ayuda de esta secuencia $\Lambda(q)$ de longitudes de onda sintéticas, resulta como distancia medida

$$L = \sum_{q=0}^{q_{\text{end}}} \left[\frac{\phi_{\alpha_q, \beta_q}(q) - \phi_{\alpha_{q+1}, \beta_{q+1}}(q+1)}{2\pi n_g(q) - 2\pi n_g(q+1)} + \frac{1}{2} \left| \frac{\Lambda(q)}{2} \right| \right] + \frac{\phi_0}{2\pi n_0} \frac{\lambda_{\kappa_0}^{k_0}}{2} \quad (\text{fórmula 52})$$

30

Allí es $\phi_{\alpha, \beta}$ la fase indicada en la fórmula 46 del batido con la longitud de onda sintética $\Lambda(q)$. $n_g(q)$ es el índice de refracción del grupo

$$n_g(q) = n_{\alpha_q} - \frac{n_{\alpha_q} - n_{\beta_q}}{\lambda_{\alpha_q} - \lambda_{\beta_q}} \lambda_{\alpha_q} \quad (\text{fórmula 53})$$

y la función $L \downarrow$ aporta el número entero máximo, que es inferior al argumento. ϕ_0 es la fase perteneciente a la

35

longitud de onda $\lambda_{\kappa_0}^{k_0}$. El último término de fase de la suma en la fórmula 52 se elige igual a esta fase óptica:

$$\phi_0 = \phi_{\alpha_q, \beta_q}(q_{\text{end}} + 1) \quad (\text{fórmula 54})$$

40

Un ejemplo de cálculo se indica más abajo en la tabla 1 y la tabla 2.

Es favorable que la frecuencia de repetición f_{rep} , en la que están distanciadas equidistantemente las líneas del peine, es más del doble de grande que el decalaje de frecuencia Δf_{AOM} . En este caso es, según la fórmula 10: $f_{Schwebung} = |f_{rep}(k_1n - k_2m) - \Delta f_{AOM}|$ la frecuencia de batido $f_{Schwebung}$ mínima cuando

5 $k_1n - k_2m = 0$ (fórmula 55)

puesto que como diferencia entre productos de números naturales es $k_1n - k_2m$ caso contrario al menos uno y el batido $|f_{rep} - \Delta f_{AOM}|$ es mayor que f_{rep} . Se obtiene así un resultado especialmente sencillo de evaluar, tal como se muestra a continuación.

10

Puesto que n y m se han elegido primos entre sí y k_1, k_2 son números naturales, aporta la fórmula 55 las soluciones

15 $k_1 = m$ y $k_2 = n$,
 $k_1 = 2m$ y $k_2 = 2n, \dots$ (fórmula 56)

15

(Si fuesen k_1, k_2 primos entre sí, entonces podría realizarse la división por el máximo común divisor y resultaría para el resto la solución anterior. Pero puesto que n, m son primos entre sí, resulta una contradicción, con lo que también queda demostrado que k_1 y k_2 son igualmente primos entre sí).

20

Para la primera solución aporta la fórmula 2 la frecuencia del primer rayo S_1 como $v_{s1,1} = f_{CEO} + k_1 n f_{rep} = f_{CEO} + n m f_{rep}$, lo cual corresponde según la fórmula 4 a la frecuencia del segundo rayo S_2 : $v_{s2,k2} = f_{CEO} + n m f_{rep}$. Para la segunda solución resulta $v_{s1,2} = f_{CEO} + 2 n m f_{rep}$ y $v_{s2} = f_{CEO} + 2 n m f_{rep}$, siendo por lo tanto la distancia entre frecuencias Δf entre dos soluciones

25 $\Delta f = n m f_{rep}$ (fórmula 57)

Ejemplo:

30

Tabla 1

$f_{rep} = 100 \text{ MHz}$ $\Delta f_{AOM} = 10 \text{ MHz}$ $f_{CEO} = 0 \text{ Hz}$ $n = 100$ $m = 101$
 $N_i = 100$

35

N_i es el número natural para el que una longitud de onda sintética A_i puede interpolarse con la exactitud de la fracción N_i -ava. La fórmula 56 aporta como primera solución $k_1 = 101$ y $k_2 = 100$ y la fórmula 10 da $f_{Schwebung} = 10 \text{ MHz}$. La fórmula 57 aporta $\Delta f = n m f_{rep} = 10100 - 100 \text{ MHz} = 1,01 \text{ THz}$.

Una secuencia $A(q)$ que cumple la fórmula 50, es entonces

40

Tabla 2

q	q = 0	q = 1	q = 2	q = 3
$K_{\alpha q}, k_{\beta q}$	381, 381	381, 381	381, 382	377, 385
$\Delta k_{\alpha q}, \Delta k_{\beta q}$	0,1	0,-3	0,0	0,0
$f_{schweb,\alpha q}$	10 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz
$f_{schweb,\beta q}$	110 MHz	290 MHz	10 MHz	10 MHz
$v_{\alpha q}$	384,81 THz	384,81 THz	384,81 THz	380,77 THz
$v_{\beta q}$	384,82 THz	384,78 THz	384,82 THz	388,85 THz
$\frac{\Lambda(q)}{2}$	14,99 mm	5,0 mm	148,41 μm	18,55 μm
$\frac{\Lambda(q)}{100}$	149,9 μm	49,97 μm	1,48 μm	0,19 μm
$\frac{\Lambda(q)}{4}$	-	2,50 mm	74,21 μm	9,28 μm

45

Mediante la detección sensible a fase de la frecuencia de batido eléctrica $f_{schweb} = 10 \text{ MHz}$ se determina por ejemplo la fase óptica Φ_0 de la línea de peine con la frecuencia óptica $v_0 = 384,81 \text{ THz}$ o bien la longitud de onda óptica $\lambda_0 = 779,07 \text{ nm}$.

50

Además puede obtenerse según el esquema anterior también la fase Φ_1 de la línea de peine contigua con la frecuencia óptica $v_1 = 384,81 \text{ THz} + 10 \text{ GHz}$ de la longitud de onda óptica $\lambda_1 = 779,05 \text{ nm}$ mediante detección sensible a fase de la frecuencia de batido eléctrica $f_{Schweb} = 110 \text{ MHz}$.

Mediante sustracción de estas informaciones de fase puede determinarse la fase sintética $\Delta\phi_{0,1}$ de una frecuencia de batido óptica (virtual) $\Delta\nu_{12}^{\text{synth}} = 10 \text{ GHz}$ (ver al respecto la fórmula 42). La gama de inequívocidad de esta medición de longitudes es $\Delta_{1,2}/2 = 14,99 \text{ mm}$.

5 Según una forma de ejecución preferente incluye el procedimiento la etapa (f2) del reparto de la señal de batido, de las que al menos hay una, en un primer intervalo de frecuencias y al menos un segundo intervalo de frecuencias, tal que el primer intervalo de frecuencias puede transformarse añadiendo una distancia entre frecuencias fija Δf en el segundo intervalo de frecuencias. Es posible, pero no necesario, que los intervalos de frecuencias no se solapen. A continuación se describirán para simplificar intervalos de frecuencias sin solapes.

10 El primer intervalo de frecuencias es preferiblemente un intervalo de frecuencias ópticas. Como primer intervalo de frecuencias se elige preferiblemente un intervalo que incluye un entorno de una frecuencia óptica para la que rige $\nu_{S1,k1} = f_{\text{CEO}} + k1 n f_{\text{rep}}$. Es especialmente adecuado un primer intervalo de frecuencias

$$15 \quad I_1 = [f_{\text{CEO}} + \kappa m n f_{\text{rep}} - \left\lfloor \frac{\min\{n,m\}}{2} \right\rfloor n f_{\text{rep}}, f_{\text{CEO}} + \kappa m n f_{\text{rep}} + \left\lfloor \frac{\min\{n,m\}}{2} \right\rfloor n f_{\text{rep}}], \quad (\text{Fórmula 58})$$

pudiendo denominarse κ el orden de la frecuencia, siendo un número natural y estando elegido tal que $\kappa m n f_{\text{rep}}$ es una frecuencia en la gama del espectro del peine de frecuencias. Entonces es $\left\lfloor \frac{\min\{n,m\}}{2} \right\rfloor$ el número entero más grande, que como máximo es la mitad del mínimo de n y m . En el caso de $n = 100$ y $m = 101$, es $\left\lfloor \frac{\min\{100,101\}}{2} \right\rfloor = 50$. Estos intervalos de frecuencias no se solapan, lo cual es ventajoso. Pero es posible también elegir intervalos de frecuencias que tengan solapes.

Ejemplo (como antes):

$$25 \quad f_{\text{rep}} = 100 \text{ MHz} \quad \Delta f_{\text{AOM}} = 10 \text{ MHz} \quad f_{\text{CEO}} = 0 \text{ Hz} \quad n = 100 \quad m = 101$$

En el ejemplo la distancia entre frecuencias es $\Delta f = 1,01 \text{ THz}$ y para el intervalo de frecuencias I_1 según la fórmula 58 rige con el número de orden $\kappa = 381$

$$30 \quad I_1 = [f_{\text{CEO}} + \kappa m n f_{\text{rep}} - \left\lfloor \frac{\min\{n,m\}}{2} \right\rfloor n f_{\text{rep}}, f_{\text{CEO}} + \kappa m n f_{\text{rep}} + \left\lfloor \frac{\min\{n,m\}}{2} \right\rfloor n f_{\text{rep}}], \quad (\text{fórmula 58})$$

$$= [381 \cdot 101 \cdot 100 \cdot 100 \text{ MHz} - 50 \cdot 10 \text{ GHz}, \quad \kappa 10,1 \text{ GHz} + 50 \cdot 10 \text{ GHz}]$$

$$= [384,81 \text{ THz} - 500 \text{ GHz}, \quad 384,81 \text{ THz} + 500 \text{ GHz}]$$

$\kappa = 381$ corresponde a la solución $k_1 = 381 m$ y $k_2 = 381 n$. Resulta en el primer rayo S_1 la frecuencia

$$35 \quad \nu_{S1,381} = f_{\text{CEO}} + k_1 n f_{\text{rep}} = f_{\text{CEO}} + 381 m n f_{\text{rep}} = 384,81 \text{ THz} \quad \text{con } \lambda = \frac{c}{\nu_{S1,381}} = 779,1 \text{ nm}$$

La siguiente frecuencia óptica $\nu_{S1,382}$ pertenece a las soluciones $k_1 = 381 m$ y $k_2 = 382 n$ para el primer rayo S_1 , es decir, para $\nu = 385,82 \text{ THz}$ y $\lambda = 777,0 \text{ nm}$. La distancia entre longitudes de onda

$$40 \quad \Delta\lambda_{381,382} = \frac{c}{\nu_{S1,381}} - \frac{c}{\nu_{S1,382}} \approx 779,1 \text{ nm} - 777,0 \text{ nm} \approx 2,1 \text{ nm} \quad (\text{fórmula 59})$$

es aprox. 2 nm. Pueden separarse con medios ópticos frecuencias ópticas distintas pertenecientes a la misma frecuencia de batido, debido a la distancia entre longitudes de onda, por ejemplo mediante rejillas ópticas.

45 **Cálculo de la longitud de la trayectoria de medida L para el ejemplo indicado:**

A los índices $k_1 = 381m$ y $k_2 = 381n$, es decir, al número de orden $\kappa = 381$, pertenecen las frecuencias de rayo $V_{s1,381m-1} = f_{CEO} + 381mf_{rep} = 384,81 \text{ THz}$ y la frecuencia de batido 10 MHz, ya que de la fórmula 10 se deduce: $f_{Schwebung} = |f_{rep}(k_1n - k_2m) - \Delta f_{AOM}| = \Delta f_{AOM}$.

5 La frecuencia de batido 10 MHz pertenece por lo tanto a la frecuencia 384,81 THz de un rayo de medida o bien de referencia de un interferómetro heterodino según el estado de la técnica. Si varía la longitud de la trayectoria de medida L , entonces varía la fase de la frecuencia de batido, lo cual se detecta.

10 A los índices $k_1 = 381m-1$ y $k_2 = 381n-1$ pertenecen las frecuencias de rayo $V_{s1,381m-1} = V_{s2,381n-1} = f_{CEO} + (381m - 1)nf_{rep} = 384,81 \text{ THz} - 100f_{rep} = 384,81 \text{ THz} - 10 \text{ GHz}$ y la frecuencia de batido

$$f_{Schwebung} = |f_{rep}((381m-1)n - (381n-1)m) - \Delta f_{AOM}| = |100\text{MHz}(381mn - n - 381nm + m) - \Delta f_{AOM}| \\ = |100\text{MHz}(-n + m) - \Delta f_{AOM}| = |100\text{MHz} - \Delta f_{AOM}| = 90\text{MHz}$$

15 A los índices $k_1 = 381m+1$ y $k_2 = 381n+1$ pertenecen las frecuencias de rayo $V_{s1,381m+1} = V_{s2,381n+1} = f_{CEO} + (381m + 1)nf_{rep} = 384,81 \text{ THz} + 100f_{rep} = 384,81 \text{ THz} + 10 \text{ GHz}$ y la frecuencia de batido

$$f_{Schwebung} = |f_{rep}((381m+1)n - (381n+1)m) - \Delta f_{AOM}| = |100\text{MHz}(381mn + n - 381nm - m) - \Delta f_{AOM}| \\ = |100\text{MHz}(n - m) - \Delta f_{AOM}| = |-100\text{MHz} - \Delta f_{AOM}| = 110\text{MHz}$$

20 A los índices $k_1 = 381m-2$ y $k_2 = 381n-2$ pertenecen las frecuencias de rayo $V_{s1,381m-2} = V_{s2,381n-2} = f_{CEO} + (381m - 2)nf_{rep} = 384,81 \text{ THz} - 2 \cdot 100f_{rep} = 384,81 \text{ THz} - 20 \text{ GHz}$ y la frecuencia de batido

$$f_{Schwebung} = |f_{rep}((381m-2)n - (381n-2)m) - \Delta f_{AOM}| = |100\text{MHz}(381mn - 2n - 381nm + 2m) - \Delta f_{AOM}| \\ = |100\text{MHz}(-2n + 2m) - \Delta f_{AOM}| = |200\text{MHz} - \Delta f_{AOM}| = 190\text{MHz}$$

25 A los índices $k_1 = 381m+2$ y $k_2 = 381n+2$ pertenecen las frecuencias de rayo $V_{s1,381m+2} = V_{s2,381n+2} = f_{CEO} + (381m + 2)nf_{rep} = 384,81 \text{ THz} + 2 \cdot 100f_{rep} = 384,81 \text{ THz} + 20 \text{ GHz}$ y la frecuencia de batido

$$f_{Schwebung} = |f_{rep}((381m+2)n - (381n+2)m) - \Delta f_{AOM}| = |100\text{MHz}(381mn + 2n - 381nm + 2m) - \Delta f_{AOM}| \\ = |100\text{MHz}(2n - 2m) - \Delta f_{AOM}| = |-200\text{MHz} - \Delta f_{AOM}| = 210\text{MHz}$$

30 De la exposición se deduce que cada frecuencia de batido pertenece inequívocamente a una frecuencia óptica, siempre que se conozca en qué intervalo de frecuencias se encuentra la frecuencia óptica y con ello a qué número de orden κ pertenece la frecuencia óptica. Se logra identificar este intervalo de frecuencias con medios ópticos, por ejemplo una rejilla. Se supone que exclusivamente se envía a través de la trayectoria de medida el rayo S_1 . Se considera el número de orden $\kappa = 381$.

35 A partir de las fases de las frecuencias de batido $f_{Schwebung} = 10, 90$ y 110 MHz pueden asociarse según la fórmula 48 frecuencias de batido ópticas de $\pm 10 \text{ GHz}$. De ello se deduce la longitud de onda sintética $\Lambda = c/10 \text{ GHz} = 30 \text{ mm}$. Cuando se envía al menos uno de los rayos sobre la trayectoria de medida tal que el rayo se refleje en un retroreflector, entonces el período de la fase de la onda sintética es $\Lambda/2 = c/2 \cdot 10 \text{ GHz} \approx 15 \text{ mm}$. Cuando la longitud de la trayectoria de medida L se conoce con exactitud de al menos $7,5 \text{ mm}$, puede medirse la longitud de la trayectoria de medida L según la fórmula 45 determinando la fase.

40 Según una forma de ejecución preferente, la distancia entre frecuencias es de al menos $0,5 \text{ THz}$, en particular de al menos 1 THz . En este caso la diferencia de longitudes de onda es, tal como antes se ha indicado, de aprox. 1 nm o bien de 2 nm , con lo cual pueden separarse sin dificultades con componentes ópticos, por ejemplo mediante una rejilla óptica.

45 Preferiblemente posee el dispositivo de medición de longitudes absolutas una unidad eléctrica de evaluación, que está equipada para calcular la longitud absoluta a partir de la señal de batido.

50 Preferiblemente la primera trayectoria de medida es parte de un interferómetro heterodino.

Es favorable que el dispositivo de medición de longitudes absolutas incluya un aparato de medida de longitudes absolutas no interferométrico, en particular un aparato de medida de longitudes absolutas cuya precisión de medida se encuentre por debajo de un cuarto de la máxima longitud de onda sintética. Entonces es

posible determinar a priori en base al aparato de medición de longitudes absolutas no interferométrico, en particular no óptico, la longitud de la trayectoria de medida buscada con tal exactitud que en base al procedimiento antes descrito resulte posible un sucesivo afinamiento de la precisión de medida. Es posible entonces también medir grandes longitudes con la máxima precisión. El aparato de medida de longitudes absolutas no interferométrico puede ser por ejemplo un aparato de medida del tiempo de recorrido.

A continuación se describirá la invención más en detalle en base a los dibujos adjuntos. Al respecto muestra

figura 1 un esquema de circuitos de un dispositivo de medida de longitudes absolutas correspondiente a la invención para realizar un procedimiento según la invención y

figura 2 el espectro del primer rayo y del segundo rayo.

La figura 1 muestra un dispositivo de medida de longitudes absolutas 10 correspondiente a la invención con una fuente de luz 12 para generar el primer rayo S_1 y el segundo rayo S_2 . El dispositivo de medida de longitudes absolutas 10 incluye además un dispositivo generador de decalaje de frecuencias 14, que en el presente caso está constituido por dos dispositivos parciales 16.1, 16.2 en forma de moduladores acústico-ópticos 16. El dispositivo generador de decalaje de frecuencias 14 genera un decalaje de frecuencias Δf_{AOM} entre ambos rayos S_1 y S_2 .

El dispositivo de medida de longitudes absolutas 10 incluye además una trayectoria de medida 18, que incluye un retroreflector 20 y en la que durante el funcionamiento discurre una parte del primer rayo S_1 . La fuente de luz 12 incluye además un dispositivo generador de un peine de frecuencias en forma de un láser de peine de frecuencias 22, que a continuación se denominará láser de femtosegundos. El láser de femtosegundos 22 emite un rayo primario S_0 , que se divide mediante un fraccionador de rayos 24 en el primer rayo S_1 y el segundo rayo S_2 . Es posible que se conduzca el rayo primario S_0 en un conductor de fibra óptica, o que se propague sin ligazón. Lo mismo rige en particular también para los rayos S_1 y S_2 .

El primer rayo S_1 recorre un primer dispositivo de filtro de peine de frecuencias 26.1 en forma de un primer estalón, que está equipado tal que sólo puede atravesarlo cada línea de peine número n del peine de frecuencias emitido por el láser de femtosegundos 22. El rayo primario S_0 recorre un segundo dispositivo de filtro de peine de frecuencias 26.2 en forma de un segundo estalón, que está equipado tal que sólo puede atravesarlo cada línea de peine número m .

Detrás del primer dispositivo de filtro de peine de frecuencias 26.1, incide el primer rayo S_1 sobre un segundo fraccionador de rayo 28, que divide el rayo S_1 en un primer rayo parcial S_1^R y un segundo rayo parcial S_1^M . El primer rayo parcial S_1^R discurre hacia un tercer fraccionador de rayo 30 e interfiere allí con el segundo rayo S_2 , con lo que el primer rayo S_1 y el segundo rayo S_2 se interfieren entre sí y resulta una señal de batido. La señal de batido es transportada por un rayo de luz 32, que incide sobre una rejilla óptica 34.

La rejilla óptica 34 origina un fraccionamiento del rayo de luz 32 y con ello de la señal de batido en varios intervalos de frecuencias I_1, I_2, I_3 . La luz del primer intervalo de frecuencias I_1 incide sobre un primer elemento detector 36.1, la luz del segundo intervalo de frecuencias I_2 sobre un segundo elemento detector 36.2 y la luz del tercer intervalo de frecuencias I_3 sobre un tercer elemento detector 36.3. Los elementos detectores 36.1, 36.2 y 36.3 son parte de un detector de referencia 38.

El detector de referencia 38 transforma la luz incidente en una corriente eléctrica, con lo que la señal de batido es transportada ahora mediante la corriente eléctrica. Mediante una línea eléctrica 40 está conectado el detector de referencia 38 con un primer pasabanda 42, un segundo pasabanda 44 y un tercer pasabanda 46. El primer pasabanda 42 tiene una frecuencia de paso de 10 MHz, el segundo pasabanda 44 de 90 MHz y el tercer pasabanda 46 de 110 MHz. Las evaluaciones de las señales eléctricas detrás de los filtros pasabanda 42, 44, 46 son iguales, por lo que solamente nos referiremos al circuito posterior al primer pasabanda 42.

Detrás del primer pasabanda 42 se conduce la señal eléctrica a un primer mezclador 48, llegando una segunda componente a través de un decalador de fase de 90° 50 a un segundo mezclador 52. El primer mezclador 48 y el segundo mezclador 52 reciben en sus correspondientes segundas entradas una señal eléctrica de un cuarto pasabanda 54 que se describe bastante más abajo.

La fracción de rayo S_1^M llega a través de un cuarto fraccionador de rayo 56 y una plaquita de un cuarto de onda 57 a la trayectoria de medida 18. La fracción de rayo S_1^R que corre de retorno tras reflejarse en el retroreflector 20, llega a través del cuarto fraccionador de rayo 56 a un quinto fraccionador de rayo 58 y se lleva allí a interferir con el segundo rayo S_2 . Resulta una segunda señal de batido, que es transportada por un segundo rayo de luz 60.

El segundo rayo de luz 60 incide sobre una segunda rejilla 62, que al igual que la primera rejilla 34 conduce la luz incidente a elementos detectores 64.1, 64.2, 64.3 y origina así un fraccionamiento de la señal de batido en intervalos

de frecuencias. Los elementos detectores 64 (las cifras de referencia sin sufijo numérico designan al objeto como tal) son parte de un detector de medida 66, que a partir del segundo rayo de luz 60 incidente genera una señal eléctrica.

- 5 La señal de batido transportada por esta señal eléctrica se conduce al filtro pasabanda 54, 68, 70. El cuarto pasabanda 54 tiene una frecuencia de paso de 10 MHz, con lo que en el primer mezclador 48 aparece una señal eléctrica que tras recorrer un pasobajo 72 aporta una señal proporcional a $\cos\phi_{10\text{MHz}}$. El segundo mezclador 52 aporta una señal que tras pasar por un segundo pasobajo 74 es proporcional a $\sin\phi_{10\text{MHz}}$ (sin = seno). A partir de ambas señales puede calcularse la posición en fase de la frecuencia de 10 MHz virtual.
- 10 La mezcla de las frecuencias usuales procedentes de los pasabanda 44, 46, 68, 70 no se describe, puesto que es un procedimiento estándar. A partir de los valores de medida eléctricos así obtenidos se calcula la longitud L de la trayectoria de medida 18 tal como antes se ha descrito.
- 15 La figura 1 muestra además esquemáticamente un aparato de medida óptico de longitudes absolutas, con el que puede determinarse la trayectoria de medida 18 con una precisión inferior a un cuarto de la longitud de onda correspondiente a la longitud de onda sintética más larga incluida en la evaluación. Así puede medir el dispositivo de medida de longitudes absolutas 10 la longitud L sin ningún conocimiento previo de la longitud L.
- 20 La figura 2 muestra esquemáticamente el espectro del primer rayo S_1 (parte superior de la imagen) y del segundo rayo S_2 (parte inferior de la imagen). Puede observarse que el patrón de frecuencias del primer rayo se repite a un intervalo de frecuencias de $\kappa \cdot n \cdot m \cdot f_{\text{rep}}$, que en el presente caso es de 1,01 THz.

Lista de referencias

10	dispositivo de medición de longitudes absolutas
12	fuerza de luz
14	dispositivo generador de decalaje de frecuencias
16	modulador acústico-óptico
18	trayectoria de medida
20	Retroreflector
22	láser de peine de frecuencias
24	fraccionador del rayo
26	dispositivo de filtro del peine de frecuencias
28	segundo fraccionador del rayo
30	tercer fraccionador del rayo
32	rayo de luz
34	Rejilla
36	elemento detector
38	detector de referencia
40	línea eléctrica
42	primer pasabanda
44	segundo pasabanda
46	tercer pasabanda
48	primer mezclador
50	decalador de fase en 90°
52	segundo mezclador
54	cuarto pasabanda
56	cuarto conductor del rayo
57	plaquita de cuarto de onda
58	quinto conductor del rayo
60	segundo rayo de luz
62	segunda rejilla
64	elemento detector
66	detector de medida
68	quinto filtro pasabanda
70	sexto filtro pasabanda
72	Pasobajo
74	segundo pasobajo
76	aparato de medida de longitudes absolutas no óptico
S_1	primer rayo
S_2	segundo rayo
S_0	rayo primario
S_1^R	fragmento de rayo
S_1^M	fragmento de rayo
j	índice de diferenciación

	$j = 1 \rightarrow$ rayo 1
	$j = 2 \rightarrow$ rayo 2
k_1	índice numérico $k_1 = 0, 1, 2, \dots$
k_2	índice numérico $k_2 = 0, 1, 2, \dots$
L	longitud de la trayectoria de medida
n, m	números naturales, primos entre sí
N	cantidad de números naturales
N	exactitud de interpolación (referida a $1/N$ de la longitud de onda sintética)
q	índice numérico $q = 0, 1, 2, \dots$
r	índice de líneas de peine (índice numérico)
α	primera frecuencia al determinar una frecuencia sintética
β	segunda frecuencia al determinar una frecuencia sintética
ϵ	permitividad del medio
ϵ_0	constante dieléctrica
K	número de orden, número natural (fórmula 58)
ν_{S1}	frecuencia del primer rayo
ν_{S2}	frecuencia del segundo rayo
c	velocidad de la luz en vacío
Δf	distancia entre frecuencias
Δf_{AOM}	decalaje de frecuencia
f_{rep}	frecuencia de repetición
f_{CEO}	decalaje de frecuencia de la envolvente (<i>carrier envelope frequency offset</i>)
$f_{cav,1}$	frecuencia de resonancia del primer estalón
$f_{cav,2}$	frecuencia de resonancia del segundo estalón
f_{Schweb}	frecuencia del batido

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para medir longitudes, en particular para medir longitudes absolutas, con las etapas:
 - 5 (a) generación de un peine de frecuencias, que puede describirse como compuesto por una pluralidad de líneas de peine equidistantes, a continuación
 - (b) separación por filtrado de cada línea de peine número n del peine de frecuencias, tal que resulta un primer rayo (S₁) y
 - 10 (c) separación por filtrado de cada línea de peine número m del peine de frecuencias, tal que resulta un segundo rayo (S₂),
 - (d) generación de un decalaje de frecuencias (Δf_{AOM}) distinto del cero entre ambos rayos (S₁, S₂),
 - (e) emisión de al menos una parte **S^M** de al menos uno de los rayos (S₁) sobre una trayectoria de medida,
 - (f) hacer interferir el primer rayo y el segundo rayo, tal que al menos resulta una señal de batido y
 - 15 (g) cálculo de la longitud absoluta a partir de la señal de batido, de las que al menos hay una.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** una frecuencia de repetición (f_{rep}), en la que están distanciadas equidistantemente las líneas del peine, tiene una magnitud superior al doble del decalaje de frecuencia (Δf_{AOM}).
- 20 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado por la etapa:
 - (f2) fraccionamiento de la señal de batido, de las que al menos hay una, en un primer intervalo de frecuencias (I_1) y al menos un segundo intervalo de frecuencias (I_2),
 - 25 con lo que rige que el primer intervalo de frecuencias (I_1) puede transformarse añadiendo una distancia entre frecuencias fija (Δf) en el segundo intervalo de frecuencias (I_2).
4. Procedimiento según la reivindicación 3, **caracterizado porque** la distancia entre frecuencias (Δf) es de al menos 500 GHz.
- 30 5. Procedimiento según la reivindicación 3 ó 4, **caracterizado porque**
 - se han elegido n y m tal que el valor de la diferencia entre n y m es como máximo la décima parte del mínimo de n y m y
 - la señal de batido está filtrada mediante un pasabajo.
- 35 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** el peine de frecuencias se fabrica mediante un láser de femtosegundos (22).
7. Dispositivo para medir longitudes absolutas (10) con
 - 40 (a) una fuente de luz (12) para generar un primer rayo (S₁) y al menos un segundo rayo (S₂),
 - (b) un dispositivo para generar un decalaje de frecuencias (14), para generar un decalaje de frecuencias (Δf_{AOM}) distinto de cero entre ambos rayos (S₁, S₂),
 - (c) una trayectoria de medida (18), en la que durante el funcionamiento corre al menos una parte **S^M** de al menos uno de los rayos (S₁) y
 - 45 (d) al menos un detector, que está dispuesto tal que sobre el mismo se interfieren el primer rayo (S₁) y el segundo rayo (S₂), con lo que resulta al menos una señal de batido, en base a la cual puede determinarse una longitud absoluta de la trayectoria de medida (L),
 - caracterizado porque**
 - 50 (e) la fuente de luz (12) incluye
 - (i) un dispositivo generador de un peine de frecuencias (22), para emitir un peine de frecuencias que puede describirse como compuesto por una pluralidad de líneas de peine equidistantes,
 - (ii) un primer dispositivo de filtro del peine de frecuencias (26.1), para separar por filtrado cada línea del peine número n del peine de frecuencias, con lo que resulta un primer rayo (S₁) y
 - 55 (iii) un segundo dispositivo de filtrado del peine de frecuencias (26.2) para separar por filtrado cada línea del peine número m del peine de frecuencias, con lo que resulta un segundo rayo (S₂).
8. Dispositivo de medida de longitudes absolutas (10) según la reivindicación 7, **caracterizado por** una unidad evaluadora eléctrica, equipada para calcular la longitud absoluta a partir de las señales de batido.
- 60 9. Dispositivo de medida de longitudes absolutas (10) según la reivindicación 7 u 8, **caracterizado porque** la primera trayectoria de medida (18) es parte de un interferómetro heterodino.
10. Dispositivo de medida de longitudes absolutas (10) según una de las reivindicaciones 7 a 9,

caracterizado por un aparato de medida de longitudes absolutas no interferométrico (76), cuya precisión de medida se encuentra en particular por debajo de un cuarto de la máxima longitud de onda sintética.

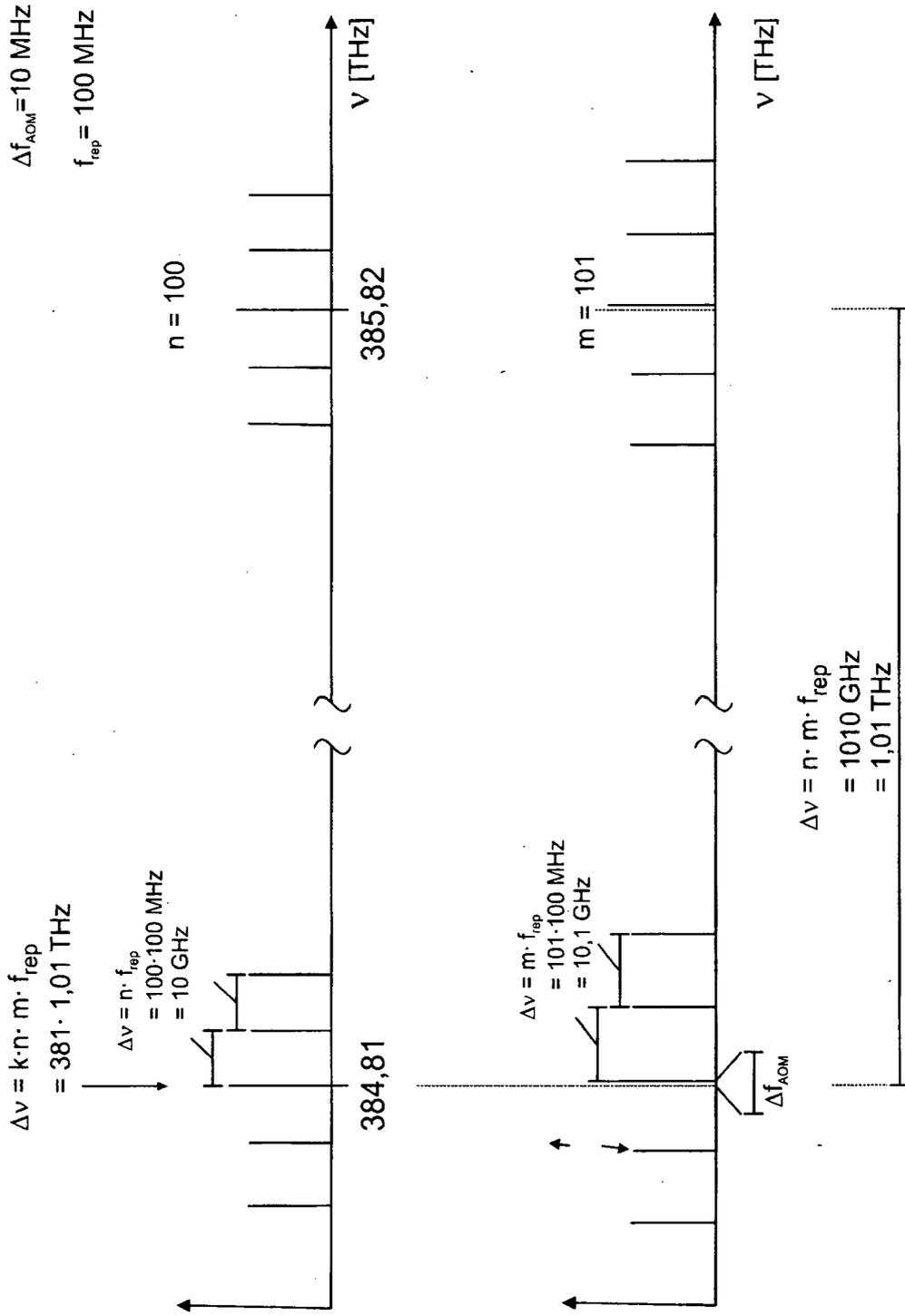


Fig. 2