

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 430 543**

51 Int. Cl.:

**G05B 19/404** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.03.2011 E 11159212 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2013 EP 2378381**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta**

30 Prioridad:

**25.03.2010 DE 102010003303**

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

**21.11.2013**

73 Titular/es:

**DECKEL MAHO SEEBACH GMBH (100.0%)  
Neue Strasse 61  
99846 Seebach, DE**

72 Inventor/es:

**TÜLLMANN, UDO y  
ZENKER, CHRISTOF**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 430 543 T3**

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta

5 La presente invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con al menos un eje lineal. De acuerdo con la presente invención se registra al menos un valor de temperatura en una posición de medición de temperatura del eje lineal de la máquina herramienta, se establece un valor de diferencia de temperatura entre una temperatura de referencia y el valor de temperatura registrado, se determina un valor de compensación dependiendo del valor de diferencia de temperatura y se compensa un cambio de ubicación dependiente de la temperatura, por ejemplo, un desplazamiento dependiente de la temperatura de una herramienta o pieza de trabajo fijada en la máquina herramienta o de una pieza constructiva de la máquina herramienta o de un eje lineal de la máquina herramienta, dependiendo del valor de compensación determinado durante el control de la máquina herramienta.

15 Además, la presente invención se refiere a un sistema con una máquina herramienta, particularmente una máquina herramienta de CN o CNC, con al menos un eje lineal y un dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en la máquina herramienta.

## 20 Antecedentes de la invención

La presente invención se refiere a la compensación de desplazamientos térmicos en una máquina herramienta a través de una compensación mediante un cálculo de valores de compensación que se calculan para un control numérico o controlado por programa de la máquina herramienta para la compensación de los desplazamientos térmicos.

25 Los desplazamientos térmicos en la máquina herramienta, en este caso, son por ejemplo consecuencia de alabeos de piezas constructivas, por ejemplo, de piezas constructivas de bastidor, pudiéndose producir tales alabeos debido a calentamiento y, en particular, debido a calentamiento heterogéneo de las piezas constructivas, por ejemplo, mediante aportación de calor de elementos de guía y accionamiento colocados en un lado. Si se calienta una pieza constructiva del bastidor mediante guías y accionamientos desde un lado, el material en este lado calentado se dilata de forma correspondiente al calentamiento desde un lado. Debido al calentamiento desde un lado, la pieza constructiva de bastidor tiene, en el lado calentado, una mayor longitud que en lado opuesto, por lo que se alabea la pieza constructiva. Un comportamiento de este tipo conduce a un error de posición que se ha de compensar mediante compensación durante el control de la máquina herramienta o de los ejes de una máquina herramienta.

30 Las deformaciones que se han descrito anteriormente de piezas constructivas de la máquina herramienta se denominan, en general, crecimiento térmico de la máquina herramienta. En este sentido, las máquinas herramienta presentan este crecimiento térmico debido al coeficiente de dilatación térmica. El crecimiento térmico se obtiene, por un lado, debido a la dilatación térmica lineal, por ejemplo, de un carro o de una bancada de máquina de la máquina herramienta. Esta parte de la dilatación térmica lineal se obtiene a partir de un aumento homogéneo de la temperatura de la pieza constructiva multiplicado por el coeficiente de dilatación térmica.

35 Sin embargo, una segunda parte del crecimiento térmico se obtiene a través de diferencias heterogéneas de temperatura que pueden producirse en piezas constructivas de la máquina herramienta. La causa de tales diferencias de temperatura puede ser, por ejemplo, una aportación irregular de calor a las piezas constructivas de la máquina herramienta. Si están colocados los accionamientos y las guías, por ejemplo, en una pieza constructiva de la máquina herramienta en el lado inferior, este lado inferior se calienta de forma más intensa y más rápida que el lado superior de la pieza constructiva, por ejemplo, de un carro de un eje lineal de la máquina herramienta. Con ello se obtiene frecuentemente la situación de que una pieza constructiva del bastidor de una máquina herramienta presenta un lado caliente o que se calienta rápidamente, en el que están colocados guías y accionamientos, y un lado más frío o que se calienta de forma más lenta y menos intensamente. Un calentamiento desde un lado de este tipo conduce a un alabeo de la pieza constructiva que está expuesta a un calentamiento heterogéneo de este tipo.

45 En el estado de la técnica, en vista de los desplazamientos que se han descrito previamente de causa térmica en una máquina herramienta, es conocido cómo reducir o evitar, mediante atemperado activo de la máquina herramienta y de sus piezas constructivas, los desplazamientos de causa térmica. De este modo, mediante una máquina refrigeradora se puede aprovechar un medio, que se lleva hasta una temperatura predeterminada o llevada correspondientemente a una magnitud de guía, para el atemperado local de algunas o todas las piezas constructivas de las máquinas herramienta, particularmente, por ejemplo, para la refrigeración de los centros de la producción de calor en una máquina herramienta tales como, por ejemplo, husillos o accionamientos.

50 Un enfoque de este tipo mediante atemperado activo o refrigeración de algunas o todas las partes de una máquina herramienta, en este sentido, se puede usar de forma eficaz para reducir o para evitar los cambios de longitud descritos de piezas constructivas con calentamiento homogéneo. Sin embargo, mediante la aportación limitada localmente del refrigerante no se puede evitar por completo la generación de diferencias de temperatura o en parte

incluso se intensifica, de tal manera que las deformaciones de causa térmica que se deben a alabeos de las piezas constructivas de bastidor como consecuencia de diferencias de temperaturas en diferentes lados las piezas constructivas de la máquina herramienta no se pueden evitar por completo o incluso se intensifican adicionalmente con un atemperado activo de la máquina herramienta.

5 En este sentido, en el estado de la técnica es conocido cómo compensar desplazamientos de causa térmica en una máquina herramienta mediante medición de una o varias temperaturas en piezas constructivas de la máquina herramienta y mediante el cálculo de un valor de compensación correlativo a la temperatura medida en el control de la máquina mediante superposición de la posición teórica del eje. En este sentido, en el estado de la técnica se sabe  
10 cómo llevar a cabo una compensación mediante técnica de control, calculándose valores de compensación dependiendo de la o las temperaturas medidas o las diferencias de temperatura en piezas constructivas de la máquina herramienta.

Esto se puede llevar a cabo, por ejemplo, con el siguiente enfoque a modo de fórmula:

$$\Delta A1 = (T_{\text{REFERENCIA\_11}} - T_{\text{BASE\_11}}) \cdot K_{\_11} + (T_{\text{REFERENCIA\_12}} - T_{\text{BASE\_12}}) \cdot K_{\_12} + \dots + (T_{\text{REFERENCIA\_1N}} - T_{\text{BASE\_1N}}) \cdot K_{\_1N} \quad (1)$$

$$\Delta AN = (T_{\text{REFERENCIA\_N1}} - T_{\text{BASE\_N1}}) \cdot K_{\_N1} + (T_{\text{REFERENCIA\_N2}} - T_{\text{BASE\_N2}}) \cdot K_{\_N2} + \dots + (T_{\text{REFERENCIA\_NN}} - T_{\text{BASE\_NN}}) \cdot K_{\_NN} \quad (2)$$

25 En este caso,  $\Delta A1$  es un valor de corrección o un valor de compensación para un primer eje A1 de la máquina herramienta y  $\Delta AN$ , un valor de compensación para un N-ésimo eje AN de la máquina herramienta. En una pieza constructiva del eje A1 de la máquina herramienta se registran una temperatura de referencia y una temperatura de base  $T_{\text{REFERENCIA\_11}}$  y  $T_{\text{BASE\_11}}$  y se forma una correspondiente diferencia de temperatura. Además, en los otros ejes de la máquina herramienta A1 a AN se registra, respectivamente, una temperatura de referencia y una temperatura de base y se establece un valor correspondiente de diferencia de temperatura.

30 Para cada uno de los ejes, particularmente ejes lineales, de la máquina herramienta, en este caso, se calcula un valor de corrección de compensación que tiene en cuenta las diferencias de temperatura, respectivamente multiplicadas con un factor de compensación. En este caso,  $K_{\_11}$  a  $K_{\_1N}$  y  $K_{\_N1}$  a  $K_{\_NN}$  son los respectivos factores de compensación que se anteponen a las respectivas diferencias de temperatura. Estos se pueden determinar mediante simulación o mediante experimentos en la máquina herramienta para poder conseguir un  
35 resultado satisfactorio de compensación.

En este caso, preferentemente se superponen o se corrigen las posiciones de eje teóricas predefinidas en el control de máquina de una máquina herramienta de CN o una máquina herramienta de CNC de los respectivos ejes de la máquina herramienta con los valores calculados de corrección de compensación  $\Delta A1$  o  $\Delta AN$ . Por ejemplo, se podría  
40 corregir la posición de eje teórica del eje A1 con el valor calculado  $\Delta A1$  para compensar el desplazamiento térmico en dirección al eje A1.

Son conocidos procedimientos similares para la compensación de cambios de ubicación dependientes de la temperatura en una máquina herramienta, por ejemplo, por los documentos DE 198 00 033 A1 o DE 10 2004  
45 044838 A1.

Sin embargo, tales procedimientos para la compensación de cambios de ubicación dependientes de la temperatura en una máquina herramienta son imprecisos. Además, desde hace mucho tiempo se intenta disminuir cada vez más los tiempos de producción e improductivos (y, con ello, los costes de las piezas) de un mecanizado con  
50 desprendimiento de virutas en una máquina herramienta aumentando la dinámica de los ejes de la máquina, de tal manera que debido a esto aumentan las desviaciones de causa térmica con cada generación de máquina con dinámica aumentada. Particularmente, los desplazamientos térmicos en una máquina herramienta con ello son más relevantes de generación en generación de máquinas herramienta, ya que los desplazamientos descritos de causa térmica aumentan con la dinámica de la máquina herramienta, en particular debido a que el rozamiento en los  
55 elementos de accionamiento y guía y el calentamiento subsiguiente aumentan con la aceleración y, sobre todo, la velocidad máxima.

Además, en general, las máquinas herramienta poseen varios ejes basados unos en otros de forma seriada. Esto significa que los desplazamientos térmicos de los ejes individuales hacia la herramienta o la pieza de trabajo se suman y se obtienen los desplazamientos termoelásticos que tienen su efecto en la herramienta o en la pieza de trabajo dependiendo de todos los ejes basados unos en otros de forma seriada. Esto potencia los errores de posición que aparecen.

En particular, mediante los alabeos térmicos o las deformaciones térmicas puede aparecer una desviación de la  
65 posición no solamente en dirección de avance (tal como en la mera dilatación de longitud) de un eje lineal, sino

además una desviación de la posición perpendicularmente con respecto a la dirección de avance. Particularmente en máquinas con grandes voladizos, es decir, caminos de traslación, se obtienen debido a estos efectos descritos grandes crecimientos térmicos que representan una gran parte de las imprecisiones que permanecen en la pieza de trabajo. En particular los calentamientos heterogéneos y los alabeos debidos a esto de piezas constructivas con una

5 carrera de temperatura igual, aplicada en un lado, conducen a desplazamientos térmicos claramente mayores (particularmente en otra dirección en el espacio) que la dilatación térmica lineal con calentamiento homogéneo.

Los inventores de la presente invención, en este sentido, han llevado a cabo mediciones, habiéndose hallado que las partes de la desviación en una punta de herramienta normalizadas al camino de trabajo de la máquina

10 ciertamente se encuentran solo en un intervalo de -0,15 a 0,3 por mil, sin embargo, esto representa incluso con un camino de trabajo de 500 mm al fin y al cabo aproximadamente -100 a 150  $\mu\text{m}$ , no satisfaciendo estos valores, con los actuales requisitos, la precisión de mecanizado de piezas de trabajo en una máquina herramienta y teniéndose que reducir o compensar.

Además se describen procedimientos para la determinación de una compensación dependiente de la temperatura de cambios de ubicación, en parte teniendo en cuenta una posición de eje, en los siguientes documentos: artículo "Robust Thermal Error Modeling and Compensation for CNC Machine Tools" de Jie Zhu (2008-01-01; documento XP55033155), artículo "Development of methods for numerical error correction of machine tools" de P. Schellekens *et al.* (1993-01-01; documento XP55033157); artículo "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error compensation" de S. Yang *et al.* (1996-01-01; documento XP004021808), artículo "Real-Time Compensation for Time-Variant Volumetric Errors on a Machining Center" de J. S. Chen *et al.* (1993-11-01; Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Series B: Journal of Engineering for Industry, ASME, New York, US, vol. 115, N° 4, ISSN: 0022-0817), documentos US 2006/218811 A1, EP 0 625 739 A1, DE 103 12 025 A1 y DE 10 2007 045592 A1. A partir de los documentos aparecen procedimientos para la compensación de un

15 cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con al menos un primer eje lineal que comprende: registro de varios valores de temperatura, establecimiento de diferencias de temperatura de los valores de temperatura, determinación de un valor de compensación dependiendo de las diferencias de temperatura y compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del valor de compensación, determinándose el valor de compensación, además, dependiendo de una posición de eje de un eje lineal.

### Resumen de la invención

En vista de las desventajas que se han descrito anteriormente de los procedimientos conocidos por el estado de la técnica para la compensación de cambios de ubicación dependientes de la temperatura en una máquina

35 herramienta, es un objetivo de la presente invención evitar las desventajas del estado de la técnica y facilitar un procedimiento mejorado para la compensación de cambios de ubicación dependientes de la temperatura en una máquina herramienta, con los que se pueda llevar a cabo de forma más eficaz y precisa la compensación de los desplazamientos térmicos.

Los objetivos que se han descrito anteriormente de la presente invención se resuelven de acuerdo con la invención tal como se describe en las reivindicaciones independientes. Se describen características de formas de realización

40 preferentes de la presente invención en las reivindicaciones dependientes.

Un procedimiento para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con al menos un primer eje lineal que comprende las etapas registro de al menos una primera

45 temperatura en una primera posición de medición de temperatura del primer eje lineal de la máquina herramienta, establecimiento de una primera diferencia de temperatura entre una primera temperatura de referencia y la primera temperatura, determinación de un primer valor de compensación dependiendo de la primera diferencia de temperatura y compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer

50 valor de compensación. En este caso, de acuerdo con la invención, el primer valor de compensación se determina además dependiendo de una posición de eje del primer eje lineal. Por tanto, de acuerdo con la invención, en la etapa determinación de un primer valor de compensación se determina el primer valor de compensación dependiendo de la primera diferencia de temperatura así como dependiendo de la posición de eje del primer eje lineal.

Por tanto, de acuerdo con la invención se lleva a cabo la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura adicionalmente dependiendo de una posición de eje de un eje lineal de la máquina herramienta. A diferencia del estado de la técnica, en este caso, por tanto se incluye la posición de al menos un o, dado el caso, varios ejes de la máquina herramienta en el cálculo de valores de compensación para la compensación de los

55 cambios de ubicación dependientes de la temperatura en la máquina herramienta. Esto tiene en particular la ventaja de que se pueden compensar de forma adaptada dependiendo de la posición también los desplazamientos térmicos dependientes de la posición de los ejes individuales, que se suman, es decir, de forma adaptada a la posición real momentánea del eje.

En este sentido, en particular, los inventores observaron que los cambios de ubicación térmicos en una máquina herramienta que se pueden producir debido a una aportación heterogénea de calor y que tienen como consecuencia

65

alabeos de piezas constructivas, generan un error de posición que presenta una parte tanto independiente de la posición como una dependiente de la posición, no pudiéndose tener en cuenta el error de posición dependiente de la posición en los procedimientos de compensación conocidos por el estado de la técnica.

- 5 De acuerdo con la presente invención, que prevé una compensación dependiente de la posición de desplazamientos térmicos, sin embargo, el desplazamiento térmico se puede compensar ventajosamente con precisión dependiendo de las posiciones de eje en cada posición de eje. Por tanto, se propone calcular un valor de compensación o varios valores de compensación no solo dependiendo de una o varias temperaturas medidas o diferencias de temperatura como en el estado de la técnica, sino adicionalmente dependiendo de una o varias posiciones de eje de los ejes o
- 10 ejes lineales de la máquina herramienta que influyen en la posición de la herramienta y/o la pieza de trabajo. En este caso, la posición de eje de uno o varios ejes se puede emplear para compensar o compensar con mayor precisión que en los procedimientos de compensación conocidos en el estado de la técnica una parte dependiente de la posición del error de posición mediante un valor de compensación calculado correspondientemente.
- 15 En este sentido, preferentemente, esta parte dependiente de la posición se determina también para direcciones perpendiculares con respecto a la dirección del movimiento del eje lineal en el que se ha establecido la diferencia de temperaturas. Preferentemente, para máquinas herramienta con cinemática seriada en las que varios ejes están basados unos en otros de forma seriada, se incluye la posición de eje de todos los ejes de base seriada. Las respectivas posiciones de eje de los ejes de la máquina herramienta se pueden leer de una unidad de control de la
- 20 máquina herramienta, por ejemplo, el denominado CN de la máquina herramienta y dependiendo de la posición de eje de uno o varios ejes de la máquina herramienta se pueden calcular uno o varios valores de compensación dependientes de la posición de eje que se pueden incluir entonces en el circuito de regulación de la máquina herramienta, por ejemplo, para corregir posiciones teóricas de eje de los respectivos ejes o superponer correspondientemente a los calculados uno o varios valores de compensación para compensar los desplazamientos
- 25 térmicos de las piezas constructivas de la máquina herramienta o de los ejes de la máquina herramienta. En este sentido, los valores de compensación se pueden calcular, por ejemplo, en el CN de la máquina o el CLP de la máquina. En este caso, preferentemente, se tienen en cuenta las posiciones de todos los ejes de la máquina herramienta que contribuyen, en una cadena cinemática, a la posición de la herramienta o de la pieza de trabajo.
- 30 Además se determinan valores de compensación preferentemente para varias, de forma particularmente preferente para las tres direcciones del espacio. De acuerdo con la presente invención es posible que un desplazamiento dependiente de la temperatura en la máquina herramienta se compense de forma mejorada que con el cálculo de valores de compensación sin tener en cuenta la posición de eje de los ejes de la máquina herramienta, ya que, de acuerdo con la invención, se pueden tener en cuenta también desplazamientos térmicos dependientes de la posición
- 35 de forma compensatoria, por lo que se puede conseguir una termo-compensación muy mejorada. El crecimiento térmico de la máquina herramienta, en particular incluyendo el crecimiento térmico debido a calentamientos aportados de forma heterogénea y deformaciones o alabeos resultantes a partir de esto de piezas constructivas, se puede compensar de forma exitosa y mejorada.
- 40 En resumen, de acuerdo con la invención se compensa un desplazamiento de causa térmica de los ejes de la máquina mediante un enfoque correlativo, en el que uno o varios valores de compensación se determinan no solo dependiendo de una o varias temperaturas medidas o diferencias de temperatura establecidas, sino también dependiendo de una o varias posiciones de eje de los ejes de la máquina herramienta que influyen en la posición de la herramienta y/o la pieza de trabajo.
- 45 Preferentemente, el primer valor de compensación comprende una parte independiente de la posición y una parte dependiente de la posición, dependiendo la parte dependiente de la posición del primer valor de compensación preferentemente al menos de la posición de eje del primer eje lineal. Esto tiene la ventaja de que se puede corregir o compensar un error de posición tanto independiente de la posición de eje como dependiente de la posición de eje
- 50 mediante una parte correspondiente independiente de la posición y una dependiente de la posición. En este sentido, las partes independientes de la posición se pueden producir, por ejemplo, a partir de una dilatación lineal con calentamiento uniforme de una pieza constructiva en comparación con una temperatura comparativa.
- 55 En una alternativa de acuerdo con la invención se determina el primer valor de compensación dependiendo de la relación de la posición de eje del primer eje lineal con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal. Para poder conseguir una precisión incluso mayor durante la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura, el primer valor de compensación se puede determinar como alternativa dependiendo del cuadrado de la relación de la posición de eje del primer eje lineal con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal. De este modo se pueden determinar la o las partes dependientes de la posición de uno o varios valores de compensación
- 60 dependiendo de una relación sencilla de la posición de eje de un eje lineal con respecto a la longitud de eje de un eje lineal, es decir, mediante un parámetro adimensional fácil de manejar. Ya que el alabeo de una pieza constructiva aparece esencialmente con forma de arco cuando una pieza constructiva presenta en un lado otra temperatura que en otro lado de la pieza constructiva, el error de posición que depende de la posición del eje esencialmente no es lineal, de tal manera que se puede conseguir un resultado de compensación incluso mejor
- 65 cuando se determina un valor de compensación no dependiendo de la relación de la posición de eje con respecto a la longitud de eje de un eje lineal, sino más bien dependiendo del cuadrado de la relación de la posición de eje con

respecto a la longitud de eje del eje lineal. Ya que, sin embargo, los alabeos se encuentran todavía en el intervalo de la aproximación lineal, la simple aplicación de la relación de la posición de eje con respecto a la longitud de eje de un eje lineal ya es una buena aproximación y ya posibilita una excelente compensación dependiente de la posición de desplazamientos dependientes de la temperatura en la máquina herramienta.

5 Preferentemente, en la etapa compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer valor de compensación se compensa un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una dirección perpendicular con respecto a la dirección del primer eje lineal. En caso de deformaciones térmicas que se deben a alabeos o desplazamientos que se producen debido a calentamientos heterogéneos de piezas constructivas de la máquina herramienta, es otra particularidad que se produce una desviación de la posición no en dirección de avance, sino perpendicularmente con respecto a la dirección de avance, es decir, de forma diferente que en una mera dilatación de longitud en dirección de avance de un eje lineal. De este modo, en este sentido se consigue la ventaja de que se pueden compensar los desplazamientos térmicos que se deben a alabeo en una dirección perpendicular con respecto a la dirección de un eje lineal también de forma ventajosa y precisa.

15 Preferentemente, en la etapa compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer valor de compensación se compensa un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una dirección de un segundo eje lineal de la máquina herramienta, estando dispuesto el segundo eje lineal preferentemente en perpendicular con respecto al primer eje lineal. Esto posibilita, ventajosamente, compensar desplazamientos térmicos que se producen debido a calentamiento heterogéneo de una o varias piezas constructivas del primer eje lineal en una dirección de un segundo eje lineal de la máquina herramienta, por ejemplo, mediante adaptación de una posición teórica de eje del segundo eje lineal para la compensación de un error de posición en dirección del segundo eje lineal.

25 De acuerdo con la invención, la etapa de la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura comprende además la etapa adaptación de un primer valor de posición teórica de eje de un segundo eje lineal de la máquina herramienta dependiendo del primer valor de compensación, llevándose a cabo la adaptación de la posición teórica de eje del segundo eje lineal dependiendo de la posición de eje del primer eje lineal. Con ello se pueden compensar desplazamientos térmicos o errores de posición debido a desplazamientos térmicos corrigiéndose o adaptándose la posición teórica de eje de un eje lineal de la máquina herramienta dependiendo del valor de compensación calculado, de tal manera que gracias a la posición teórica de eje adaptada del segundo eje lineal se puede compensar el error de posición en dirección del segundo eje lineal que se produce debido a los alabeos térmicos de las piezas constructivas del primer eje lineal.

35 En este caso, el cálculo de un valor de compensación o de varios valores de compensación se realiza con una sincronización lo más rápida posible en una unidad de control, por ejemplo, el denominado CN (CN por "control numérico") de máquina o el control programable por memoria (CPM), denominado también CL de máquina o CLP (CLP por "controlador lógico programable") de máquina. Entonces, los valores de compensación calculados dependiendo de la posición se pueden superponer por la unidad de control, el denominado CN de máquina, al o a los varios valores teóricos de eje de los ejes lineales de la máquina herramienta. Además, a los valores de compensación para la compensación de las deformaciones de causa térmica debido a los calentamientos (irregulares) de las piezas constructivas de bastidor de la máquina se pueden superponer otras partes de compensación, por ejemplo, para la compensación de los desplazamientos por el husillo del motor.

45 Por tanto, se propone un procedimiento en el que se pueden compensar los desplazamientos de causa térmica en una máquina herramienta preferentemente mediante medición de una o varias temperaturas en la máquina herramienta y mediante el cálculo de uno o varios valores de compensación correlativos a la temperatura medida en el control de la máquina mediante superposición de las posiciones teóricas de eje en el control de la máquina o en un equipo regulador de la ubicación. El o los valores de compensación calculados se usan, preferentemente, para corregir las posiciones teóricas de eje de uno o varios ejes lineales de la máquina herramienta para compensar los cambios de ubicación dependientes de la temperatura, respectivamente, en dirección de los ejes.

55 De acuerdo con un ejemplo de realización, el procedimiento de acuerdo con la invención comprende además las etapas registro de al menos una segunda temperatura en una tercera posición de medición de temperatura de un segundo eje lineal de la máquina herramienta, establecimiento de una segunda diferencia de temperatura entre una segunda temperatura de referencia y la segunda temperatura y determinación de un segundo valor de compensación dependiendo de la segunda diferencia de temperatura, compensándose un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer valor de compensación y del segundo valor de compensación y determinándose el segundo valor de compensación, además, dependiendo de una posición de eje del segundo eje lineal. Con ello, ventajosamente, se puede compensar también un desplazamiento térmico debido a dilatación térmica y deformación de una o varias piezas constructivas de un segundo eje lineal de la máquina herramienta estableciendo una segunda diferencia de temperatura. Para esto se determina preferentemente un segundo valor de compensación dependiendo de la posición de eje del segundo eje lineal, de tal manera que tanto la posición de eje del primer como la posición de eje del segundo eje lineal se incluyen en la compensación de los desplazamientos dependientes de la temperatura y se puede conseguir una termo-compensación incluso más óptima.

Preferentemente, la etapa de la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura comprende además las etapas adaptación de un primer valor de posición teórica de eje del segundo eje lineal de la máquina herramienta dependiendo del primer valor de compensación y/o adaptación de un segundo valor de posición teórica de eje del primer eje lineal de la máquina herramienta dependiendo del segundo valor de compensación, llevándose a cabo la adaptación de la posición teórica de eje del segundo eje lineal, preferentemente, dependiendo de la posición de eje del primer eje lineal y la adaptación de la posición teórica de eje del primer eje lineal, preferentemente, dependiendo de la posición de eje del segundo eje lineal. Esto posibilita ventajosamente que se pueda compensar la posición teórica de eje de un eje lineal respectivamente de forma ventajosa dependiendo de la posición de eje del respectivamente otro eje lineal, de tal manera que se pueden compensar o corregir respectivamente deformaciones y desplazamientos debido a calentamiento heterogéneo de piezas constructivas, que causan errores de posición en perpendicular con respecto a la dirección de avance de uno de los ejes lineales, mediante adaptación de la posición teórica de eje del respectivamente otro eje lineal.

De acuerdo con la invención, la primera temperatura de referencia es una temperatura medida en una segunda posición de medición de temperatura del primer eje lineal y, preferentemente, la segunda temperatura de referencia es una temperatura medida en una cuarta posición de medición de temperatura del segundo eje lineal. Como alternativa, la segunda temperatura de referencia puede ser igual a la primera temperatura de referencia, en particular igual a una temperatura de referencia unitaria registrada en una posición de medición de temperatura de referencia de la máquina herramienta para dos o más (o todas) las piezas constructivas de la máquina herramienta. Por ejemplo, la segunda temperatura de referencia y la primera temperatura de referencia pueden ser iguales a una temperatura de referencia dependiente de la temperatura del entorno de la máquina herramienta. Esto posibilita ventajosamente que se determine, por ejemplo, en ejes basados unos en otros de forma seriada en un segundo eje lineal, que se basa en el primer eje lineal, un valor de compensación dependiendo de la posición de eje del primer eje lineal así como dependiendo de la posición de eje del segundo. De este modo, para la adaptación de las posiciones teóricas de eje del segundo eje lineal se pueden compensar de forma óptima tanto desplazamientos térmicos debido a deformación de piezas constructivas del primer eje lineal como desplazamientos térmicos debido a deformación de piezas constructivas del segundo eje lineal. Si se determina además también el segundo valor de compensación dependiendo de una posición de eje del primer eje lineal, ventajosamente se pueden calcular, respectivamente, valores de compensación para ambos ejes lineales en los que se pueden tener en cuenta respectivamente las posiciones de eje del primer y del segundo eje lineal, por lo que se posibilita una termo-compensación incluso más óptima.

De acuerdo con la invención, el primer y el segundo eje lineal de la máquina herramienta están configurados como dos ejes basados unos en otros de forma seriada, con voladizo en un lado o basados en una bancada de máquina, estando basado el segundo eje lineal sobre el primer eje lineal y determinándose el primer valor de compensación además dependiendo de una posición de eje del segundo eje lineal. En este caso, el segundo valor de compensación se determina además dependiendo de una posición de eje del primer eje lineal.

De acuerdo con un ejemplo de realización preferente, el procedimiento de acuerdo con la invención comprende además las etapas determinación de un tercer valor de compensación dependiendo de la primera diferencia de temperatura y/o determinación de un cuarto valor de compensación dependiendo de la segunda diferencia de temperatura, compensándose un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una dirección del primer eje lineal, preferentemente, dependiendo del tercer valor de compensación y del segundo valor de compensación y compensándose un cambio de ubicación dependiente de la temperatura, preferentemente, en una dirección del segundo eje lineal dependiendo del primer valor de compensación y del cuarto valor de compensación, determinándose el tercer valor de compensación además preferentemente dependiendo de la posición de eje del primer eje lineal y determinándose el cuarto valor de compensación además preferentemente dependiendo de la posición de eje del segundo eje lineal. Con ello, en una máquina herramienta con al menos dos ejes basados unos en otros de forma seriada se puede conseguir una termo-compensación óptima, en la que se calculan valores de compensación de tal manera que tanto una diferencia de temperatura de una o varias piezas constructivas del primer eje lineal como una diferencia de temperatura de una o varias piezas constructivas del segundo eje lineal se incluyen y se calculan múltiples valores de compensación, en los que se incluyen y se tienen en cuenta, respectivamente, una o varias posiciones de eje de los ejes lineales. Esto posibilita una excelente compensación de desplazamientos térmicos en una configuración de una máquina herramienta, en la que se determina la posición de herramienta y pieza de trabajo mediante varios ejes basados unos en otros de forma seriada, por ejemplo, con voladizo no modificado en un lado, en los que se superponen los efectos por lo demás debido a la estructura basada unos en otros de forma seriada. De este modo se pueden compensar efectos en los que se obtienen desplazamientos térmicos no solo debido a los efectos en una pieza constructiva, sino también debido a superposición de los efectos dependientes de la temperatura que pueden ocurrir en todas las piezas constructivas. Para esto se determina preferentemente un desplazamiento térmico en la herramienta o la pieza de trabajo mediante múltiples diferencias de temperatura en las piezas constructivas de los ejes o de la máquina herramienta dependiendo de la posición de eje o de las posiciones de eje, preferentemente de las posiciones de eje de todos los ejes de movimiento implicados que contribuyen a la posición de la herramienta o de la pieza de trabajo.

Preferentemente, la etapa de la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura comprende además las etapas adaptación de un primer valor de posición teórica de eje del segundo eje lineal de la

máquina herramienta dependiendo del primer valor de compensación y del cuarto valor de compensación y/o adaptación de un segundo valor de posición teórica de eje del primer eje lineal de la máquina herramienta dependiendo del tercer valor de compensación y del segundo valor de compensación.

5 Preferentemente, la máquina herramienta comprende múltiples ejes lineales basados unos en otros de forma seriada con voladizo, estableciéndose preferentemente para cada uno de los múltiples ejes lineales al menos una temperatura en una posición de medición de temperatura del eje lineal y estableciéndose una respectiva diferencia de temperatura entre una respectiva temperatura de referencia y la respectiva temperatura establecida y determinándose preferentemente para cada uno de los ejes lineales un valor total de compensación que se  
10 corresponde, preferentemente, con una suma de múltiples valores de compensación, cuya cantidad preferentemente es igual a la cantidad de los ejes lineales basados unos en otros de forma seriada, siendo cada valor de compensación individual con preferencia directamente proporcional a exactamente una de las diferencias de temperatura. En este caso se menciona, a modo de ejemplo, el séptimo ejemplo de realización descrito más adelante, en el que se indica una fórmula general para el cálculo de valores de compensación para ejes lineales de  
15 acuerdo con la presente descripción.

De este modo se puede llevar a cabo ventajosamente una termo-compensación, en la que para cada uno de múltiples ejes lineales basados unos en otros de forma seriada se determina un valor total de compensación que se corresponde preferentemente con una suma de valores de compensación que respectivamente es directamente  
20 proporcional a una de las diferencias de temperatura en uno de los ejes, de tal manera que el valor total de compensación se corresponde con una suma de valores de compensación en la que cada valor de compensación individual depende linealmente de otra diferencia de temperatura del otro eje lineal, de tal manera que para cada valor total de compensación se pueden incluir todas las diferencias de temperatura de todos los ejes lineales.

25 En este caso, naturalmente, los respectivos valores de compensación están determinados de acuerdo con la invención dependiendo de la posición y dependen al menos de una posición de eje de uno de los ejes lineales, dado el caso también de varias o incluso todas las posiciones de eje lineal de los ejes lineales basados unos en otros de forma seriada. En este caso se describe detalladamente más adelante una fórmula general particular con referencia al sexto o séptimo ejemplo de realización de la presente invención. Preferentemente, cada valor de compensación  
30 individual se forma dependiendo de una suma de términos dependientes de la posición, dependiendo cada término dependiente de la posición preferentemente de la posición de eje de al menos uno de los ejes lineales. Preferentemente, cada uno de los términos dependientes de la posición depende de la relación de la posición de eje con respecto a la longitud de eje de al menos uno de los ejes lineales. Preferentemente, cada valor de compensación individual comprende un término dependiente de la posición para el eje lineal a cuya diferencia de  
35 temperatura es directamente proporcional el valor de compensación. Además, cada valor de compensación individual comprende preferentemente términos dependientes de la posición al menos para todos los ejes lineales anteriores de los múltiples ejes lineales de base seriada.

40 Cuando el primer eje lineal es un carro trasladable sobre una bancada de máquina se determina el primer valor de compensación además preferentemente de tal manera que se incluye otro factor  $(AP1 - AL1/2) / (AL1/2)$ , indicando AP1 la posición de eje del primer eje lineal e indicando AL1 la longitud de eje del primer eje lineal. De este modo se puede aplicar la termo-compensación dependiente de la posición de desplazamientos térmicos en la máquina herramienta también a ejes lineales en los que está dispuesto un carro trasladable en una bancada de máquina,  
45 pudiendo estar la bancada de máquina abombada o alabeada dado el caso debido a deformación térmica. Para facilitar en este caso una compensación ventajosa de los desplazamientos térmicos de forma adaptada al eje lineal con el carro trasladable sobre la bancada de la máquina, en este caso se aplica a otro factor que asegura que los valores de compensación calculados para la compensación de los desplazamientos térmicos por ejemplo en una posición media del carro trasladable en la bancada de la máquina sean mínimos.

50 Preferentemente se realiza la etapa determinación de uno o varios valores de compensación en una unidad reguladora de la ubicación de un equipo de control numérico de la máquina herramienta o en un equipo de control programable por memoria de la máquina herramienta. Además se realiza la etapa compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura preferentemente dependiendo de uno o varios valores de compensación en el equipo de control numérico de la máquina herramienta. El cálculo de los valores de compensación dependientes  
55 de la posición se tiene que efectuar con una sincronización lo más rápida posible en el control de máquina de la máquina herramienta, para lo que se propone un cálculo de los valores de compensación en la unidad de control de la máquina, el denominado CN de la máquina herramienta en el ciclo de regulador de ubicación.

60 Como alternativa se puede realizar un cálculo además en el CLP de la máquina herramienta (en el CPM, es decir, unidad de control programable por memoria de la máquina herramienta). En este caso, el cálculo de los valores de compensación ya no se realizaría de forma sincrónica con el ciclo del regulador de ubicación, de tal manera que con rápidos movimientos de traslación de la máquina por los términos dependiente de la posición se puede producir una "anticipación" o "seguimiento" de los valores de compensación. Por ello, el cálculo de los valores de compensación en la unidad de control (es decir, el CN de la máquina) es ventajoso, sin embargo, los efectos de seguimiento o de  
65 anticipación son pequeños siempre que el ciclo de CLP no sea significativamente más lento que el ciclo del regulador de la posición del control de la máquina. Si, por ejemplo, el ciclo de CLP como en muchos controles de

máquina con 4 ms es un factor 4 más lento que el ciclo del regulador de ubicación de CN, por ejemplo, con 1 ms, entonces el eje de la máquina o los ejes de la máquina incluso con una máxima velocidad de avance extraordinariamente alta de hasta 100 m por minuto en 4 ms no pueden recorrer más de 6,7 mm. Con una longitud de eje total de 500 mm, esto conduce a través del término dependiente de la posición de posición de eje con respecto a longitud de eje sin embargo solo a un error en el valor de compensación dependiente de la posición de como máximo 1,3 %, de tal manera que los errores que se producen debido a un cálculo de los valores de compensación en el CLP de la máquina debido a la menor velocidad del CLP con respecto al CN son despreciables.

Además, tal como se describe a continuación, se propone un dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con al menos un eje lineal, que está equipado para llevar a cabo un procedimiento para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en la máquina herramienta según al menos uno de los procedimientos descritos anteriormente o procedimientos preferentes. Para esto, a continuación se describen esencialmente los medios que están equipados para llevar a cabo las etapas de los procedimientos descritos anteriormente o de los aspectos preferentes de los mismos.

Además se facilita un dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con al menos un primer eje lineal de acuerdo con al menos uno de los procedimientos que se han descrito anteriormente. El dispositivo comprende un primer medio de registro de temperatura para el registro de al menos una primera temperatura en la primera posición de medición de temperatura de un primer eje lineal de la máquina herramienta, un medio de establecimiento de diferencia de temperatura para el establecimiento de una primera diferencia de temperatura entre una primera temperatura de referencia y la primera temperatura, un medio de determinación de valor de compensación para la determinación de un primer valor de compensación dependiendo de la primera diferencia de temperatura y un medio de compensación de cambio de ubicación para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer valor de compensación. El medio de compensación de cambio de ubicación está equipado para determinar el primer valor de compensación además dependiendo de una posición de eje del primer eje lineal.

Finalmente se facilita de acuerdo con la presente invención también un sistema con una máquina herramienta con al menos un primer eje lineal y uno de los dispositivos que se han descrito anteriormente para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en la máquina herramienta de acuerdo con uno de los procedimientos de acuerdo con la invención que se han descrito anteriormente.

En resumen, de acuerdo con la invención se facilitan un procedimiento y un dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con al menos un eje lineal que posibilita llevar a cabo un procedimiento de compensación mejorado en comparación con el estado de la técnica para la compensación de cambios de ubicación dependientes de la temperatura en la máquina herramienta, ya que adicionalmente a las diferencias de temperatura establecidas en piezas constructivas de los ejes lineales o de la máquina herramienta se establece adicionalmente una parte dependiente de la posición dependiendo de una o varias posiciones de eje de uno o varios ejes lineales de la máquina herramienta, de tal manera que se puede llevar a cabo la compensación de forma mejorada en comparación con el estado de la técnica adicionalmente dependiendo de la posición.

#### Breve descripción de las figuras

La Figura 1 muestra, esquemáticamente, un carro trasladable de un primer eje lineal de una máquina herramienta bajo la influencia de calentamiento homogéneo y una dilatación térmica lineal resultante a partir de esto.

La Figura 2 muestra, esquemáticamente, una deformación de alabeo de una pieza constructiva de una máquina herramienta, por ejemplo, un carro, bajo la influencia de un calentamiento heterogéneo.

La Figura 3 ilustra un error de posición dependiente de la posición de un carro de un primer eje lineal de una máquina herramienta con una deformación dependiente de la temperatura con calentamiento heterogéneo.

Las Figuras 4A y 4B muestran la deformación térmica con calentamiento heterogéneo de piezas constructivas de dos ejes lineales basados uno en otro de forma seriada de una máquina herramienta.

La Figura 5 muestra, a modo de ejemplo, la deformación dependiente de la temperatura de una bancada de máquina de una máquina herramienta con calentamiento heterogéneo.

La Figura 6 muestra, esquemáticamente, un dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta según un ejemplo de realización de la presente invención.

**Descripción detallada de ejemplos de realización preferentes de la presente invención**

5 A continuación se describen de forma detallada ejemplos para los antecedentes de la invención y ejemplos de realización preferentes de la presente invención con referencia a las figuras adjuntas. La presente invención, sin embargo, no está limitada a los ejemplos de realización descritos. La presente invención está definida por el alcance de las reivindicaciones. Las características iguales o similares de los ejemplos de realización se indican en las figuras con las mismas referencias.

10 La Figura 1 muestra un carro S1 de un primer eje lineal A1 de una máquina herramienta que es trasladable en dirección de la parte "eje 1" y que presenta una longitud L y una altura H. Durante un calentamiento homogéneo o cambio de la temperatura se dilata de forma lineal el carro S1 (en este caso, S1 indica el carro en situación no dilatada, es decir, por ejemplo, a una temperatura de referencia o base determinada y S1' indica el carro en situación dilatada), calculándose el cambio de altura o el cambio de longitud del siguiente modo:

15 
$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta H = \alpha \cdot H \cdot \Delta T \quad (4)$$

20  $\Delta L$  en este caso describe el cambio de longitud durante un calentamiento uniforme con el cambio de temperatura  $\Delta T$  y  $\alpha$  indica el coeficiente de dilatación térmica del material del carro S1.  $\Delta H$  describe el cambio de altura del carro S1 con un calentamiento homogéneo o un aumento de temperatura en la magnitud  $\Delta T$  y  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica del material del carro S1.

25 De este modo, mediante un calentamiento homogéneo en la magnitud  $\Delta T$  se obtiene un crecimiento térmico a través de una dilatación térmica lineal de un carro o de una bancada de máquina de una máquina herramienta, obteniéndose esta parte de la dilatación térmica lineal a partir del aumento de temperatura  $\Delta T$  de una pieza constructiva multiplicado por el coeficiente de dilatación térmica  $\alpha$ .

30 Se obtiene otra parte del crecimiento térmico a través de diferencias de temperatura de piezas constructivas, por ejemplo, mediante una aportación irregular de calor a las piezas constructivas de la máquina herramienta. Como ya se ha descrito anteriormente, en este caso están colocados, por ejemplo, accionamientos y guías generalmente en un lado inferior de una pieza constructiva, de tal manera que este lado inferior posiblemente se calienta de forma más intensa y más rápida que el lado superior de una pieza constructiva, por ejemplo, el carro de una máquina herramienta, de tal manera que se obtiene un calentamiento en un lado o un calentamiento heterogéneo en la pieza constructiva que conduce a un alabeo de la pieza constructiva, tal como está representado esquemáticamente, por ejemplo, en la Figura 2.

40 Mediante los diferentes calentamientos en el lado superior y el lado inferior de la pieza constructiva, descritos por cambios de temperatura  $\Delta T_{ARRIBA}$  y  $\Delta T_{ABAJO}$  se obtiene en dirección longitudinal del carro S1 una dilatación irregular del lado superior e inferior del carro S1, de tal manera que se produce el alabeo, tal como está representado en la Figura 2.

En este caso, la longitud en el lado superior del carro S1 se obtiene del siguiente modo:

45 
$$L_{ARRIBA} = L + \alpha \cdot L \cdot \Delta T_{ARRIBA} \quad (5)$$

La longitud del lado inferior del carro S1 después del cambio de temperatura se obtiene del siguiente modo:

50 
$$L_{ABAJO} = L + \alpha \cdot L \cdot \Delta T_{ABAJO} \quad (6)$$

En este caso, el alabeo del carro S1 se puede describir mediante un radio R, tal como está representado en la Figura 2, aplicándose en este caso la siguiente relación:

55 
$$R/L_{ABAJO} = (R - H)/L_{ARRIBA} \quad (7)$$

Esto se puede resolver según el radio R del siguiente modo:

$$R = H \cdot L_{ABAJO}/(L_{ABAJO} - L_{ARRIBA}) \quad (8)$$

60 Sin embargo, un carro S1 deformado de este modo durante la traslación en dirección del eje lineal "eje 1" en la máquina herramienta ya no efectúa un movimiento en línea recta, sino que se traslada en un movimiento con forma de arco tal como está representado, por ejemplo, en la Figura 3. De este modo, el desplazamiento térmico o el error de posición térmico presenta una parte en una dirección perpendicular con respecto al primer eje lineal (dirección de la flecha "eje 1"), es decir, en dirección del segundo eje lineal (dirección de la flecha "eje 2") de un valor de base que es dependiente de la posición (en este caso, a modo de ejemplo, 10  $\mu\text{m}$ ) y un valor que depende de la posición del

carro, presentando el error de posición con una mínima posición de eje, es decir, con una relación de posición de eje con respecto a longitud de eje igual a cero, a modo de ejemplo, 10 μm y presentando el error de posición con máxima posición de eje, es decir, con una relación de posición de eje con respecto a longitud de eje igual a 1, a modo de ejemplo, 30 μm, es decir, el máximo error de posición.

5 En el primer ejemplo descrito a continuación se describe cómo se puede compensar exitosamente una deformación de este tipo de un carro S1 de acuerdo con la presente invención.

10 Primer ejemplo para los antecedentes de la invención

En el primer ejemplo se compensa el desplazamiento de causa térmica de los ejes de la máquina mediante un enfoque correlativo, determinándose un valor de compensación no solo dependiendo de una temperatura medida, sino también dependiendo de una posición de eje de un eje que influye en la posición de la herramienta y/o de la pieza de trabajo.

15 De acuerdo con el carro S1 deformado térmicamente descrito en la Figura 3 de un primer eje lineal A1, que puede trasladar el carro S1 en dirección de la flecha "eje 1", no es necesario de forma obligada determinar una compensación dependiente de la posición en dirección del primer eje lineal, ya que la deformación del carro se obtiene en el eje principal en dirección del eje que se encuentra en perpendicular con respecto al primer eje lineal A1 (dirección de la flecha "eje 2") (en este caso, S1 indica en la Figura 3 el carro en una situación no alabeada, es decir, con  $T_{REFERENCIA} = T_{BASE}$ , S1' indica el carro alabeado dependiendo de la temperatura en una posición de traslación con posición de eje (A1)/longitud de eje (A1)) = 1 y S1" indica el carro alabeado dependiendo de la temperatura en una posición de traslación con posición de eje (A1) / longitud de eje (A1)) = 0).

25 Por tanto, un valor de compensación ΔA1 para una compensación en dirección del eje 1 se puede calcular del siguiente modo:

$$\Delta A1 = (T_{REFERENCIA} - T_{BASE}) \cdot K_{11} \quad (9)$$

30 Esto se corresponde con el procedimiento de acuerdo con el estado de la técnica, ya que en el cálculo del valor de compensación ΔA1 se incluye solamente un factor de compensación K\_11 y una diferencia de temperatura  $T_{REFERENCIA} - T_{BASE}$ , describiendo la diferencia de temperatura  $T_{REFERENCIA} - T_{BASE}$  una diferencia de temperatura entre el lado superior y el lado inferior del carro S1 en la Figura 3.

35 Ya que, sin embargo, el error de posición en dirección perpendicular con respecto al primer eje lineal A1 debido a la deformación térmica del carro S1 depende de la posición, es ventajoso efectuar en esta situación, de acuerdo con la invención, una compensación mediante cálculo de un valor de compensación dependiente de la posición. En este caso, de acuerdo con el primer ejemplo de realización de la presente invención, un valor de compensación ΔA2 para la compensación de un error de posición debido al desplazamiento térmico en dirección de un segundo eje lineal A2, que se encuentra, por ejemplo, en perpendicular con respecto al primer eje lineal A1, se calcula del siguiente modo:

$$\Delta A2 = (T_{REFERENCIA} - T_{BASE}) \cdot [K_{21} + K_{22} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)})] \quad (10)$$

45 En este caso, a su vez, el cálculo del valor de compensación depende de la diferencia de temperatura  $T_{REFERENCIA} - T_{BASE}$ . Además, para el cálculo del valor de compensación ΔA2 se calcula una relación de la posición de eje el primer eje lineal A1 con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal A1 y se incluye de forma ponderada con un factor de compensación K\_22 en el cálculo del valor de compensación ΔA2. Además se posibilita una parte independiente de la posición del valor de compensación ΔA2 gracias al factor de compensación K\_21 adicional. Por tanto, la desviación de la posición mostrada en la Figura 3 se puede compensar exitosamente teniendo en cuenta la posición de eje del primer eje lineal A1, es decir, el eje que traslada el carro S1 en dirección de la flecha "eje 1".

50 Segundo ejemplo para los antecedentes de la invención

55 Tal como se puede ver en la Figura 3, el carro S1 debido al alabeo térmico efectúa un movimiento con forma de arco cuando se traslada en dirección de la flecha "eje 1". De este modo se puede aumentar además la precisión de la compensación del primer ejemplo incluyéndose en el término dependiente de la posición del valor de compensación ΔA2 no de forma lineal la relación de la posición de eje del primer eje A1 con respecto a la longitud de eje del primer eje A1, sino el cuadrado de este relación, de tal manera que la compensación mejorada se calcula de acuerdo con las siguientes fórmulas (11) y (12):

$$\Delta A1 = (T_{REFERENCIA} - T_{BASE}) \cdot K_{11} \quad (11)$$

$$\Delta A2 = (T_{REFERENCIA} - T_{BASE}) \cdot [K_{21} + K_{22} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)})^2] \quad (12)$$

Después del cálculo del valor de compensación  $\Delta A2$  de acuerdo con el primer o el segundo ejemplo se puede compensar el desplazamiento térmico basándose en el valor de compensación  $\Delta A2$  calculado superponiéndose este valor a una posición de eje teórica de un segundo eje que traslada, por ejemplo, una pieza de trabajo en dirección de la flecha "eje 2" o corrigiéndose de forma correspondiente al valor de compensación  $\Delta A2$  calculado. Esto sucede preferentemente en el control de la máquina, por ejemplo, en el CN de la máquina herramienta.

#### Primer ejemplo de realización

Si se determina la posición de la herramienta y la pieza de trabajo, como en muchas máquinas herramienta conocidas, mediante varios ejes basados de forma seriada unos en otros con voladizo en un lado y cambiante, se superpondrán los efectos de las deformaciones de las piezas constructivas de los ejes basados unos en otros de forma seriada.

Por tanto, el desplazamiento térmico se obtiene no solamente debido a los efectos en una pieza constructiva de un eje, sino mediante la superposición de los efectos que se realizan en todas las piezas constructivas de los ejes implicados. Particularmente se determina el desplazamiento térmico en la herramienta o en la pieza de trabajo mediante diferencias de temperatura en las piezas constructivas dependiendo de las posiciones de eje de todos los ejes de movimiento implicados que contribuyen a la posición de la herramienta o de la pieza de trabajo.

A modo de ejemplo, con respecto al primer ejemplo de realización de la presente invención se discuten dos ejes lineales A1 y A2 basados uno en otro de forma seriada, tal como se representa a modo de ejemplo en las Figuras 4A y 4B, estando dispuesta una pieza constructiva S2 trasladable del segundo eje lineal A2 de la máquina herramienta en lados opuestos de las respectivas piezas constructivas S1 trasladable del primer eje lineal A1 de la máquina herramienta. La pieza constructiva S1 del primer eje lineal A1, en este caso, es trasladable en dirección de la flecha "eje 1" y la pieza constructiva S2 del segundo eje lineal es trasladable en dirección de la flecha "eje 2".

En cada una de las piezas constructivas S1 y S2 se registra una temperatura en una primera posición de medición en un lado de la respectiva pieza constructiva y una temperatura en una segunda posición de medición en un lado opuesto de la respectiva pieza constructiva, determinándose a partir de los valores establecidos de temperatura en lados opuestos de las respectivas piezas constructivas diferencias de temperatura. Sin embargo, la presente invención no está limitada a que se midan en un eje dos valores de temperatura. Más bien, también es concebible que se registre una temperatura de base para varios ejes (por ejemplo, una temperatura del entorno) y que se registre solo una temperatura en cada eje para establecer una respectiva diferencia de temperatura con respecto a la temperatura de base. También es posible registrar en un eje más de dos temperaturas.

En las Figuras 4A y 4B está representado, a modo de ejemplo, que en la pieza constructiva S1 del primer eje lineal A1 en el lado superior se registra un valor de temperatura  $T_{Y,ARRIBA}$  y en el lado inferior, un valor de medición de temperatura  $T_{Y,ABAJO}$ , a partir de los cuales se establece una diferencia de temperatura  $T_{Y,ABAJO} - T_{Y,ARRIBA}$  que indica un calentamiento heterogéneo entre el lado superior y el inferior de la pieza de constructiva S1 del primer eje lineal A1. De forma análoga, en un lado posterior de la pieza constructiva S2 del eje lineal A2 se registra un valor de medición de temperatura  $T_{Z,ATRÁS}$  y en el lado anterior, un valor de medición de temperatura  $T_{Z,DELANTE}$  a partir de los cuales se determina una diferencia de temperatura  $T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}$  que indica un calentamiento heterogéneo de la pieza constructiva S2 del segundo eje lineal A2.

Como está representado en las Figuras 4A y 4B, una diferencia de temperatura de este tipo en la pieza constructiva S1 del primer eje lineal A1 o la pieza constructiva S2 del segundo eje lineal A2 conduce a un alabeo o una deformación térmica de las respectivas piezas constructivas que, al trasladar los respectivos ejes A1 y A2 en dirección de las flechas "eje 1" y "eje 2", conduce a desplazamientos térmicos de la herramienta que está fijada, eventualmente, en un alojamiento de herramienta W.

En este caso, S1 indica en las Figuras 4A y 4B una pieza constructiva del primer eje lineal A1 en una situación no alabeada, es decir, en  $T_{Y,ABAJO} = T_{Y,ARRIBA}$ , S1' indica la pieza constructiva alabeada dependiendo de la temperatura a modo de ejemplo del primer eje lineal A1 en una posición de traslación con posición de eje (A1) / longitud de eje (A1) = 0 y S1'' indica la pieza constructiva alabeada dependiendo de la temperatura a modo de ejemplo del primer eje lineal A1 en una posición de traslación con posición de eje (A1) / longitud de eje (A1) = 1. S2 indica en las Figuras 4A y 4B una pieza constructiva del segundo eje lineal A2 en una situación no alabeada, es decir, con  $T_{Z,ATRÁS} = T_{Z,DELANTE}$ , S2' indica la pieza constructiva alabeada dependiendo de la temperatura a modo de ejemplo del segundo eje lineal A2 en una posición de traslación con posición de eje (A2) / longitud de eje (A2) = 0 y S2'' indica la pieza constructiva alabeada dependiendo de la temperatura a modo de ejemplo del segundo eje lineal A2 en una posición de traslación con posición de eje (A2) / longitud de eje (A2) = 1.

De acuerdo con el primer ejemplo de realización de la presente invención, tal como se indica en las siguientes fórmulas (13) y (14) respectivamente para el eje A1 se establece un valor de compensación  $\Delta A1$  y para el eje A2, un valor de compensación  $\Delta A2$  que se pueden usar, como en los ejemplos descritos anteriormente, para corregir o superponer las posiciones teóricas de eje de los ejes A1 y A2 para compensar el desplazamiento térmico de la

herramienta en el alojamiento de herramienta W.

$$\begin{aligned} \Delta A1 = & (T_{Y,ABAJ0} - T_{Y,ARRIBA}) \cdot [K_{110} + K_{111} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)})] + \\ & + (T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}) \cdot [K_{120} + K_{122} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta A2 = & (T_{Y,ABAJ0} - T_{Y,ARRIBA}) \cdot [K_{210} + K_{211} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)})] + \\ & + (T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}) \cdot [K_{220} + K_{222} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] \end{aligned} \quad (14)$$

En este caso, de acuerdo con el primer ejemplo cada uno de los valores de compensación  $\Delta A1$  y  $\Delta A2$  está formado a partir de una suma en la que un primer sumando es directamente proporcional a la diferencia de temperatura del primer eje lineal A1, es decir, directamente proporcional a  $T_{Y,ABAJ0} - T_{Y,ARRIBA}$  y el segundo sumando es directamente proporcional a la diferencia de temperatura establecida en la pieza constructiva S2 del segundo eje lineal A2, es decir directamente proporcional a la diferencia de temperatura  $T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}$ .

Además, cada uno de los sumandos contiene una parte independiente de la posición, que está indicada en el valor de compensación  $\Delta A1$  por los factores de compensación  $K_{110}$  y  $K_{120}$  y una parte dependiente de la posición que está normalizada por los factores de compensación  $K_{111}$  y  $K_{122}$ . En el valor de compensación  $\Delta A2$  para el segundo eje lineal A2, los correspondientes factores de compensación para la parte independiente de la posición están indicados por  $K_{210}$  y  $K_{220}$  y las partes respectivamente dependientes de la posición están normalizadas por los factores de compensación  $K_{211}$  y  $K_{222}$ .

Además, cada parte dependiente de la posición contiene una relación de una posición de eje con respecto a una longitud de eje. En este caso, el sumando que es directamente proporcional a la diferencia de temperatura del primer eje lineal A1 contiene, por ejemplo, la dependencia de la posición de eje del primer eje lineal A1 y el sumando que es directamente proporcional a la segunda diferencia de temperatura del segundo eje lineal A2, por ejemplo, la dependencia con respecto a la posición de eje del segundo eje lineal A2. En este caso, tal como se puede ver mediante las ecuaciones (13) y (14) se elige a modo de ejemplo el parámetro adimensional de la relación de posición de eje con respecto a longitud de eje. Como se describe a modo de ejemplo en el segundo ejemplo de realización, en este caso, además para una mejora adicional de la compensación térmica de desplazamientos dependientes de la temperatura se puede usar el cuadrado de la relación de posición de eje con respecto a longitud de eje. Además se pueden usar las fórmulas (13) y (14) también ventajosamente para ejes no basados unos en otros de forma seriada.

#### Segundo ejemplo de realización

Una compensación mejorada adicionalmente de desplazamientos térmicos se obtiene en ejes basados unos en otros de forma seriada de acuerdo con este segundo ejemplo de realización. En el primer ejemplo de realización descrito anteriormente se calcularon los valores de compensación  $\Delta A1$  y  $\Delta A2$  para el primer eje lineal A1 y el segundo eje lineal A2, respectivamente, de tal manera que se formaron sumandos en los que los factores proporcionales a la diferencia de temperatura del primer eje lineal A1 presentaban una dependencia de posición con respecto a la posición de eje del primer eje lineal A1 y los términos que son directamente proporcionales a la segunda diferencia de temperatura del segundo eje lineal A2, presentaban una dependencia de la posición con respecto a la posición de eje del segundo eje lineal.

Sin embargo, se puede posibilitar una compensación mejorada adicionalmente de desplazamientos dependientes de la temperatura teniendo en cuenta en los términos que son directamente proporcionales a la diferencia de temperatura del primer eje lineal A1, es decir, directamente proporcionales a la diferencia de temperatura  $T_{Y,ABAJ0} - T_{Y,ARRIBA}$ , además, la posición de eje del segundo eje lineal A2 mediante otro factor de compensación  $K_{112}$  para el valor de compensación  $\Delta A1$ . También para el cálculo del valor de compensación  $\Delta A2$  se puede tener en cuenta en el término que es directamente proporcional a la diferencia de temperatura del primer eje lineal A1 tanto la posición de eje del primer eje lineal A1 con un factor de compensación  $K_{211}$  como la posición de eje del segundo eje lineal A2 mediante el factor de compensación  $K_{212}$ .

Esto está indicado en las siguientes fórmulas (15) y (16):

$$\begin{aligned} \Delta A1 = & (T_{Y,ABAJ0} - T_{Y,ARRIBA}) \cdot [K_{110} + K_{111} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + \\ & + K_{112} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] + \\ & + (T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}) \cdot [K_{120} + K_{122} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta A2 &= (T_{Y,BAJO} - T_{Y,ARRIBA}) \cdot [K_{_210} + K_{_211} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + \\ &\quad + K_{_212} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] + \\ &\quad + (T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}) \cdot [K_{_220} + K_{_222} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] \end{aligned} \quad (16)$$

5 Con ello se compensa un desplazamiento dependiente de la temperatura teniéndose en cuenta para términos proporcionales a una diferencia de temperatura de un eje determinado de múltiples ejes basados unos en otros de forma seriada no solamente la posición de eje de este eje determinado, sino también las posiciones de eje de los siguientes ejes basados en este eje determinado.

10 Esto mejora adicionalmente la compensación, ya que incluso en una situación en la que la diferencia de temperatura  $T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}$  es igual a cero –es decir, la pieza constructiva S2 del segundo eje lineal A2 no está deformada– mediante una colocación inclinada debido a una deformación de la pieza constructiva S2 se realiza a pesar de esto una traslación de la pieza de trabajo que puede depender de la posición de eje del segundo eje lineal A2.

15 Por ejemplo, en el estado no deformado de todas las piezas constructivas de los ejes lineales A1 y A2 mediante una traslación de la pieza constructiva S2 del segundo eje lineal A2 no se producirá ningún desplazamiento de la pieza de trabajo en dirección de la flecha "eje 1". Sin embargo, si se deforma solamente una pieza constructiva S1 del primer eje lineal A1, por lo que se puede producir una colocación inclinada del eje lineal A2, un cambio de posición de la pieza constructiva S2 a pesar de esto puede tener como consecuencia un desplazamiento de la pieza de trabajo en dirección de la flecha "eje 1", de tal manera que se puede conseguir una compensación del desplazamiento dependiente de la temperatura mejorada cuando en el término que depende de la diferencia de temperatura de la primera pieza constructiva S1 del primer eje lineal A1 se incluye también la dependencia de posición de la posición de eje del segundo eje A2.

#### 25 Tercer ejemplo de realización

30 Para mejorar adicionalmente la termo-compensación de los desplazamientos dependientes de la temperatura de la herramienta o de la pieza de trabajo, en este tercer ejemplo de realización se propone que para cada uno de los dos ejes lineales A1 y A2 basados uno en otro de forma seriada de la Figura 4 se calculen valores de compensación  $\Delta A1$  y  $\Delta A2$  que comprenden, respectivamente, dos sumandos, siendo cada uno de estos sumandos con respecto a una de las diferencias de temperatura directamente proporcionales e incluyéndose, en cada uno de estos sumandos, la posición de eje de cada uno de los dos ejes A1 y A2.

35 Para esto en total, tal como está descrito en las siguientes ecuaciones (17) y (18), se usan los factores de compensación  $K_{_110}$ ,  $K_{_120}$ ,  $K_{_210}$  y  $K_{_220}$  para las respectivas partes independientes de la posición y otros factores de compensación  $K_{_111}$ ,  $K_{_112}$ ,  $K_{_121}$ ,  $K_{_122}$ ,  $K_{_211}$ ,  $K_{_212}$ ,  $K_{_221}$  y  $K_{_222}$  para las partes dependientes de la posición. Estos factores de compensación se pueden determinar, por ejemplo, mediante simulación o experimentalmente y su magnitud depende del efecto del respectivo término. En particular, uno o varios de los términos pueden ser cero o aproximadamente cero cuando el término apenas contribuye o no contribuye en absoluto al desplazamiento térmico.

$$\begin{aligned} \Delta A1 &= (T_{Y,BAJO} - T_{Y,ARRIBA}) \cdot [K_{_110} + K_{_111} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + \\ &\quad + K_{_112} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] + \\ &\quad + (T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}) \cdot [K_{_120} + K_{_121} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + \\ &\quad + K_{_122} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta A2 &= (T_{Y,BAJO} - T_{Y,ARRIBA}) \cdot [K_{_210} + K_{_211} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + \\ &\quad + K_{_212} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] + \\ &\quad + (T_{Z,ATRÁS} - T_{Z,DELANTE}) \cdot [K_{_220} + K_{_221} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + \\ &\quad + K_{_222} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)})] \end{aligned} \quad (18)$$

#### 55 Cuarto ejemplo de realización

60 En un cuarto ejemplo de realización ahora se indican fórmulas para una estructura con N ejes A1 a AN basados unos en otros de forma seriada, llevándose a cabo el desplazamiento dependiente de la temperatura de forma similar al segundo ejemplo de realización, es decir, en cada sumando individual de un valor de compensación para uno de los ejes A1 a AN se incluyen, respectivamente, las posiciones de eje del eje perteneciente a la respectiva diferencia de temperatura y de todos los ejes basados en este eje.

Las fórmulas (19) a (23), en este sentido, describen el cálculo de un valor de compensación  $\Delta A1$  para el primer eje lineal A1, compuesto de una suma de sumandos  $\Delta A11$  a  $\Delta A1N$  para cada uno de los ejes lineales A1 a AN.

65

$$\Delta A11 = (T_{REFERENCIA,1} - T_{BASE,1}) \cdot [K_{110} + K_{111} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{112} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{11N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

5 (19)

$$\Delta A12 = (T_{REFERENCIA,2} - T_{BASE,2}) \cdot [K_{120} + K_{122} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{11N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

10 (20)

$$\Delta A1M = (T_{REFERENCIA,M} - T_{BASE,M}) \cdot [K_{1M0} + K_{1MM} \cdot (\text{posición de eje(AM)/longitud de eje(AM)}) + \dots + K_{1MN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

15 (21)

$$\Delta A1N = (T_{REFERENCIA,N} - T_{BASE,N}) \cdot [K_{1N0} + K_{1NN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

20 (22)

$$\Delta A1 = \Delta A11 + \Delta A12 + \dots + \Delta A1M + \dots + \Delta A1N$$

(23)

Las ecuaciones (24) a (28) describen el cálculo de un valor de compensación  $\Delta AN$  para un eje AN.

$$\Delta AN1 = (T_{REFERENCIA,1} - T_{BASE,1}) \cdot [K_{N10} + K_{N11} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{N12} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{N1N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

25 (24)

$$\Delta AN2 = (T_{REFERENCIA,2} - T_{BASE,2}) \cdot [K_{N20} + K_{N22} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{N1N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

30 (25)

$$\Delta ANM = (T_{REFERENCIA,M} - T_{BASE,M}) \cdot [K_{NM0} + K_{NMM} \cdot (\text{posición de eje(AM)/longitud de eje(AM)}) + \dots + K_{NMN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

35 (26)

$$\Delta ANN = (T_{REFERENCIA,N} - T_{BASE,N}) \cdot [K_{NN0} + K_{NNN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

40 (27)

$$\Delta AN = \Delta AN1 + \Delta AN2 + \dots + \Delta ANM + \dots + \Delta ANN$$

(28)

#### 45 Quinto ejemplo de realización

Las siguientes fórmulas indican ahora de forma análoga al tercer ejemplo de realización para dos ejes lineales A1 y A2 basados uno en otro de forma seriada las fórmulas para la situación general de N ejes lineales A1 a AN basados unos en otros de forma lineal.

50 En este caso, las fórmulas (29) a (33) describen el cálculo de un valor de compensación  $\Delta A1$  para el primer eje lineal A1. Las fórmulas (34) a (38) describen el cálculo de un valor de compensación  $\Delta AN$  para el N-ésimo eje lineal AN. En este quinto y en el anterior cuarto ejemplo de realización, el parámetro M describe un número natural M con  $M > 1$  y  $M < N$ .

$$\Delta A11 = (T_{REFERENCIA,1} - T_{BASE,1}) \cdot [K_{110} + K_{111} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{112} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{11N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

55 (29)

$$\Delta A12 = (T_{REFERENCIA,2} - T_{BASE,2}) \cdot [K_{120} + K_{121} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{122} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{12N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

60 (30)

65 (30)

$$\Delta A1M = (T_{\text{REFERENCIA},M} - T_{\text{BASE},M}) \cdot [K_{\_1M0} + K_{\_1M1} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{\_1M2} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_1MN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

5 (31)

$$\Delta A1N = (T_{\text{REFERENCIA},N} - T_{\text{BASE},N}) \cdot [K_{\_1N0} + K_{\_1N1} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{\_1N2} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_1NN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

10 (32)

$$\Delta A1 = \Delta A11 + \Delta A12 + \dots + \Delta A1M + \dots + \Delta A1N$$

(33)

$$\Delta AN1 = (T_{\text{REFERENCIA},1} - T_{\text{BASE},1}) \cdot [K_{\_N10} + K_{\_N11} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{\_N12} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_N1N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

15 (34)

$$\Delta AN2 = (T_{\text{REFERENCIA},2} - T_{\text{BASE},2}) \cdot [K_{\_N20} + K_{\_N21} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{\_N22} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_N2N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

20 (35)

$$\Delta A1M = (T_{\text{REFERENCIA},M} - T_{\text{BASE},M}) \cdot [K_{\_NM0} + K_{\_NM1} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{\_NM2} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_NMN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

25 (36)

$$\Delta A1N = (T_{\text{REFERENCIA},N} - T_{\text{BASE},N}) \cdot [K_{\_NN0} + K_{\_NN1} \cdot (\text{posición de eje(A1)/longitud de eje(A1)}) + K_{\_NN2} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_NNN} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})]$$

30 (37)

$$\Delta AN = \Delta AN1 + \Delta AN2 + \dots + \Delta ANM + \dots + \Delta ANN$$

(38)

40 Sexto ejemplo de realización

Mediante el sexto ejemplo de realización se describe un cálculo modificado de un valor de compensación para un caso, tal como está representado por ejemplo en la Figura 5, en el que un eje está configurado no por un eje lineal con voladizo en un lado, sino, por ejemplo, como el eje A1 en la Figura 5 como un carro cruzado K trasladable sobre una bancada de máquina MB.

45 En este caso, mediante la dependencia de la posición modificada del desplazamiento térmico de acuerdo con el sexto ejemplo de realización se propone incluir en el cálculo de uno o varios de los valores de compensación además un factor de corrección para la dependencia de la posición modificada durante el cálculo de los valores de compensación, por ejemplo, de acuerdo con el factor de corrección KFA1, tal como está indicado en la ecuación (41).

50 En este caso, al menos un sumando de valor de compensación que es directamente proporcional al eje lineal dispuesto sobre la bancada de máquina MB se multiplica con el factor de corrección KFA1.

55 Además, preferentemente también para la respectiva dependencia de la posición normalizada con el respectivo factor de compensación, en este caso a modo de ejemplo K<sub>\_111</sub> y K<sub>\_M11</sub> en lugar de la relación de posición de eje con respecto a longitud de eje se emplea el factor de corrección KFA para el respectivo eje lineal, en este caso, a modo de ejemplo KFA1 para el primer eje lineal A1.

$$\Delta A11 = (T_{\text{REFERENCIA},1} - T_{\text{BASE},1}) \cdot [K_{\_110} + K_{\_111} \cdot KFA1 + K_{\_112} \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K_{\_11N} \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})] \cdot KFA1$$

60 (40)

$$\Delta A1M = (T_{\text{REFERENCIA,M}} - T_{\text{BASE,M}}) \cdot [K\_M10 + K\_M11 \cdot KFA1 + K\_M12 \cdot (\text{posición de eje(A2)/longitud de eje(A2)}) + \dots + K\_M1N \cdot (\text{posición de eje(AN)/longitud de eje(AN)})] \quad (40)$$

$$KFA1 = (\text{posición de eje(A1)} - (\text{longitud de eje(A1)/2})) / (\text{longitud de eje(A1)/2}) \quad (41)$$

De este modo, la compensación de acuerdo con la invención de un desplazamiento dependiente de la temperatura se puede usar, ventajosamente, también para estructuras en las que se usa, por ejemplo, un carro cruzado trasladable sobre una bancada de máquina para un eje.

La Figura 6 muestra, esquemáticamente, un dispositivo 100 para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta según un ejemplo de realización de la presente invención. El dispositivo 100 para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con uno o varios ejes lineales comprende una interfaz 101 con uno o varios medios de registro de temperatura para el registro de temperaturas en posiciones de medición de temperatura determinadas de ejes lineales de la máquina herramienta y con un equipo de control de máquina de la máquina herramienta (por ejemplo, el CN de la máquina o el CLP de la máquina), un medio de establecimiento de diferencia de temperatura 102 para el establecimiento de una primera diferencia de temperatura entre una primera temperatura de referencia y la primera temperatura, un medio de determinación de valor de compensación 103 para la determinación de uno o varios valores de compensación dependiendo de las diferencias de temperatura establecidas por el medio de establecimiento de diferencia de temperatura 102 y un medio de compensación de cambio de ubicación 104 para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo de los valores de compensación. En este caso, el medio de compensación de cambio de ubicación 104, además, está equipado para determinar uno o varios de los valores de compensación además dependiendo de una o varias posiciones de eje de los ejes lineales. A través de la interfaz se puede leer también, por ejemplo, posiciones de eje. El dispositivo 100 está equipado, por ejemplo, para llevar a cabo una compensación de desplazamientos dependientes de la temperatura en una máquina herramienta según uno o varios de los ejemplos de realización descritos anteriormente.

En resumen, la presente invención describe una compensación correlativa de los desplazamientos de causa térmica en la herramienta o en la pieza de trabajo de máquinas herramienta, que se producen debido a las deformaciones de las piezas constructivas de bastidor de una máquina herramienta mediante un calentamiento irregular como consecuencia de una aportación de calor en un lado, por ejemplo, a través de guías y accionamientos o también otros efectos. En este caso, para la determinación de un valor de compensación se recurre preferentemente a la relación de posición de eje con respecto a longitud de eje, que se emplea para calcular una parte dependiente de la posición del valor de compensación. En este caso se determina esta parte dependiente de la posición, preferentemente, también para direcciones perpendiculares con respecto a la dirección del movimiento de un eje lineal. Para máquinas herramienta con cinemática seriada, en las que varios ejes están basados unos en otros de forma seriada, se recurre preferentemente a la relación de posición de eje con respecto a longitud de eje de todos los ejes para determinar partes del valor de compensación para todas las direcciones del espacio. A los valores de compensación para la compensación de las deformaciones de causa térmica debido a los calentamientos irregulares de las piezas constructivas del bastidor de la máquina se superponen, dado el caso, otras partes de compensación, por ejemplo, también para la compensación de desplazamientos por ejes rotatorios tal como, por ejemplo, por un husillo de motor.

El cálculo de los valores de compensación se realiza, preferentemente, con una sincronización lo más rápida posible, por ejemplo, en la unidad de control, es decir, el CN de máquina o el CLP de máquina de la máquina herramienta. Los valores de compensación calculados dependiendo de la posición, entonces, se superponen preferentemente por el CN de la máquina a los respectivos valores teóricos de eje de los ejes o los valores teóricos de eje se corrigen basándose en los valores de compensación calculados.

De este modo, la presente invención facilita un procedimiento en el que se puede compensar una compensación de desplazamientos térmicos en una máquina herramienta mejor que en el estado de la técnica ya que, adicionalmente a una o varias diferencias de temperatura en piezas constructivas de uno o varios ejes de la máquina herramienta, se incluyen adicionalmente una o varias posiciones de eje de los ejes de la máquina herramienta en el cálculo de valores de compensación y, de este modo, la compensación de la temperatura se realiza, ventajosamente, dependiendo de la posición.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con múltiples ejes lineales (A1, A2) basados unos en otros de forma seriada incluyendo al menos un primer eje lineal (A1) y un segundo eje lineal (A2), basándose el segundo eje lineal (A2) en el primer eje lineal (A1), que comprende:
- registro de al menos una primera temperatura (Tyabajo) en una primera posición de medición de temperatura del primer eje lineal (A1) y una segunda temperatura (Tyarriba) en una segunda posición de medición de temperatura del primer eje lineal (A1);
  - registro de al menos una tercera temperatura (Tzatrás) en una tercera posición de medición de temperatura del segundo eje lineal (A2) y una cuarta temperatura (Tzdelante) en una cuarta posición de medición de temperatura del segundo eje lineal (A2);
  - establecimiento de la primera diferencia de temperatura entre la primera temperatura (Tyabajo) y la segunda temperatura (Tyarriba);
  - establecimiento de una segunda diferencia de temperatura entre la tercera temperatura (Tzatrás) y la cuarta temperatura (Tzdelante);
  - determinación de un primer valor de compensación para el primer eje lineal (A1) dependiendo de la primera diferencia de temperatura y de la segunda diferencia de temperatura;
  - determinación de un segundo valor de compensación para el segundo eje lineal (A2) dependiendo de la primera diferencia de temperatura y de la segunda diferencia de temperatura;
  - compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura del primer eje lineal (A1) dependiendo del primer valor de compensación; y
  - compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura del segundo eje lineal (A2) dependiendo del segundo valor de compensación;
- determinándose el primer valor de compensación para el primer eje lineal (A1), además, dependiendo de un primer parámetro adimensional y un segundo parámetro adimensional;
- determinándose el segundo valor de compensación para el segundo eje lineal (A2), además, dependiendo del primer parámetro adimensional y del segundo parámetro adimensional;
- correspondiéndose el primer parámetro adimensional con la relación de posición de eje del primer eje lineal (A1) con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal (A1) o con el cuadrado de la relación de la posición de eje del primer eje lineal (A1) con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal (A1); y
- correspondiéndose el segundo parámetro adimensional con la relación de posición de eje del segundo eje lineal (A2) con respecto a la longitud de eje del segundo eje lineal (A2) o con el cuadrado de la relación de la posición de eje del segundo eje lineal (A2) con respecto a la longitud de eje del segundo eje lineal (A2).
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** el primer valor de compensación comprende una parte independiente de la posición y una parte dependiente de la posición que depende, al menos, de la posición de eje del primer eje lineal (A1).
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** durante la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer valor de compensación se compensa un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una dirección perpendicular a la dirección del primer eje lineal (A1).
4. Procedimiento de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado por que** durante la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura dependiendo del primer valor de compensación se compensa un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en dirección del segundo eje lineal (A2) de la máquina herramienta.
5. Procedimiento de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por que** para cada uno de los múltiples ejes lineales se establece al menos una temperatura en una posición de medición de temperatura del correspondiente eje lineal y se establece una respectiva diferencia de temperatura entre una respectiva temperatura de referencia y la respectiva temperatura establecida y para cada uno de los ejes lineales se determina un valor total de compensación que se corresponde con una suma de valores de compensación, cuya cantidad es igual a la cantidad de los ejes lineales basados unos en otros de forma seriada, siendo cada valor de compensación individual directamente proporcional a exactamente una de las diferencias de temperatura.
6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado por que** cada valor de compensación individual se forma dependiendo de una suma de términos dependientes de la posición, dependiendo cada término dependiente de la posición de la posición de eje de uno de los ejes lineales.
7. Procedimiento de acuerdo con al menos una de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado por que** el primer eje lineal (A1) es un carro trasladable sobre una bancada de máquina, incluyéndose en la etapa determinación del primer valor de compensación, además, un factor

$$(AP1 - AL1)/(AL1/2),$$

indicando AP1 la posición de eje del primer eje lineal (A1) y AL1, la longitud de eje del primer eje lineal (A1).

- 5 8. Dispositivo para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en una máquina herramienta con múltiples ejes lineales (A1, A2) basados unos en otros de forma seriada incluyendo al menos un primer eje lineal (A1) y un segundo eje lineal (A2), basándose el segundo eje lineal (A2) en el primer eje lineal (A1), de acuerdo con un procedimiento según al menos una de las reivindicaciones 1 a 7, con:
- 10 - múltiples medios de registro de temperatura para el registro al menos de la primera temperatura (Tyabajo) en la primera posición de medición de temperatura del primer eje lineal (A1) y de la segunda temperatura (Tyarriba) en la segunda posición de medición de temperatura del primer eje lineal (A1) y para el registro al menos de la tercera temperatura (Tzatrás) en la tercera posición de medición de temperatura del segundo eje lineal (A2) y de la cuarta temperatura (Tzdelante) en la cuarta posición de medición de temperatura del segundo eje lineal (A2);
- 15 - un medio de establecimiento de diferencia de temperatura (102) para el establecimiento de la primera diferencia de temperatura y de la segunda diferencia de temperatura;
- un medio de determinación de valor de compensación (103) para la determinación del primer valor de compensación y del segundo valor de compensación; y
- 20 - un medio de compensación de cambio de ubicación (104) para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura del primer eje lineal (A1) dependiendo del primer valor de compensación y para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura del segundo eje lineal (A2) dependiendo del segundo valor de compensación;
- 25 determinándose el segundo valor de compensación para el segundo eje lineal (A2), además, dependiendo del primer parámetro adimensional y del segundo parámetro adimensional;
- correspondiéndose el primer parámetro adimensional con la relación de la posición de eje del primer eje lineal (A1) con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal (A1) o con el cuadrado de la relación de la posición de eje del primer eje lineal (A1) con respecto a la longitud de eje del primer eje lineal (A1); y
- 30 correspondiéndose el segundo parámetro adimensional con la relación de posición de eje del segundo eje lineal (A2) con respecto a la longitud de eje del segundo eje lineal (A2) o con el cuadrado de la relación de la posición de eje del segundo eje lineal (A2) con respecto a la longitud de eje del segundo eje lineal (A2).
- 35 9. Sistema con una máquina herramienta con múltiples ejes lineales (A1, A2) basados unos en otros de forma seriada incluyendo al menos un primer eje lineal (A1) y un segundo eje lineal (A2), basándose el segundo eje lineal (A2) en el primer eje lineal (A1), y un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 8 para la compensación de un cambio de ubicación dependiente de la temperatura en la máquina herramienta de acuerdo con un procedimiento según al menos una de las reivindicaciones 1 a 7.

FIG. 1

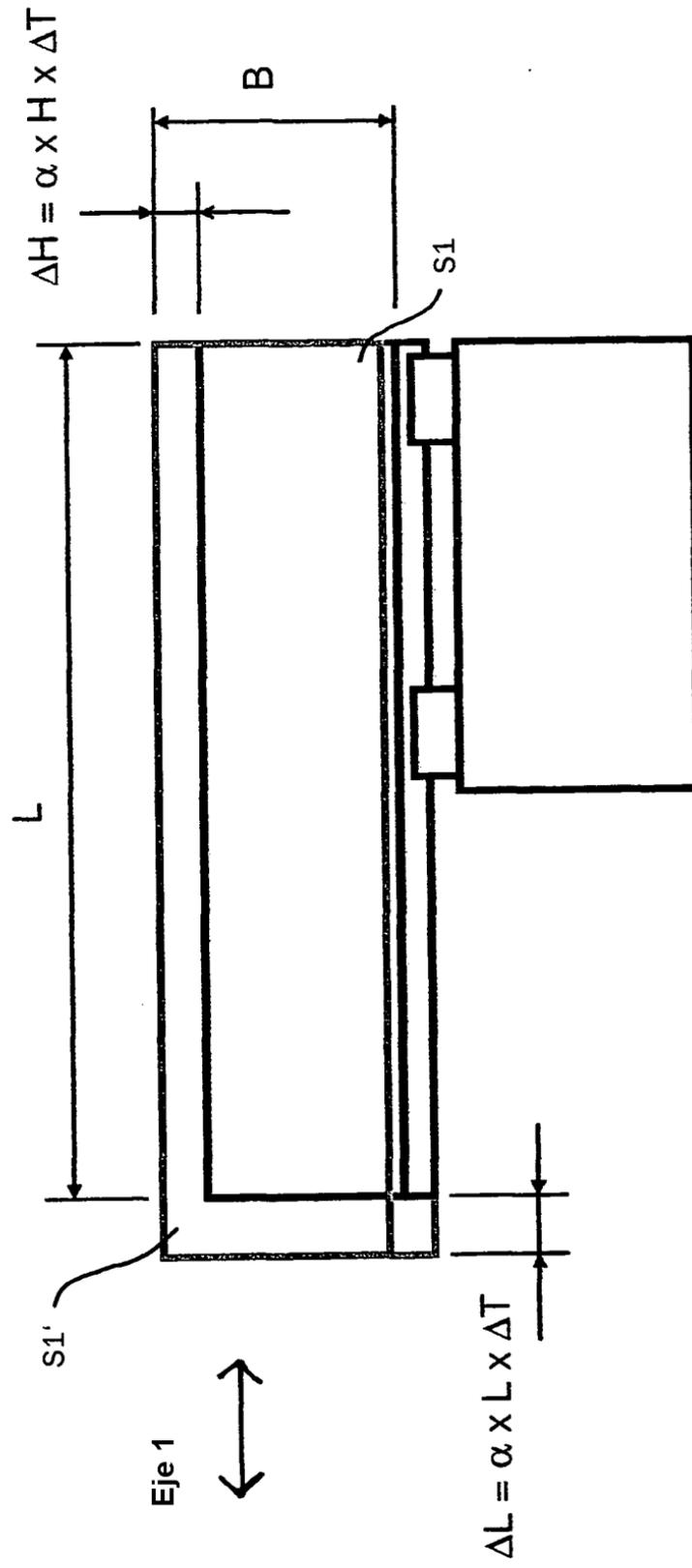


FIG. 2

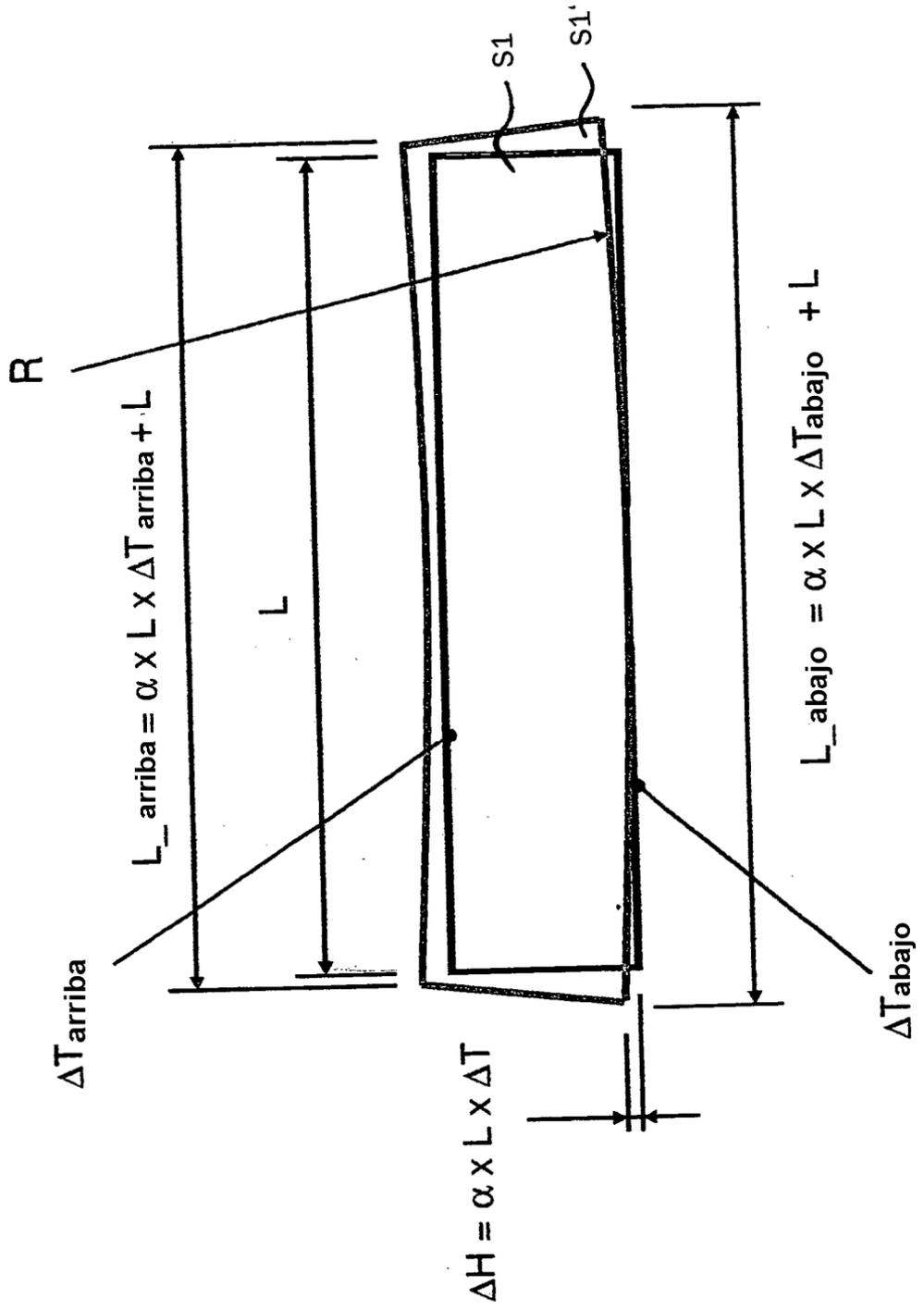


FIG. 3

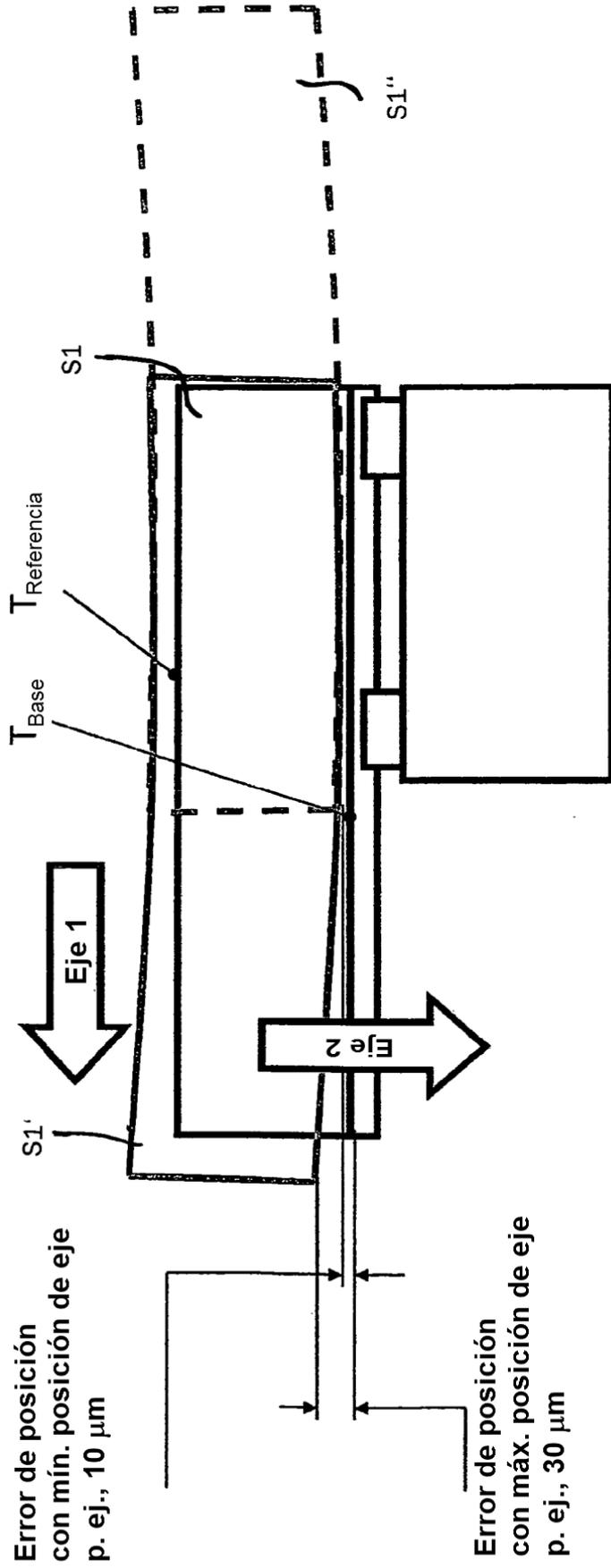


FIG. 4B

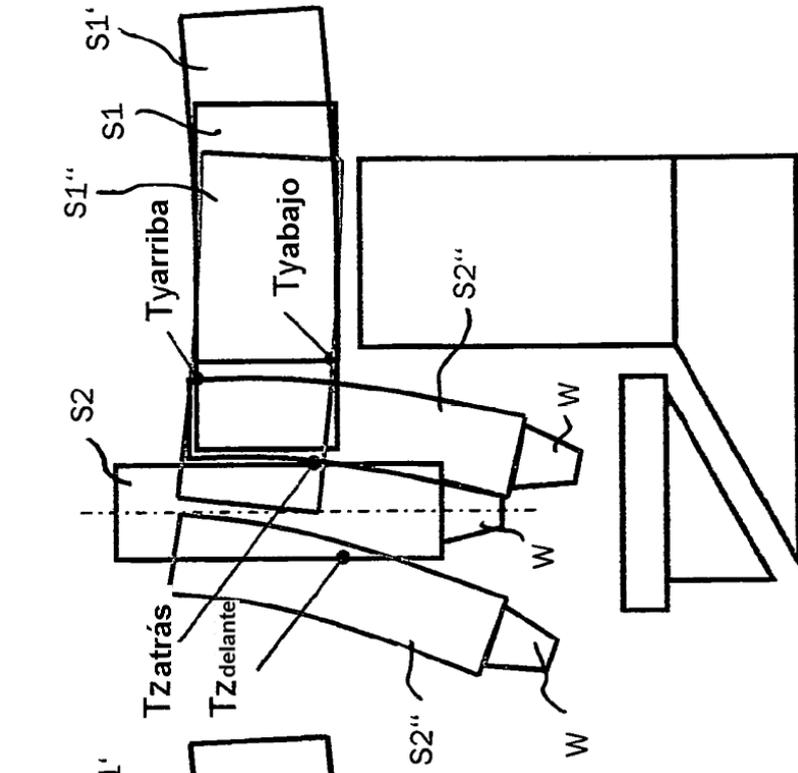


FIG. 4A

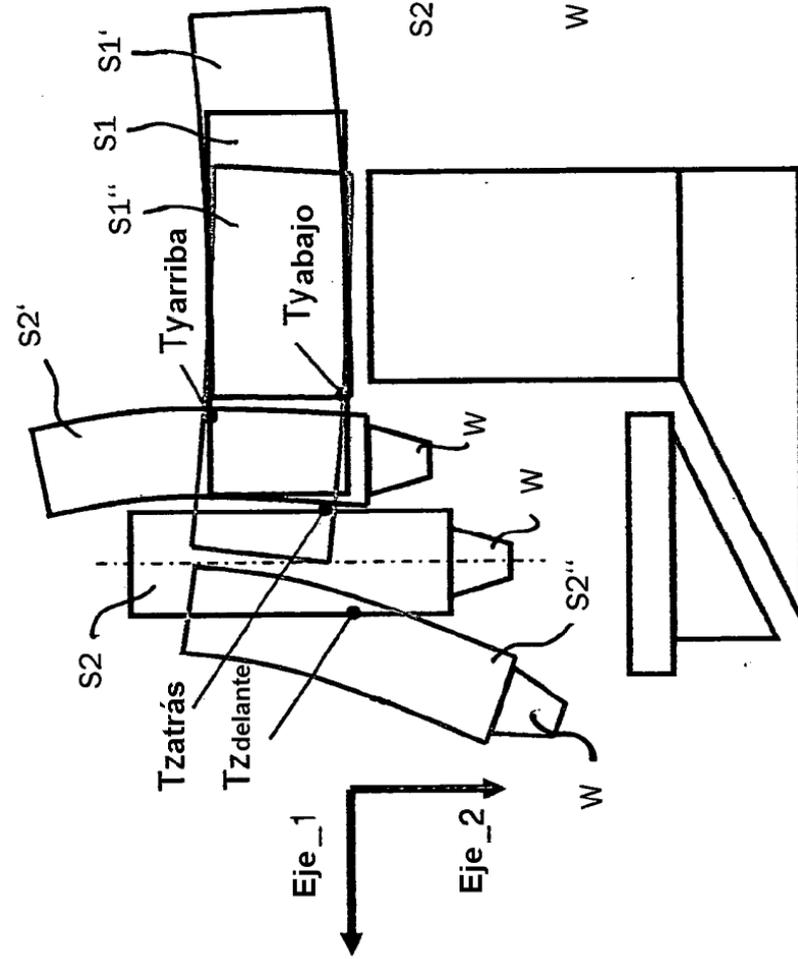


FIG. 5

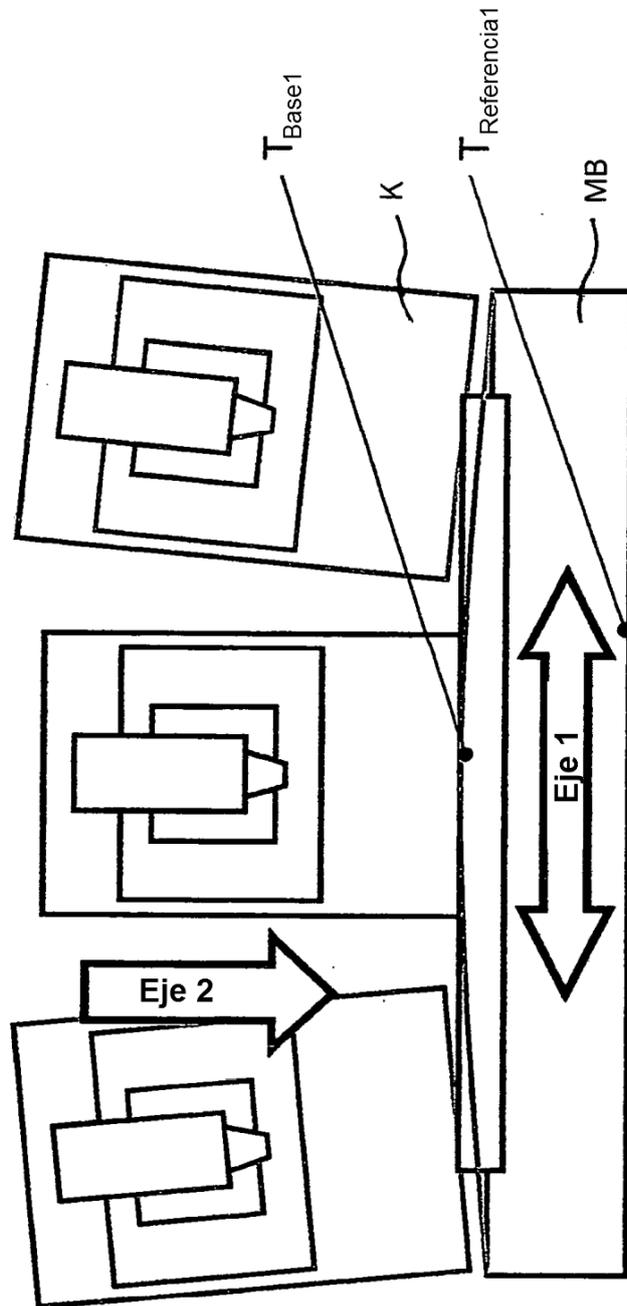


FIG. 6

