(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 4 398 047 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
10.07.2024 Patentblatt 2024/28

(21) Anmeldenummer: **23213905.5**

(22) Anmeldetag: **04.12.2023**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
G04B 17/06 *(2006.01)* ***G04D 7/00*** *(2006.01)*
G04D 7/10 *(2006.01)* ***G04D 7/12*** *(2006.01)*

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
G04B 17/06; G04D 7/004; G04D 7/10; G04D 7/1214; G04D 7/1221; G04D 7/1242; G04D 7/125

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(30) Priorität: **03.01.2023 EP 23150151**
15.06.2023 DE 102023115667

(71) Anmelder: **Damasko Präzisionstechnik GmbH & Co. KG**
93053 Regensburg (DE)

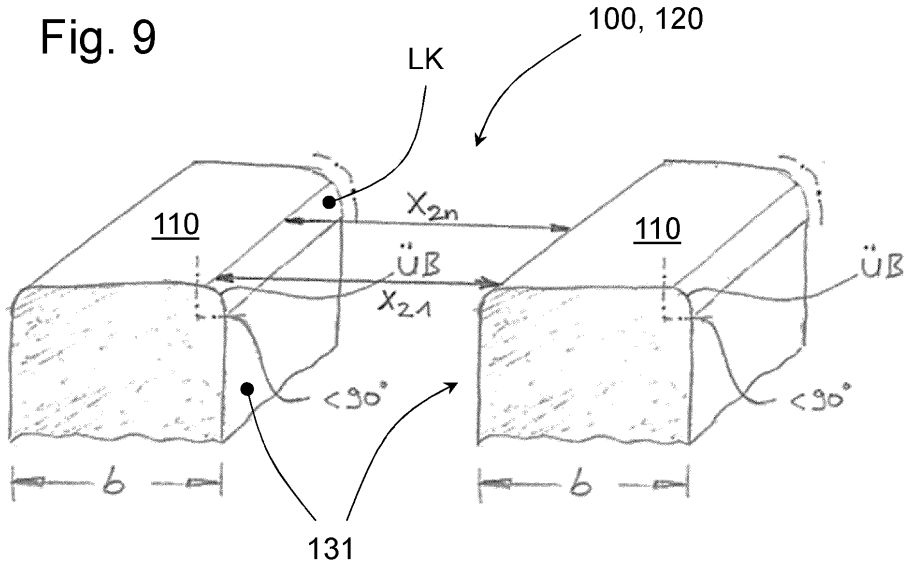
(72) Erfinder: **Heinz, Uwe**
85077 Manching (DE)

(74) Vertreter: **Götz, Gudrun Veronika**
Intellectual Property IP-Götz
Patent- und Rechtsanwälte
Königstraße 70
90402 Nürnberg (DE)

(54) **OPTISCHES MESSVERFAHREN FÜR ARCHIMEDISCHE FLACHSPIRALEN UND SPIRALFEDER MIT DAFÜR OPTIMIERTER GEOMETRIE**

(57) Die Erfindung betrifft eine Spiralfeder (100), geeignet zur Verwendung in einem optischen Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit mehreren Windungen (110), die sich entlang jeweiliger Kreisbahnen einen spiralförmigen Verlauf bildend erstrecken, welche Spiralfeder (100), insbesondere zur Taktgebung eines mechanischen Uhrwerks, zu einer Schwingungsbewegung anregbar ist, wobei benachbarte Windungen (110) entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen um eine Winkelverschiebung (β) zueinander ausgelenkt werden. Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, das Schwingungsverhalten von Spiralfedern anhand charakteristischer Geometrien zu bestimmen, und insbesondere ein nicht invasives, berührungsloses Messverfahren bereitzustellen, welches in automatisierten Montagestraßen in der Linienmontage bei der Uhrwerksfertigung einsetzbar ist. Gelöst wird die Aufgabe dadurch, dass der Abstand (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) zumindest entlang einer der Winkelverschiebung (β) entsprechenden Messstrecke variiert.

Fig. 9



EP 4 398 047 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein optisches Messverfahren zur Bestimmung der Schwingungsweite einer Spiralfeder mit mehreren Windungen sowie eine Spiralfeder für ein mechanisches Uhrwerk, mit für das Messverfahren und das Schwingungsverhalten optimierter Geometrie.

[0002] Spiralfedern mechanischer Uhrwerke sind archimedische Flachfedern. Die Windungen der sogenannten Spiralklinge verlaufen entlang jeweiliger Kreisbahnen in einer gemeinsamen Ebene von einem inneren Windungsende zu einem äußeren Windungsende spiralförmig. Die Anzahl der Windungen liegt typischerweise zwischen zehn und vierzehn, es sind aber auch Spiralfedern für mechanische Uhrwerke mit mehr oder weniger Windungen bekannt. Der Abstand zwischen benachbarten Windungen bei Spiralfedern für mechanische Uhrwerke ist entlang des Spiralverlaufs konstant und liegt üblicherweise in einem Bereich zwischen 80,0 μm und 200,0 μm. Im mechanischen Uhrwerk bildet die Spiralfeder zusammen mit der Masse eines Schwingkörpers das schwingungsfähige und taktgebende Schwingsystem, auch als Unruh bezeichnet. Der exakte Gang der Uhr basiert dabei auf dem möglichst gleichmäßigen Hin- und Herschwingen der Spiralfeder um ihre spannungsfreie Mittellage. Während der Schwingungsbewegung der Spiralfeder bewegen sich die einzelnen Windungen entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen. Hierbei zieht sich die Spiralfeder zusammen und wieder auseinander, man spricht vom "Atmen" der Spiralfeder. Die sogenannte Schwingungsweite oder Amplitude entspricht einer vollen Schwingung, also einer zweifachen Auslenkung der Spiralfeder aus der Mittellage in eine erste und eine zweite, entgegengesetzte Richtung und wird daher in Winkelgrad angegeben. Bei Spiralfedern für mechanische Uhrwerke liegt die Schwingungsweite standardmäßig bei etwa 200° - 300°.

[0003] Die Schwingungsdauer oder -frequenz hängt wesentlich vom Trägheitsmoment der Unruh ab und liegt üblicherweise im Bereich von 1 bis 5 Schwingungen pro Sekunde. Schwingungsweite und -frequenz sind maßgeblich für die Ganggenauigkeit des Uhrwerks und dürfen folglich keinen oder nur sehr geringen Abweichungen von den jeweils vorgesehenen Sollwerten unterliegen. Spiralfedern mit möglichst konstantem und unverändertem Schwingungsverhalten leisten daher einen wesentlichen Beitrag zur Qualität eines mechanischen Uhrwerks.

[0004] Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Werkstoffe und verschiedene Verfahren zur Herstellung von Spiralfedern bekannt. Die gängigsten Werkstoffe für Spiralfedern umfassen Glas, Keramik, Kohlenstoffe, Metalle und Metalllegierungen, aber auch Bornitrid, Siliziumkarbid oder Diamant. Bekannte Herstellungsverfahren sind Wickeln, Laserbearbeitung, Gießen und Ähnliches. In der jüngeren Vergangenheit hat sich außerdem die Herstellung von Spiralfedern aus mono- oder polykristallinem Silizium mittels des reaktiven Ionenätzens etabliert. Das bekannteste Ätzverfahren für Siliziumbauteile ist das sogenannte DRIE-Verfahren (Deep Reactive Iron Etch). Derartige Ätzverfahren sind hinreichend im Stand der Technik beschrieben. Derzeit sind Strukturen bis 2,5 nm durch Fotomasken abbildbar. Durch Einstellung der Ätzgeschwindigkeit und die Wahl der Technologie für das Seitenwandätzen kann die Geometrie der Spiralklinge eingestellt werden. Hierbei ist es grundsätzlich möglich, Oberflächen mit einer Rautiefe kleiner als 10 nm zu ätzen. Optional kann nach dem Ätzprozess noch eine Beschichtung erfolgen, welche ebenfalls zur Beeinflussung der Geometrie der Spiralklinge nutzbar ist.

[0005] Beim reaktiven Ionenätzen von Silizium können daher besonders hochwertige Bauteile mit exakter Geometrie erhalten werden. So ist beispielsweise aus der EP 3 452 874 B1 eine Spiralfeder aus Silizium für ein mechanisches Uhrwerk bekannt, die durch reaktives Ionenätzen hergestellt worden ist. Die Patentschrift beschäftigt sich mit der Problematik, dass aufgrund der hervorragenden Oberflächenbeschaffenheit der glatten Seitenflächen der Spiralklinge, deren Windungen bei Stößen, die das Uhrwerk erleidet, oder bei schlechter Handhabung während der Montage, aneinanderhaften können. Um ein derartiges Aneinanderhaften zu vermeiden, wird eine Spiralfeder vorgeschlagen, deren Spiralklinge im Querschnitt eine Abweichung von der üblicherweise rechteckigen Form aufweisen soll. Konkret sollen die jeweiligen Flanken oder Seitenflächen zwar geradlinig und mit geringer Oberflächenrauheit ausgebildet, jedoch um einen Flankenwinkel α von mindestens 2,5° gegenüber der Vertikalen geneigt sein. Im Radialschnitt der Spiralklinge ergibt sich so eine Trapezform, wobei die obere und untere Fläche der Spiralklinge zueinander parallel sind.

[0006] Aus der WO 2014/203085 A1 ist ebenfalls eine Spiralfeder für mechanische Uhrwerke bekannt. Der aktive Schwingungsbereich dieser Spiralfeder erstreckt sich zwischen dem inneren Windungsende, welches an einen Spiralfederbefestigungsabschnitt angrenzt und dem äußeren Windungsende, welches einen Federhaltepunkt aufweist und von einem Halteelement gehalten wird. Um das Schwingungsverhalten zu verbessern, soll die Spiralfeder geometrisch derart ausgebildet werden, dass die Masse reduziert und so das Trägheitsmoment der Unruh positiv beeinflusst wird. Hierzu soll der aktive Schwingungsbereich mehrere Teilbereiche aufweisen, wobei sich Höhe und/oder Breite der hier rechteckigen Spiralklinge eines Teilbereichs gegenüber der Höhe und/oder Breite eines anderen Teilbereichs unterscheiden. Innerhalb des jeweiligen Teilbereichs ist die Höhe bzw. die Breite der Spiralklinge stets konstant. Die unterschiedlichen Teilbereiche können direkt bei der Herstellung der Spiralfeder erzeugt werden. Die WO 2014/203085 A1 schlägt hierzu vor, die Spiralfeder mittels eines Ätzverfahrens aus einer Platte heraus zu ätzen. Auf die Oberfläche der Platte soll eine Fotomaske

aufgebracht werden, auf welcher die Strukturen bzw. Abmessungen der zu ätzenden Bauteile lithographisch abgebildet werden.

[0007] Nicht nur die Masse, sondern auch die Geometrie oder Ausgestaltung, insbesondere die Ausgestaltung der Seitenflächen der Spiralklinge nimmt Einfluss auf das Trägheitsmoment und folglich auf das Schwingungsverhalten der Spiralfeder. In der Regel folgt die Form der Spiralfeder daher einem ausgehend vom inneren Windungsende hin zum äußeren Windungsende gleichmäßig und stetig abnehmendem Krümmungsverlauf.

[0008] Aus den Patentschriften EP 2 407 831 B1 und EP 2 887 152 B1 sind Spiralfedern aus Silizium bekannt, deren Form mittels Ätzverfahren und Fotomasken direkt bei der Herstellung festgelegt wird und von der üblichen, gleichmäßig verlaufenden Form abweicht. Gemäß der EP 2 407 831 B1 soll auch die Masse der Spiralklinge reduziert werden, um das Trägheitsmoment zu verbessern. Die Spiralklinge weist dazu eine Vielzahl an Öffnungen auf, die sich dem Windungsverlauf folgend mit dazwischen angeordneten Stegen abwechseln und die Spiralklinge entlang ihrer Höhe durchsetzen. Nach einer spezielleren Ausführungsform ist die Spiralklinge polygonal oder einem geschlängelten Verlauf folgend geformt. Hierdurch soll die Steifigkeit der Spiralklinge verbessert werden, um einerseits Brüche aber auch nichtlineares Schwingungsverhalten, verursacht durch Knicken der Spiralklinge zu vermeiden.

[0009] In der EP 2 887 152 B1 wird ebenfalls eine Spiralklinge mit polygonaler Form vorgeschlagen. Hintergrund ist hier wiederum, dass die einander zugewandten Seitenflächen der Spiralklinge während der Schwingungsbewegung nicht aneinanderhaften sollen. So soll zumindest ein Teil der Spiralklinge als eine Reihe von aneinandergrenzenden, prismatischen oder rechtwinkligen Abschnitten ausgebildet werden, um so die gewünschte polygonale Form zu erhalten.

[0010] Nachteilig ist an der vom stetigen Krümmungsverlauf abweichenden Form, dass das daraus resultierende Schwingungsverhalten nicht zuverlässig vorherzusehen ist, und derartige Spiralklingenformen folglich schwer zu optimieren sind. Bereits minimalste Formabweichungen können erheblichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten nehmen.

[0011] Formabweichungen bzw. die Beschaffenheit von technischen Oberflächen sind unter dem Begriff "Gestaltabweichungen" zusammengefasst und nach DIN 4760:1982-06 in ein System 1. bis 6. Ordnung unterteilt. Für das Schwingungsverhalten einer Spiralfeder ist vor allem die Form relevant. Das bedeutet, ob die Spiralklinge, insbesondere deren Seitenflächen, dem üblichen, stetig abnehmenden Krümmungsverlauf folgen, oder, wie zuvor beschrieben, eine andere, bspw. polygonale Form aufweisen. Abweichungen von der vorgesehenen Form sind oftmals mit bloßem Auge erkennbar und werden als Abweichungen 1. Ordnung oder auch als "Formabweichungen" klassifiziert. Die (lediglich) messtechnisch erfassbare Oberflächenbeschaffenheit wird als Welligkeit, bzw. Abweichungen 2. Ordnung und Rauheit, Abweichungen 3. und 4. Ordnung, bezeichnet. Abweichungen in der Gefügestruktur und im Gitteraufbau werden schließlich der 5. bzw. 6. Ordnung zugerechnet.

[0012] Die Welligkeit und die Rauheit einer technischen Oberfläche werden in einem Welligkeits- bzw. Rauheitsprofil wiedergegeben, welches Abweichungen von der Sollfläche anhand der messtechnisch erfassten Wellentiefe Wt bzw. Rautiefe R_z darstellt. Die Rauheit einer Oberfläche folgt dabei stets dem Verlauf des Welligkeitsprofils, die entsprechende Überlagerung von Rauheits- und Welligkeitsprofil wird im sogenannten Primärprofil dargestellt. Rauheit und Welligkeit sind dabei nicht durch festgelegte Größenordnungen definiert. Beispielsweise kann die Rautiefe einer technischen Oberfläche größer sein als deren Wellentiefe. Als definierendes Unterscheidungskriterium werden stattdessen die Intervalle, innerhalb derer Schwankungen der Wellentiefe bzw. der Rautiefe zwischen positiven und negativen Werten auftreten, d. h. die Nulllinie des Welligkeits- oder Rauheitsprofils bzw. der Oberflächensollwert durchlaufen wird, herangezogen. So treten Gestaltabweichungen 3. oder 4. Ordnung, also Rauheit stets in vielfach kürzeren Intervallen auf als Gestaltabweichungen 2. Ordnung, also die Welligkeit. Wie bereits erläutert, kann dies der im Primärprofil dargestellten Überlagerung anschaulich entnommen werden. Aufgrund der kurzen Intervalle, innerhalb derer die Änderungen der Rautiefe auftreten, hat die Rauheit einen hohen Einfluss auf die Belastbarkeit der Spiralfeder.

[0013] So schlägt die internationale Offenlegungsschrift WO 2015/087252 A1 eine Spiralfeder vor, deren Spiralklinge oder "Kern" aus Silizium geätzt und durch Oxidation mit einer Schicht aus Siliziumoxid oder Siliziumdioxid versehen ist. Die Oxidschicht dient der Temperaturkompensation bzw. der Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) um ein von der Temperatur unabhängiges, gleichmäßiges Schwingungsverhalten zu ermöglichen. Darüber hinaus beschreibt die Offenlegungsschrift aber auch, dass die Oberflächen, sowohl des Kerns, die sogenannte "Ausgangsoberfläche", als auch der Beschichtung, die sogenannte "fertige Außenfläche" eine möglichst geringe Rauheit aufweisen sollten, um Spannungen in der Spiralfeder und dadurch etwaige Brüche zu vermeiden. Als bevorzugte Rautiefe R_z sind für die Ausgangsoberfläche Werte zwischen 0,01 μm und 2,0 μm angegeben und für die fertige Außenfläche Werte zwischen 0,001 μm und 2,0 μm.

[0014] Aus der Schweizer Patentschrift CH 713 269 B1 ist eine Spiralfeder bekannt deren Spiralklinge Seitenflächen mit sowohl einem Welligkeitsprofil, hier als "Makro-Relief" bezeichnet, als auch einem dem Verlauf des Welligkeitsprofils folgenden Rauheitsprofil, hier als "Mikro-Relief" bezeichnet, aufweist. Auch die hier offenbarte Spiralklinge umfasst einen Kern aus Silizium (Si) und eine Siliziumdioxid (SiO_2)-Beschichtung zur Temperaturkompensation. Durch die Ausbildung des Makro- und des Mikro-Reliefs an den Seitenflächen der Spi-

ralklinge soll das Verhältnis von Silizium zur Beschichtung, also Si/SiO_2, an ausgewählten Windungslängeneinheiten vergrößert werden, wodurch die Temperaturkompensation lokal angepasst werden soll. Für das Makro-Relief wird eine Wellentiefe angegeben, die größer dem 0,1-fachen der Breite der Spiralklinge sein soll, die Rautiefe des Mikro-Reliefs soll dagegen kleiner dem 0,01-fachen der Breite der Spiralklinge sein. Eine Wellentiefe, die einem 10tel oder mehr der Breite der Spiralklinge entspricht, ist relativ hoch und kann bereits Auswirkungen auf das Schwingungsverhalten der Spiralfeder und so auf die Qualität und Ganggenauigkeit des Uhrwerks haben.

[0015] Im Anschluss an die Herstellung von Spiralfedern wird im Rahmen einer Qualitätskontrolle deren Schwingungsverhalten bei der Montage und Regelage überprüft. Hierzu wird üblicherweise eine Körperschall-Messung mittels eines Körperschall-Mikrofons durchgeführt und grafisch dargestellt. Dieser Messvorgang erfolgt nicht automatisiert und ist daher vergleichsweise zeitaufwendig.

[0016] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, das Schwingungsverhalten von Spiralfedern, insbesondere mit archimedischem und/oder logarithmischem Verlauf, anhand charakteristischer Geometrien zu bestimmen, und insbesondere ein nicht invasives, berührungsloses Messverfahren bereitzustellen, welches in automatisierten Montagestraßen in der Linienmontage bei der Uhrwerksfertigung einsetzbar ist, und so die Fertigung von Spiralfedern mit optimiertem Schwingungsverhalten ermöglicht und sicherstellt.

[0017] Die Aufgabe wird gelöst durch ein optisches Messverfahren gemäß Anspruch 1, und durch eine Spiralfeder mit für das Messverfahren und das Schwingungsverhalten optimierter Geometrie, insbesondere Ausgestaltung der Seitenflächen der Spiralklinge gemäß Anspruch 6.

[0018] Bei einem erfindungsgemäßen optischen Messverfahren wird dynamisch, d. h. während der Schwingungsbewegung der Spiralfeder, in mindestens einem Windungsabschnitt eine Auslenkung benachbarter Windungen zueinander und entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen, anhand einer Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen entlang des Windungsabschnitts optisch erfasst. Anders als im Stand der Technik, soll für das erfindungsgemäße optische Messverfahren der Abstand zwischen benachbarten Windungen entlang eines Windungsabschnitts bzw. entlang des Spiralverlaufs also nicht konstant sein, sondern variieren. Für die optische Erfassung wird dabei mindestens ein Windungsabschnitt festgelegt, innerhalb dessen die Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen zumindest entlang einer der Winkelverschiebung entsprechenden Messstrecke mindestens 0,02 % beträgt.

[0019] Vorzugsweise schließt sich das Messverfahren unmittelbar an die Montage des Uhrwerks an, sodass die Spiralfeder noch in der Montagelinie, im montierten Zustand vermessen wird. Das heißt, das äußere und das innere Windungsende sind bereits mit den entsprechenden Halteelementen des Schwingsystems montiert und folglich fixiert. Für das optische Messverfahren wird der aktive Schwingungsbereich der Spiralfeder in Schwingung versetzt, wodurch sich die einzelnen Windungen entlang ihrer Kreisbahnen um den Mittelpunkt der Spiralfeder bzw. die Drehachse des Schwingkörpers hin und her bewegen. Einander benachbarte Windungen unterliegen hierbei einer relativen Bewegung, die in einer Auslenkung der Windungen zueinander resultiert.

[0020] Erfindungsgemäß wird diese Auslenkung zweier benachbarter Windungen zueinander mit optischen Messmitteln, bspw. zur Aufzeichnung der Bewegung oder mittels Lasermessung bzw. Laserscanning berührungslos erfasst. Als Bezug oder Referenz für das optische Messmittel fungiert der Abstand zwischen den Windungen. Hierzu darf der Abstand in Längsrichtung der Windungen, also dem Spiralverlauf folgend, aber nicht konstant sein, da die relative Bewegung sonst optisch nicht erkennbar wäre. Eine "Visualisierung" der relativen Bewegung oder Auslenkung benachbarter Windungen zueinander erfolgt nämlich, indem deren Abstand entlang des Windungsabschnitts, durch die Bauteilgeometrie der Spiralfeder bedingt, variiert. Durch den bauteilgeometriebedingt variierenden Abstand ergibt sich eine optimierte Abtastmöglichkeit zur Konturerkennung für die optischen Messmittel, um den Grad der Auslenkung benachbarter Windungen zueinander zu jedem Zeitpunkt der Schwingungsbewegung fehlerfrei erfassen zu können.

[0021] Anhand der optisch erfassten, maximalen Auslenkung, wenn also die Schwingungsbewegung ihren Umkehrpunkt erreicht, d. h. die benachbarten Windungen eine umgekehrte, relative Bewegung ausführen, wird dann die daraus resultierende Winkelverschiebung der benachbarten Windungen zueinander in Winkelgrad bestimmt. Typische Werte für die Winkelverschiebung von Spiralfedern für mechanische Uhrwerke liegen in einem Bereich zwischen 5° und 30°.

[0022] Auf Basis der Winkelverschiebung wird schließlich die Schwingungsweite und/oder die Schwingungsfrequenz der Spiralfeder rechnerisch ermittelt. Bei einer Schwingungsbewegung der Spiralfeder wird der radiale Winkelweg bzw. die Winkelverschiebung der einzelnen Windungen der Spiralfeder von außen nach innen, z. B. beim Zusammenziehen, immer kleiner, diese Abweichung lässt sich dynamisch messen. Auch die Abstände zwischen den Windungen verändern sich beim Atmen, also dem periodischen Zusammen- bzw. Auseinanderziehen der Spiralfeder. Anders als die erfindungsgemäße Varianz des Abstands ist diese Änderung aber nicht durch die Bauteilgeometrie, insbesondere die Geometrie der Windungsabschnitte, sondern durch die Schwingungsbewegung selbst bedingt und in der Ruhelage nicht erkennbar. Dieses Atmen der Spiralfeder ist bekannt bzw. kann gemessen werden und sollte zur Berechnung von Schwingungsweite und/oder die Schwin-

gungsfrequenz berücksichtigt werden. Für den mittleren Abstand, welcher erfindungsgemäß durch die Bauteilgeometrie, insbesondere die Ausgestaltung der Seitenflächen der Spiralklinge bedingt variieren soll, ist daher vorzugsweise nicht der Abstand der Windungen in der Ruhelage der Spiralfeder zugrunde zu legen, sondern der sich während der Schwingungsbewegung dynamisch verändernde Windungsabstand der Spiralfeder.

[0023] Der Sollwert der Winkelverschiebung legt ferner die Länge der Messstrecke fest, welche mindestens der Winkelverschiebung entspricht. Bei einer Winkelverschiebung in einem Bereich zwischen 5° und 30°, resultiert eine Messstrecke von mindestens 100,0 μm bis 900,0 μm Länge.

[0024] Die Auswertung der optischen Messsignale und die rechnerische Ermittlung der Schwingungsweite sind vorzugsweise automatisiert und in die Montagestraße einer Linienmontage bei der Uhrwerksfertigung integriert. Die von den optischen Messmitteln erfassten Signale werden hierzu an ein Steuerungsmodul übermittelt. Anhand einer auf einem elektronischen Datenträger des Steuerungsmoduls hinterlegten Programmierung wird aus den erhaltenen optischen Messsignalen die Winkelverschiebung bestimmt und die Schwingungsweite rechnerisch ermittelt. Für die Berechnung können in der Programmierung weitere Werte, wie bspw. die Anzahl der Windungen der Spiralfeder, deren Abweichung vom archimedischen Verlauf und/oder logarithmischen Verlauf, die radiale Position des überwachten Windungsabschnitts, Trägheitsmoment, Atmen der Spiralfeder usw. berücksichtigt werden und hierzu auf dem Datenträger hinterlegt sein. Ferner kann das Steuerungsmodul selbstverständlich auch auf sonstige für die Fertigung der Spiralfeder hinterlegte Sollwerte, bspw. die Höhe und Breite der Spiralklinge, aber auch die zu erreichende Winkelverschiebung, anhand derer die Länge der Messstrecke bestimmt wird, zugreifen.

[0025] Dabei ist es vorteilhaft, nicht den gesamten Verlauf der Spiralfeder, sondern einen vorab festgelegten Windungsabschnitt optisch zu überwachen. Hierdurch lässt sich der apparative Aufwand des Messverfahrens verringern, wodurch die optischen Messmittel weniger Platz benötigen und folglich einfacher im Bereich der im Uhrwerk vormontierten Spiralfeder positioniert werden können. Besonders vorteilhaft wird der zur optischen Erfassung des variierenden Abstands genutzte Windungsabschnitt bereits für die Herstellung der Spiralfeder festgelegt und mit der gewünschten Varianz des Abstands ausgestaltet.

[0026] Grundsätzlich gilt, je höher die Varianz, umso genauer bzw. einfacher und mit entsprechend geringerem Aufwand kann die Auslenkung der benachbarten Windungen zueinander mit optischen Messmitteln erfasst werden. Die Varianz darf aber auch nicht zu hoch sein, um auszuschließen, dass sich benachbarte Windungen bei der Schwingungsbewegung berühren könnten oder die Abweichungen bereits Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Spiralfeder nehmen. Bei einem beispielhaften Abstand zweier benachbarter Windungen von 100,0 μm und einer Mindestvarianz von 0,02% würde der Abstand also um mindestens +/- 0,02 μm um den Mittelwert von 100,0 μm herum variieren, d. h. der maximale und der minimale Abstand zwischen den Windungen bewegt sich in einem Bereich von 100,02 μm (100,0 μm + 0,02 μm) bis 99,98 μm (100,0 μm - 0,02 μm) und weicht entlang der Messstrecke um mindestens 0,04 μm voneinander ab

[0027] Bei einem beispielhaften Abstand zweier benachbarter Windungen von 100,0 μm und einer Mindestvarianz von 0,04 % würde der Abstand dann um mindestens +/- 0,04 μm um den Mittelwert von 100,0 μm herum variieren, d. h. der maximale und der minimale Abstand zwischen den Windungen bewegt sich in einem Bereich von 100,04 μm (100,0 μm + 0,04 μm) bis 99,96 μm (100,0 μm - 0,04 μm) und weicht entlang der Messstrecke um mindestens 0,08 μm voneinander ab. Derartige Varianzen sind mit modernen Messverfahren optisch erfassbar und können als Referenz bzw. Bezug zur Überwachung der relativen Bewegung und folglich der Auslenkung zweier benachbarter Windungen zueinander genutzt werden.

[0028] Vorteilhafte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen beansprucht und werden nachfolgend näher erläutert.

[0029] So kann nach einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung für die optische Erfassung der Auslenkung benachbarter Windungen zueinander mindestens ein Windungsabschnitt festgelegt werden, innerhalb dessen die Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen zumindest entlang einer der Winkelverschiebung entsprechenden Messstrecke mindestens 0,025 %, 0,04 %, 0,05 % oder 0,1 % beträgt, weiter bevorzugt mindestens 0,25 % oder 0,3 % und vorzugsweise höchstens 1,5 %, sowie weiter bevorzugt höchstens 1,0%.

[0030] Dadurch, dass sich die Windungen in der Schwingungsbewegung relativ zueinander bewegen, ist es nach einer Erfindungsvariante vorteilhaft, die Auslenkung benachbarter Windungen zueinander anhand des zumindest entlang einer der Winkelverschiebung entsprechenden Messstrecke stetig oder kontinuierlich variierenden Abstands zwischen den benachbarten Windungen optisch zu erfassen. Bei einer kontinuierlichen Varianz oder Änderung des Abstands, also einer kontinuierlichen Zu- oder Abnahme oder einem kontinuierlichen Wechsel zwischen Zu- und Abnahme des Abstands, wird bei der optischen Erfassung ein sich kontinuierlich veränderndes optisches Messsignal oder Bild erhalten. Hierdurch wird die Auswertung des optischen Messignals zur Bestimmung der maximalen Auslenkung, also dem Punkt, an dem sich die Schwingungsbewegung umkehrt, erheblich vereinfacht. Gleichzeitig wird so die Fehleranfälligkeit gesenkt. Anhand einer kontinuierlichen Varianz können nämlich für die jeweilige Positionierung der Windungen zueinander charakteristische Abstandsmuster softwaregestützt ermittelt werden, anhand derer beispielsweise die Richtung der Schwin-

gungsbewegung und/oder der Grad der Auslenkung benachbarter Windungen zueinander zu jedem Zeitpunkt eindeutig bestimmt werden können. Dabei hat es sich ebenfalls als Vorteil erwiesen, dass der insbesondere kontinuierlich variierende Abstand einer stetig verlaufenden Änderung unterliegt, also stetig variiert. Hierdurch werden Spitzen oder "Ausreißer" des optischen Messsignals vermieden.

[0031] Grundsätzlich ist es denkbar, den Abstand zwischen benachbarten Windungen als die jeweils orthogonal auf die einander zugewandten Seitenflächen der benachbarten Windungen auftreffende Verbindungslinie zu definieren. Um die für das optische Messverfahren erforderliche Varianz des Abstands zu erzeugen, wird die Geometrie der Spiralfeder bzw. der Spiralklinge so verändert, dass die Seitenflächen nicht dem üblicherweise vertikalen Verlauf folgen. Vorzugsweise wird der Abstand daher als radialer Abstand zwischen den benachbarten Windungen, d.h. entlang eines Radius der Spiralfeder ausgehend von einer Seitenfläche einer der Windungen hin zu der gegenüberliegenden Seitenfläche der anderen Windung definiert.

[0032] Wegen der veränderten, optimierten Geometrie der Spiralklinge kann es nach einer ebenso vorteilhaften Erfindungsvariante erforderlich sein, die Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen entlang des Windungsabschnitts auf einer in Bezug auf die Höhe der Spiralklinge, insbesondere der benachbarten Windungen definierten Messhöhe zu erfassen. Die Messhöhe kann bspw. einem Bruchteil, insbesondere der Hälfte der Höhe der benachbarten Windungen aber auch der oberen oder unteren Längskante entsprechen und hängt von der konkreten und die Varianz des Abstands bewirkenden Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen der benachbarten Windungen ab.

[0033] Die Messhöhe wird daher auf Basis der Geometrie der Spiralklinge, insbesondere der einander zugewandten Seitenflächen festgelegt. Entsprechende Daten, zur konkreten Geometrie der Spiralklinge, zumindest in einem Windungsabschnitt der Spiralfeder, können bspw. auf einem elektronischen Datenträger hinterlegt werden und anschließend für die Einstellung der Parameter im optischen Messverfahren genutzt werden.

[0034] Um den Abstand zwischen benachbarten Windungen fehlerfrei zu erfassen ist es nach einer Ausführung der Erfindung besonders vorteilhaft, dass für die optische Erfassung vorgesehene optische Messmittel, insbesondere Lichtquelle(n) und/oder Lichtempfänger von oben oder unten gerade, d. h. parallel zur Achse der Spiralfeder oder alternativ schräg, einen Winkel größer oder kleiner 90° mit der Achse der Spiralfeder einschließend, auf den zu überwachenden Windungsabschnitt bzw. die benachbarten Windungen ausgerichtet sind.

[0035] Durch das optische Messverfahren und ggf. nachgeschaltete (Bild)-Auswertungssoftware ist ein hochpräzises, direktes Überwachen von Bewegungsabläufen möglich. Die einander benachbarten Windungen der Spiralfeder weisen während der Schwingungsbewegung entlang des überwachten Windungsabschnitts ein durch den variierenden Abstand charakteristisches Bildmuster auf, welches als Bezug bzw. Referenz für die (Bild)-Auswertungssoftware dient. Für das optische Messverfahren geeignete und im Stand der Technik hinreichend beschriebene Messverfahren sind bspw. die Laser-Doppler Vibrometrie, Laser interferometrische Vibrometrie, Weißlicht-Interferometrie, auch mit konfokalem Mikroskop, 2D/3D-Laserscanning, hochauflösende Digitalmikroskopie mit Videofunktion und/oder kombinierte Laserlicht- und Weißlicht Mikroskopie für 2D/3D Scanning. Bei der Weißlicht-Interferometrie handelt es sich um ein rein optisches Messverfahren, welches bis zu einer Million Bilder pro Sekunde aufnimmt. Eine nachgeschaltete Software bzw. hinterlegte Programmierung kann anhand der Unregelmäßigkeiten, die sich aus der Varianz des Abstands ergeben, die Auslenkung bzw. die maximale Auslenkung oder Winkelabweichung der benachbarten Windungen zueinander bestimmen. Bei der Laserinterferometrie bspw. wird die Geometrie bzw. der Abstand der zueinander benachbarten Windungen mittels eines Lasers mit 1 Million Punkte pro Sekunde gescannt oder abgetastet.

[0036] Die oben genannten Messverfahren können allein oder in Kombination eingesetzt werden. Insbesondere in Kombination lässt sich eine hochpräzise, qualitative Aussage über das Schwingverhalten der Spiralfeder treffen und Ansatzpunkte für gezielte Eingriffe ermitteln.

[0037] Wegen der sekundenschnellen Messwertaufnahme und -auswertung ist das erfindungsgemäße Verfahren besonders zum Einsatz in automatisierten Montagestraßen, in der Linienmontage bei der Uhrwerkfertigung, einsetzbar. Die Prüfung und zugleich Regulierung der Spiralfeder kann vollautomatisch erfolgen. Auch ist das Verfahren sehr gut geeignet zum Vorregulieren von kompletten Schwingsystemen als Einzelplatzmessung. Es wird durch das Messsystem direkt an der Spirale bzw. an einem definierten Windungsabschnitt die Schwingungsweite, die Frequenz und der Gang der Uhr angezeigt. Auch etwaige Störeinflüsse wie Eigenfrequenzen und Auslenken aus der Spiralebene während der Schwingung werden sichtbar gemacht. Diese Messungen erfolgen innerhalb weniger Sekunden.

[0038] Bedarfsweise, im Zuge einer Qualitätskontrolle und insbesondere zur Bestimmung der Ganggenauigkeit eines mechanischen Uhrwerks, kann nach einer optionalen Verfahrensvariante die Schwingungsfrequenz anhand der Schwingungsdauer der Spiralfeder ermittelt werden. Ein einmalige Auslenkung zweier benachbarter Windungen zueinander um die Winkelabweichung entspricht einer Halbschwingung der Spiralfeder. Anhand einer Messung der hierfür benötigten Zeitdauer kann die Anzahl an Halbschwingungen oder vollständigen Schwingungen (also zwei Halbschwingungen) pro Zeiteinheit und folglich die Schwingungsfrequenz bestimmt werden.

[0039] Schließlich kann nach einer vorteilhaften Vari-

ante des erfindungsgemäßen Verfahrens die Ganggenauigkeit bzw. eine Gangabweichung oder ein Gangfehler eines mechanischen Uhrwerks anhand der ermittelten Schwingungsweite und/oder -frequenz erfolgen. Hierzu wird ein Sollwert-Zlstwert-Vergleich durchgeführt, wobei die ermittelte Schwingungsweite und/oder - frequenz dem Istwert entspricht und dieser mit einem entsprechenden, zuvor festgelegten Sollwert verglichen wird. Vorzugsweise können die Sollwertdaten zur automatisierten Durchführung des optischen Messverfahrens vorab auf einem elektronischen Datenträger eines zur Durchführung des Messverfahrens geeigneten Steuerungsmoduls hinterlegt werden.

[0040] Vorzugsweise wird eine für das erfindungsgemäße Messverfahren optimierte Geometrie der Spiralklinge der Spiralfeder bereits bei deren Herstellung berücksichtigt, d. h. die Spiralfeder kann mit mindestens einem Windungsabschnitt hergestellt werden, der sich aufgrund der Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen zur optischen Erfassung der relativen Auslenkung benachbarter Windungen eignet. Die Geometrie der Seitenflächen wird hierzu derart ausgebildet, dass der Abstand zwischen den benachbarten Windungen entlang des Windungsabschnitts variiert. Entsprechende Daten, zur konkreten Geometrie der Spiralklinge, zumindest in einem Windungsabschnitt, können für ein automatisiertes Herstellungs- und Messverfahren auf einem elektronischen Datenträger hinterlegt und sowohl zur Festlegung entsprechender Parameter im optischen Messverfahren, wie Messhöhe oder Abstandsdefinition, als auch zur Festlegung der Parameter für die Herstellung der Spiralfeder zur Verfügung gestellt werden.

[0041] Die eingangs gestellte Erfindungsaufgabe wird daher auch durch eine Spiralfeder, die sich zur Verwendung in dem erfindungsgemäßen optischen Messverfahren eignet und deren Geometrie, insbesondere die Ausgestaltung der Spiralklinge dafür, und im Hinblick auf ihr Schwingungsverhalten optimiert ist, gelöst.

[0042] Eine derartige, erfindungsgemäße Spiralfeder weist mehrere Windungen auf, die sich entlang jeweiliger Kreisbahnen einen spiralförmigen, insbesondere archimedischen und/oder logarithmischen Verlauf bildend erstrecken und ist, insbesondere zur Taktgebung eines mechanischen Uhrwerks, zu einer Schwingungsbewegung anregbar, wobei benachbarte Windungen entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen um eine Winkelverschiebung zueinander ausgelenkt werden. Die erfindungsgemäße Spiralfeder kennzeichnet sich dadurch, dass der Abstand zwischen den benachbarten Windungen zumindest entlang einer der Winkelverschiebung β entsprechenden Messstrecke variiert, wobei die Varianz des Abstands (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) durch die Ausgestaltung der einander zugewandten Seitenflächen (131) der benachbarten Windungen (110) der Spiralfeder (100) bewirkt wird und entlang der Messstrecke mindestens 0,02 % und höchstens 1,5 % beträgt.

[0043] Anders als die aus dem Stand der Technik bekannten Spiralfedern, bei welchen der Abstand zwischen benachbarten Windungen entlang der Längserstreckung also dem Spiralverlauf folgend konstant ist, weist die erfindungsgemäße Spiralfeder einen variierenden oder variablen Abstand auf.

[0044] Um die Erfassung der Schwingungsbewegung und die relative Auslenkung, die während der Schwingung zwischen benachbarten Windungen stattfindet, mit optischen Messmitteln bzw. Messverfahren zu erleichtern, beträgt die Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen entlang der Messstrecke vorzugsweise mindestens 0,025 %, 0,04 %, 0,05 % oder 0,1 %, weiter bevorzugt mindestens 0,25 % oder 0,3 %. Je höher die Varianz, desto präziser lässt sich die relative Auslenkung mit optischen Mitteln erfassen und desto zuverlässiger sind die ermittelten Werte für Schwingungsweite und/oder -frequenz. Um ein weiterhin gleichmäßiges Schwingungsverhalten der Spiralfeder im Uhrwerk zu gewährleisten und um insbesondere zu vermeiden, dass die benachbarten Windungen einander während der Schwingungsbewegung berühren, beträgt die Varianz höchstens 1,5 % und bevorzugt höchstens 1,0 %. Die genannten Wertebereiche für die Varianz des Abstands stellen jeweils einen gangbaren Kompromiss zwischen einerseits der Eignung als Referenz bzw. Bezug für optische Messmittel zur dynamischen Erfassung der Winkelverschiebung und andererseits einer Spiralfeder mit optimiertem Schwingungsverhalten zur Verwendung in mechanischen Uhrwerken dar.

[0045] Der Abstand zwischen den benachbarten Windungen kann dabei nicht nur entlang dem Windungsverlauf bzw. der Messstrecke, sondern nach einer vorteilhaften Ausführungsvariante auch entlang der Höhe der einander zugewandten Seitenflächen der Spiralfeder variieren, wodurch für das optische Messverfahren weitere Bezugs- oder Referenzpunkte gegeben sind. Entlang der Höhe beträgt die Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen mindestens 0,01 % und höchstens 2,0 %. Bevorzugte Werte für die Varianz des Abstands sind dabei mindestens 0,015 %, 0,02 %, 0,03 % oder 0,05 %, weiter bevorzugt mindestens 0,125 % oder 0,15 % und höchstens 1,5 % oder 1,0%. Sowohl entlang der Windungsverlaufs als auch entlang der Höhe sind die konkreten Varianzwerte durch die die Varianz bewirkende Ausgestaltung der einander zugewandten Seitenflächen der Spiralfeder beeinflusst.

[0046] Üblicherweise ist der Abstand zwischen den Windungen einer Spiralfeder für mechanische Uhrwerke entlang des vollständigen Spiralverlaufs konstant und beträgt zumeist 80,0 μm bis 200 μm. Wird ein Abstand der Windungen zueinander von bspw. 80,0 μm zugrunde gelegt, ergibt sich bei einer Varianz von mindestens 0,02 % eine Abweichung von +/- 0,016 μm um den Mittelwert. Daraus ergibt sich wiederum ein Bereich von 80,016 μm (= 80,0 μm + 0,016 μm) bis 79,084 μm (= 80,0 μm - 0,016 μm), innerhalb dessen der Abstand entlang der Messstrecke bzw. des Windungsverlaufs und vorzugsweise auch entlang der Höhe mindestens variieren sollte.

[0047] Wird stattdessen ein Abstand der Windungen

zueinander von bspw. 200,0 μm zugrunde gelegt, ergibt sich bei einer Varianz von höchstens 1,5 % eine Abweichung von +/- 3,0 μm um den Mittelwert. Daraus ergibt sich wiederum ein Bereich von 203,0 μm (= 200,0 μm + 3,0 μm) bis 197,0 μm (= 200,0 μm - 3,0 μm), innerhalb dessen der Abstand entlang der Messstrecke bzw. des Windungsverlaufs und vorzugsweise auch entlang der Höhe höchstens variieren sollte.

[0048] Alternativ oder optional kann der Abstand entlang der Messstrecke (auch) kontinuierlich oder stetig variieren.

[0049] Der variierende Abstand wird durch die Geometrie bzw. die Ausgestaltung der einander zugewandten Seitenflächen der benachbarten Windungen der Spiralfeder bewirkt. Nach bevorzugter Erfindungsausführung wird die Geometrie durch die Ausgestaltung der Oberflächenbeschaffenheit einer oder beider der einander zugewandten Seitenflächen beeinflusst, welche mit einer die Varianz des Abstands bewirkenden Welligkeit ausgestaltet sind.

[0050] Die Welligkeit, d. h. eine Gestaltabweichung 2. Ordnung der einander zugewandten Seitenflächen kann aufgrund der in größeren Intervallen auftretenden Änderungen der Wellentiefe besser zur dynamischen Erfassung mit optischen Messmitteln genutzt werden als die Rauheit, also eine Gestaltabweichung 3. oder 4. Ordnung. Aufgrund der wesentlich kleineren Intervalle, innerhalb dessen die Änderungen der Rautiefe im Rauheitsprofil auftreten, neigen diese dazu, im bildgebenden dynamischen Messverfahren, währenddessen sich die Windungen der Spiralklinge mit einer Frequenz von 1 bis 5 Schwingungen pro Sekunde relativ zueinander bewegen, zu verschwimmen. Die in größeren Intervallen auftretenden Änderungen der Wellentiefe Wt sind mit optischen Mitteln dynamisch erheblich einfacher zu erfassen, wodurch eine zuverlässigere Auswertung der Schwingungsweite und/oder -frequenz erfolgen kann. Entsprechend der größeren Intervalle ist auch für die Messstrecke, entlang welcher die Welligkeit optisch erfasst wird, ein Mindestmaß zugrunde zu legen. Ausreichend kann bereits eine mindestens 50,0 μm, besser noch mindestens 100,0 μm lange Messstrecke sein. Vorzugsweise wird die Welligkeit entlang einer der Winkelabweichung entsprechenden Messstrecke erfasst, wobei sich entsprechend ein Welligkeitsprofil der einander gegenüberliegenden Seitenflächen der Spiralklinge entlang einem der Winkelabweichung entsprechenden Windungsabschnitt als vorteilhaft erweist.

[0051] In der Regel ist es vorteilhaft, beide der einander zugewandten Seitenflächen mit einer Welligkeit auszubilden, da in diesem Fall die maximale Wellentiefe Wt, um die gewünschte Varianz des Abstands zu erreichen geringer gewählt werden kann. Wird hingegen nur eine der beiden Seitenflächen mit einer Welligkeit ausgebildet, so ist diese mindestens doppelt so hoch zu wählen.

[0052] Dabei kann die Oberflächenbeschaffenheit der einander zugewandten Seitenflächen eine Welligkeit entlang des Windungsverlaufs und/oder entlang der Höhe aufweisen, d. h., dass sich das jeweilige Welligkeitsprofil über einen der Messstrecke entsprechenden Windungsabschnitt bzw. teilweise oder vollständig über die Höhe der Seitenfläche der Spiralklinge erstreckt.

[0053] Indem die einander zugewandten Seitenflächen der Spiralklinge mit einer Welligkeit ausgestaltet werden, um die Varianz des Abstands zu bewirken, kann gleichzeitig die Rauheit der Seitenfläche, also die Werte für die Rautiefe gering gewählt werden, um Spannungen innerhalb der und folglich die Bruchgefahr für die Spiralklinge zu minimieren. Für ein geeignetes Rauheitsprofil hat sich ein Rautiefenwert R_z einer oder beider einander zugewandten Seitenflächen von höchstens 0,5 μm herausgestellt, bevorzugt liegt der Rautiefenwert jedoch niedriger, insbesondere zwischen 0,5 μm bis 0,005 μm.

[0054] Nach einer beispielhaften Erfindungsvariante, insbesondere um die gewünschten Werte für die aus der Oberflächenbeschaffenheit oder Geometrie resultierende Varianz des Abstands und gleichzeitig eine möglichst geringe Rauheit der Seitenflächen der Spiralklinge zu realisieren, ist die Spiralfeder aus Silizium, vorzugsweise aus mono- oder polykristallinem Silizium mittels eines Ätzverfahrens hergestellt und optional mit einer Beschichtung aus Siliziumoxid oder Siliziumdioxid versehen.

[0055] Das gewünschte, die Varianz des Abstands bewirkende Welligkeitsprofil kann dann wahl- oder bedarfsweise an der Oberfläche bzw. den Seitenflächen des Kerns der Spiralfeder und/oder an der die Seitenflächen überziehenden Beschichtung ausgestaltet sein. Die dynamische, optische Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit, erfolgt dann entsprechend an der Beschichtung und/oder am Kern der Spiralfeder, bspw. mittels Interferometrie, was in der Halbleitertechnik auch zur Schichtdickenbestimmung eingesetzt wird.

[0056] Nach einer beispielhaften Erfindungsvariante ist die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen derart ausgestaltet, dass der Abstand zwischen den Windungen entweder über die vollständige Höhe der Spiralklinge, oder lediglich auf einer bestimmten Höhe, oder einem bestimmten Höhenbereich entlang der Messstrecke variiert.

[0057] Vorzugsweise ist die Höhe der Spiralklinge entlang des vollständigen Spiralverlaufs konstant und liegt bspw. in einem Bereich zwischen 80 μm und 160 μm. Auch die Breite der Spiralklinge, welche üblicherweise in etwa 25 bis 45 μm beträgt, ist grundsätzlich entlang des vollständigen Spiralverlaufs konstant. Durch die veränderte Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen treten jedoch Abweichungen auf, die der Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen entsprechen.

[0058] Bei einer bevorzugten Erfindungsausführung kann der Abstand zwischen den benachbarten Windungen bspw. im Bereich der unteren Längskante von dem Abstand zwischen den benachbarten Windungen im Bereich der oberen Längskante der einander zugewandten Seitenflächen abweichen, wobei der Abstand im Bereich

der oberen Längskante und/oder im Bereich der unteren Längskante entlang der Messstrecke variiert. Insbesondere kann der Abstand im Bereich einer der Längskanten, vorzugsweise der oberen Längskante entlang des vollständigen Spiralverlaufs konstant sein und im Bereich der anderen Längskante, vorzugsweise der unteren Längskante, zumindest entlang der Messstrecke variieren. Hieraus kann sich dann eine ebenfalls konstante Breite der Spiralklinge im Bereich der oberen und eine entsprechend der Varianz des Abstands zumindest entlang der Messstrecke abweichende Breite der Spiralklinge im Bereich der unteren Längskante ergeben. Die Bezeichnung "obere" und "untere" Längskante bezieht sich auf die Einbaulage der Spiralfeder bzw. des Uhrwerks in einem Chronographen, und zwar von dessen Rückseite aus in Richtung des Ziffernblatts betrachtet.

[0059] Gemäß einer Ausführungsvariante der erfindungsgemäßen Spiralfeder sind die einander zugewandten Seitenflächen einen dazwischenliegenden Öffnungswinkel einschließend ausgestaltet, wobei der Öffnungswinkel die Varianz des Abstands bewirkend, entlang der Messstrecke variiert.

[0060] Normalerweise weist die Spiralklinge einer Spiralfeder einen rechteckigen Querschnitt auf, wobei die Höhe der Spiralklinge parallel zu deren Drehachse verläuft. Der Öffnungswinkel kann durch einen über die Höhe schrägen Verlauf einer oder beider Seitenflächen, d. h. der Verlauf Seitenfläche(n) ist dann nicht länger parallel zur Drehachse, ausgebildet sein. Der mittlere Öffnungswinkel kann grundsätzlich 0° betragen, liegt aber vorzugsweise in einem Bereich zwischen 1,0° und 20,0°, weiter bevorzugt zwischen 1,0° und 10,0° oder besonders bevorzugt zwischen 1,0° und 7,0°. Alternativ beträgt der Öffnungswinkel mindestens 2,0° oder mindestens 3,0° und liegt dann bspw. in einem Bereich zwischen 2,0° und 10,0°, bevorzugt zwischen 2,0° und 7,0° oder besonders bevorzugt zwischen 3,0° und 5,0°. Um eine ausreichende Varianz des Abstands zwischen den benachbarten Windungen zu bewirken, beträgt eine Varianz des Öffnungswinkels zumindest entlang der Messstrecke mindestens 0,1°.

[0061] Für einen Öffnungswinkel von bspw. 3° ergibt sich bei einer Varianz von mindestens 0,1° eine Abweichung von +/- 0,1° um den Mittelwert. Daraus ergibt sich wiederum ein Bereich von 3,1° (= 3,0° + 0,1°) bis 2,9° (= 3,0° - 0,1°), innerhalb dessen der Öffnungswinkel entlang der Messstrecke bzw. des Windungsverlaufs mindestens variieren sollte.

[0062] Besonders vorteilhaft, sowohl für das optische Messverfahren als auch was das Schwingungsverhalten angeht, ist eine Spiralfeder, bei der die Varianz des Abstands zwischen benachbarten Windungen durch eine Kombination des entlang der Messstrecke variierenden Öffnungswinkels und eine entlang des Windungsverlaufs und/oder entlang der Höhe einer oder beider der einander zugewandten Seitenflächen verlaufende Welligkeit bewirkt wird. D. h., dass einerseits der Öffnungswinkel entlang des Windungsverlaufs bzw. entlang der Messstrecke variiert und sich andererseits das jeweilige Welligkeitsprofil über einen der Messstrecke entsprechenden Windungsabschnitt und/oder über die Höhe der Seitenfläche der Spiralklinge teilweise oder vollständig variierend erstreckt.

[0063] Vergleichsweise einfach herzustellen ist dabei eine Ausführungsvariante, bei welcher der Öffnungswinkel durch einen bezüglich der Höhe schrägen Verlauf einer oder beider Seitenflächen ausgebildet ist, sowie entlang der Messstrecke, also entlang des Windungsverlaufs variiert, und gleichzeitig die Welligkeit entlang der Höhe, also dem schrägen Verlauf der Seitenfläche folgend variiert. Die Nulllinie eines sich daraus ableitenden Welligkeitsprofils entspricht dann der im Querschnitt einer solchen Spiralklinge schräg zur Drehachse verlaufenden Höhe.

[0064] Gemäß anderer Ausführungsvarianten der erfindungsgemäßen Spiralfeder können die einander zugewandten Seitenflächen einem über die Höhe konkaven und/oder konvexen Verlauf folgend und/oder im Bereich der oberen und/oder unteren Längskante einen abgerundeten oder angeschrägten Übergangsbereich aufweisend ausgebildet sein, wobei der konkave und/oder die Abrundung oder Anschrägung des Übergangsbereichs entlang der Messstrecke variieren.

[0065] Ein konkaver und/oder konvexer Verlauf der Seitenfläche kann wahlweise auf einer oder auf beiden Seitenflächen ausgebildet sein, wobei sich der Verlauf entweder über die gesamte Höhe oder lediglich einen Teilbereich der Höhe erstreckt. Ein angeschrägter und/oder abgerundeter Übergangsbereich ist an der oberen und/oder unteren Längskante einer oder beider Seitenflächen ausgebildet. Um eine ausreichende Varianz des Abstands zu bewirken, beträgt eine Varianz des Übergangsbereichs entlang der Messstrecke vorzugsweise mindestens 10 %, 20 % oder 25 %, insbesondere mindestens 40 %. Für eine Kantenverrundung von bspw. 2,0 μm ergibt sich bei einer Varianz von mindestens 25 % eine Abweichung von +/- 0,5 μm um den Mittelwert. Daraus ergibt sich wiederum ein Bereich von 1,5 μm (2,0 μm - 0,5 μm) bis 2,5 μm (2,0 μm + 0,5 μm) innerhalb dessen die Kantenverrundung entlang der Messstrecke bzw. des Windungsverlaufs mindestens variiert.

[0066] Nach einer alternativen Erfindungsausführung ist der Abstand zwischen den benachbarten Windungen über die vollständige Höhe der einander zugewandten Seitenflächen gleich und variiert entlang der Messstrecke. Beispielsweise kann sich ein kontinuierlich oder stetig entlang der Messtrecke variierender oder unregelmäßiger Verlauf der oberen und unteren Längskanten in die entsprechenden Seitenflächen fortsetzen, sodass ein über die Höhe der Spiralklinge konstanter und entlang der Messstrecke variierender Abstand zwischen den benachbarten Windungen erzeugt wird. Dies hat den Vorteil, dass die optische Erfassung des Abstands auf beliebiger Messhöhe erfolgen kann, wodurch die Messwertaufnahme eindeutig gesichert ist.

[0067] Nach einer bevorzugten Erfindungsvariante ist

die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen der Windungen im Bereich der oberen und/oder unteren Längskante derart ausgebildet, dass die Längskante(n) zumindest entlang der Messstrecke einen unregelmäßigen oder variierenden Verlauf aufweist.

[0068] Selbstverständlich ist auch eine Kombination einer, mehrerer oder aller zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiele denkbar, um die zur dynamischen, optischen Erfassung mindestens erforderliche Varianz des Abstands zu bewirken.

[0069] Für das Schwingungsverhalten und die Bruchbeständigkeit der Spiralfeder kann es schließlich vorteilhaft sein, wenn diese nach beispielhafter Ausführung eine Spiralklinge aufweist, deren Form, insbesondere deren Seitenflächen einem ausgehend vom inneren Windungsende zum äußeren Windungsende hin stetig abnehmendem Krümmungsverlauf folgt und/oder die massiv ausgebildet ist.

[0070] Weitere Einzelheiten, Merkmale, Merkmals(unter)kombinationen, Vorteile und Wirkungen auf Basis der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele der Erfindung und den Zeichnungen. Diese zeigen in

Fig. 1 eine perspektivische Darstellung eines aus dem Stand der Technik bekannten Schwingungssystems eines mechanischen Uhrwerks, mit einer Spiralfeder,

Fig. 2 eine perspektivische Darstellung der Spiralfeder aus Figur 1 in einer spannungsfreien Mittellage,

Fig. 3 eine schematische, radiale Schnittansicht zweier benachbarter Windungen der Spiralklinge der Spiralfeder aus den Figuren 1 und 2,

Fig. 4 eine Draufsicht auf die Spiralfeder aus den Figuren 1 bis 3 in einer um die halbe Schwingungsweite ausgelenkten Stellung,

Fig. 5 eine beispielhafte Auftragung des Schwingungsverlaufs einer Spiralfeder,

Fig. 6 eine schematische, radiale Schnittansicht mehrerer jeweils benachbarter Windungen der Spiralklinge der Spiralfeder aus den Figuren 1 bis 4, mit dazu positionierten Messmitteln nach einer erfindungsgemäßen Verfahrensvariante,

Fig. 7 eine schematische Darstellung der schwingungsbedingten Änderung des Windungsabstands während der Schwingungsbewegung einer Spiralfeder,

Fig. 8 eine schematische Darstellung der schwingungsbedingten Änderung des Windungsabstands in Überlagerung mit einer beispielhaften, erfindungsgemäßen, durch die Bauteilgeometrie bedingten Varianz des Abstands,

Fig. 9 eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts mit zwei benachbarten Windungen nach einer ersten Ausführungsform der Erfindung, mit in einem Übergangsbereich variierendem Abstand,

Fig. 10 eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts mit zwei benachbarten Windungen nach einer zweiten Ausführungsform der Erfindung, mit konkaver Geometrie der Seitenflächen,

Fig. 11 eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts mit zwei benachbarten Windungen nach einer dritten Ausführungsform der Erfindung, mit einem variierenden Öffnungswinkel,

Fig. 12 eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts mit zwei benachbarten Windungen nach einer vierten Ausführungsform der Erfindung, mit entlang der oberen und der unteren Längskante jeweils variierendem Abstand,

Fig. 13 eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts mit zwei benachbarten Windungen nach einer fünften Ausführungsform der Erfindung, mit über die Höhe der Seitenflächen konstantem und entlang des Windungsabschnitts variierendem Abstand,

Fig. 14 eine perspektivische Darstellung einer Spiralfeder nach einer sechsten Ausführungsform der Erfindung, in einer um die halbe Schwingungsweite ausgelenkten Stellung und mit einer Seitenfläche der Spiralklinge in vergrößerter Darstellung,

Fig. 15 eine optische Darstellung der messtechnisch erfassten Oberflächenbeschaffenheit der vergrößert dargestellten Seitenfläche aus Figur 14 sowie das zugehörige Rauheits-, Welligkeits- und Primärprofil entlang der Messstrecke bzw. des Windungsverlaufs der Spiralklinge und in

Fig. 16 eine optische Darstellung der messtechnisch erfassten Oberflächenbeschaffenheit der vergrößert dargestellten Seitenfläche aus Figur 14 sowie das zugehörige Rauheits-, Welligkeits- und Primärprofil entlang der Höhe der Spiralklinge.

[0071] Die Figuren sind lediglich beispielhafter Natur und dienen nur dem Verständnis der Erfindung. Die gleichen Elemente sind mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0072] Figur 1 zeigt eine perspektivische Darstellung eines aus dem Stand der Technik bekannten Schwingsystems 200 für mechanische Uhrwerke. Das Schwingsystem 200, auch als Unruh bezeichnet, umfasst als wesentliche Bestandteile einen Schwingkörper 210, hier als Schwungrad ausgebildet, und eine Spiralfeder 100. Der Schwingkörper 210 dient als Schwungmasse und ist um eine Drehachse 220 drehbar gelagert. Die Spiralfeder 100 ist mit ihrem inneren Windungsende 140 an einem

inneren Federbefestigungsmittel 230 und mit ihrem äußeren Windungsende 150 an einem äußeren Federhalteelement 240 befestigt. Dazwischen erstreckt sich in spiralförmigem Verlauf die im Querschnitt rechteckige Spiralklinge 130 mit mehreren Windungen 110 die den aktiven Schwingungsbereich der Spiralfeder 100 bilden. Zur Taktgebung des Uhrwerks wird die vom Federhaus kommende Kraft auf das Schwingsystem 200 übertragen, sodass die Spiralfeder 100 möglichst gleichmäßig um ihre spannungsfreie Mittellage schwingt. Beim Verlassen der Mittellage bewirkt der Schwingkörper 210 ein Vorspannen der Spiralfeder 100, wodurch ein Rückholdrehmoment erzeugt wird, das die Spiralfeder 100 zur Rückkehr in ihre Mittellage veranlasst. Dabei wird dem Schwingkörper 210 eine kinetische Energie verliehen, wodurch die Spiralfeder 100 über ihre Mittellage hinaus in die andere Richtung schwingt. Die Spiralfeder 100 schwingt ihrer Schwingungsweite entsprechend einmal hin und einmal her. Schwingungsweiten von Flachspiralfedern für mechanische Uhrwerke liegen üblicherweise bei 200° bis 300°.

[0073] Die Figur 2 zeigt eine perspektivische Darstellung der Spiralfeder 100 aus Figur 1, die sich in ihrer spannungsfreien Mittellage befindet. Dies ist anhand der rein der Veranschaulichung dienenden Markierungen auf den Windungen 110 dargestellt. Die Markierungen sind lediglich in der Zeichnung vorhanden und stellen keinen Bestandteil der tatsächlichen Spiralfeder 100 dar. Beispielhaft ist außerdem die Schwingungsweite von etwa 220° dargestellt, innerhalb derer sich die Spiralfeder 100 um die Mittellage bewegt.

[0074] In der Figur 3 ist eine schematische, radiale Schnittansicht zweier benachbarter Windungen 110 der Spiralklinge 130 der Spiralfeder 100 aus den Figuren 1 und 2 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass die die einzelnen Windungen 110 bildende Spiralklinge 130 einen rechteckigen Querschnitt mit einer Höhe h und einer Breite b aufweist. Die Höhe h, die Breite b und der Abstand x zwischen zueinander benachbarten Windungen 110, sind entlang des spiralförmigen Verlaufs der Spiralklinge 130 konstant. Beispielhaft kann die Höhe h bei einem Wert zwischen 120 μm und 140 μm liegen, die Breite b bei einem Wert zwischen 25 μm und 40 μm liegen und der Abstand x bei einem Wert zwischen 80 μm und 200 μm liegen.

[0075] Eine Draufsicht der Spiralfeder 100 aus den Figuren 1 bis 3, in einer um die halbe Schwingungsweite ausgelenkten Stellung, kann der Figur 4 entnommen werden. Während der Schwingungsbewegung, deren Richtung in der Zeichnung durch einen Pfeil angedeutet ist, folgen die einzelnen Windungen 110 ihren jeweiligen Kreisbahnen und bewegen sich um den Mittelpunkt bzw. die Drehachse 220. Anhand der zur Veranschaulichung dienenden Markierung ist gut zu erkennen, dass innerhalb eines Windungsabschnitts 120 zueinander benachbarte Windungen 110 während der Schwingungsbewegung der Spiralfeder 100 einer Relativbewegung unterliegen, d. h. um eine entlang der entsprechenden Kreisbahn verlaufende Strecke zueinander ausgelenkt werden. In der hier gezeigten Stellung befindet sich die Spiralfeder 100 nach einer Halbschwingung an ihrem Umkehrpunkt UP, sodass benachbarte Windungen 110 um einen Maximalbetrag zueinander ausgelenkt sind, welcher der ebenfalls eingezeichneten Winkelverschiebung β entspricht. Typische Werte für die Winkelverschiebung β liegen im Bereich zwischen 5° und 30°.

[0076] In der Figur 5 ist der Verlauf einer vollständigen Schwingung der Spiralfeder 100 anhand deren Auslenkung um ihre spannungsfreie Mittellage 0 dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet sind die Umkehrpunkte UP, an denen sich die Richtung der Schwingung umkehrt. Die Spiralfeder 100 wird zunächst aus der spannungsfreien Mittellage 0 in einer ersten Richtung ausgelenkt, solange bis die maximale Auslenkung am Umkehrpunkt UP erreicht ist und kehrt danach, in entgegengesetzter, zweiter Richtung in die spannungsfreie Mittellage 0 zurück (Halbschwingung). Eine vollständige Schwingung ist abgeschlossen, nachdem die spannungsfreie Mittellage 0 in der zweiten Richtung durchlaufen wurde und die Spiralfeder 100 nach erneuter Richtungsumkehr am Umkehrpunkt UP wieder der ersten Richtung folgend in die spannungsfreie Mittellage 0 zurückkehrt. Die einzelnen Windungen 110 folgen einer entsprechenden Bewegung entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen, wobei zwischen zueinander benachbarten Windungen 110 jeweils eine die Winkelverschiebung β (s. Figur 4) verursachende Relativbewegung resultiert.

[0077] Erfindungsgemäß soll nun mittels eines optischen Messverfahrens auf Basis dieser Winkelverschiebung β die Schwingungsweite der Spiralfeder 100 ermittelt werden. Hierzu sind, wie in der Figur 6 dargestellt, optische Messmittel 160, bspw. Lichtsender und/oder Lichtempfänger, vorzugsweise von oben oder unten vertikal, d. h. parallel zur Drehachse 220 bzw. zur Höhe h der Spiralklinge, oder schräg, d. h. einen Winkel größer oder kleiner 90°, hier beispielhaft in etwa 45° mit der Drehachse 220 oder Höhe h einschließend, auf einen jeweiligen Windungsabschnitt 120 ausgerichtet. Die hier gezeigte Anordnung der optischen Messmittel 160 ist lediglich beispielhaft. Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Messverfahrens genügt auch ein einziges optisches Messmittel 160.

[0078] Die optischen Messmittel 160 dienen der Überwachung des jeweiligen Windungsabschnitts 120, wobei die darin erfolgende Auslenkung der benachbarten Windungen 110 zueinander optisch erfasst wird. Als Bezug oder Referenz für das optische Messmittel 160 fungiert der Abstand x zwischen den benachbarten Windungen 110 innerhalb zumindest eines Windungsabschnitts 120. Hierzu darf der Abstand x in Längsrichtung der Windungen 110, also dem Spiralverlauf folgend, aber nicht konstant sein, da die relative Bewegung sonst optisch nicht erkennbar wäre. Eine "Visualisierung" der relativen Bewegung oder Auslenkung benachbarter Windungen 110 zueinander erfolgt nämlich, indem deren Abstand x entlang des Windungsabschnitts 120 variiert. Durch opti-

sches Abtasten mittels der Messmittel 160 kann bei einem variierenden Abstand x die Winkelverschiebung β der Windungen 110, welche sich im dynamischen Betrieb, also während der Schwingungsbewegung zueinander verschieben, gesichert aufgenommen werden.

[0079] In der Figur 7 ist die schwingungsbedingte Änderung des Windungsabstands WA während der Schwingungsbewegung der Spiralfeder 100 schematisch veranschaulicht. Während der Schwingung zieht sich die Spiralfeder 100 nämlich schwingungsbedingt zusammen und wieder auseinander, die Spiralfeder 100 "atmet". Hierdurch wird eine der Schwingungsperiode folgende Änderung des Windungsabstands WA hervorgerufen. Diese schwingungsbedingte Änderung des Windungsabstands WA tritt unvermeidlich beim Zusammen- und Auseinanderziehen von Spiralfedern 100 auf, und sollte daher vorzugsweise bei der optischen Erfassung der Winkelverschiebung β (s. Figur 4) anhand des erfindungsgemäß variierenden Abstands, welcher durch die Bauteilgeometrie, insbesondere die Geometrie der benachbarten Windungsabschnitte 120 bedingt ist, berücksichtigt werden.

[0080] In der Figur 8 ist daher schematisch eine Überlagerung der schwingungsbedingten Änderung des Windungsabstands WA und der erfindungsgemäßen, bauteilgeometriebedingten Varianz des Abstands x anhand zweier beispielhafter Abstände x_1 und x_n dargestellt. Für den mittleren Abstand x, welcher erfindungsgemäß zwischen den Werten x_1 und x_n variieren soll, ist daher vorzugsweise nicht der Abstand der Windungen 110 in der Ruhelage der Spiralfeder 100 zugrunde zu legen, sondern der sich während der Schwingungsbewegung dynamisch verändernde Windungsabstand WA der Spiralfeder 100.

[0081] Bei einer erfindungsgemäßen Spiralfeder 100, die sich zur Verwendung in dem erfindungsgemäßen optischen Messverfahren eignet, ist es daher erforderlich, dass der Abstand x zwischen den benachbarten Windungen 110 zumindest entlang einer Messstrecke, die mindestens der Winkelverschiebung β entspricht, variiert. Vorzugsweise beträgt die Varianz des Abstands mindestens 0,02 %, 0,05 % oder 0,1 % beträgt, weiter bevorzugt mindestens 0,25 % oder mindestens 0,3 % und höchstens 1,5 %, sowie weiter bevorzugt höchstens 1,0%. Bei einer Winkelverschiebung β von bspw. 5° ergibt sich eine Mindestlänge der Messstrecke von 100,0 μm, bei einer Winkelverschiebung β von bspw. 30° eine Mindestlänge von 900,0 μm.

[0082] Vorzugsweise wird der variierende Abstand x durch eine Optimierung der Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen 131 der benachbarten Windungen 110 der Spiralfeder 100 bewirkt. Eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts 120 mit zwei benachbarten Windungen 110 nach einer ersten Ausführungsform der Erfindung ist in der Figur 9 gezeigt. Die einander zugewandten Seitenflächen 131 der benachbarten Windungen 110 weisen an ihrer jeweiligen, oberen Längskante LK einen Übergangsbereich ÜB mit einer mittleren Kantenverrundung von bspw. 2,0 μm auf. Entlang des Windungsabschnitts 120, also entlang des Spiralverlaufs, und mindestens entlang der Messstrecke variiert die Kantenverrundung des Übergangsbereichs ÜB hier bspw. um mindestens 25 %, was einer Abweichung von +/- 0,5 μm um den Mittelwert entspricht. Daraus ergibt sich wiederum ein Bereich von 1,5 μm bis 2,5 μm innerhalb dessen die Kantenverrundung entlang der Messstrecke bzw. des Windungsverlaufs variiert. Eine derartige Geometrie der Seitenflächen 131 bewirkt auch eine Varianz des mittleren Abstands x_2, welcher, hier im Bereich der oberen Längskante LK entlang der Messtrecke innerhalb der Wertereihe x_{21} - x_{2n} vorzugsweise stetig oder kontinuierlich variiert. Konkret könnte beispielsweise der Wert x_{23} größer als x_{21} und x_{24} kleiner als x_{23} sein, der Abstand x_2 nimmt dann zunächst zu und anschließend wieder ab. Alternativ ist natürlich auch eine kontinuierliche Zu- oder Abnahme des Abstands x_2 entlang der Messstrecke denkbar. Bei dem vorliegenden Ausführungsbeispiel variiert der Abstand x_2 ausschließlich im Bereich der oberen Längskante LK, entsprechend wird die Messhöhe für das optische Messverfahren ebenfalls an der oberen Längskante LK festgelegt.

[0083] Die Bezeichnung "obere" und "untere" Längskante LK bezieht sich auf die Einbaulage der Spiralfeder 100 bzw. des Uhrwerks bspw. in einer Uhr oder einem Chronographen, und zwar von dessen Rückseite aus in Richtung des Ziffernblatts betrachtet.

[0084] Die Figur 10 zeigt eine schematisch perspektivische Darstellung eines Windungsabschnitts 120 mit zwei benachbarten Windungen 110 nach einer zweiten Ausführungsform der Erfindung. Die einander zugewandten Seitenflächen 131 weisen hier eine über die Höhe h konkav verlaufende Geometrie auf. Die Konkavität ist hier vor allem im unteren Teilbereich der Seitenflächen 131 ausgebildet, wodurch der Abstand x_2 der benachbarten Windungen 110 im Bereich der oberen Längskante LK entlang der Messstrecke konstant und größer als der mittlere Abstand x_1 im Bereich der unteren Längskante LK ist. Durch eine Varianz der Konkavität entlang der Messstrecke bzw. entlang des Windungsabschnitts 120, kann eine sich vorzugsweise kontinuierlich verändernder untere Längskante LK ausgebildet werden. Eine derartige Geometrie der Seitenflächen 131 bewirkt wiederum eine Varianz des mittleren Abstands x_1, diesmal im Bereich der unteren Längskante LK. Entlang der Messtrecke variiert der mittlere Abstand x_1 innerhalb der Wertereihe x_{11} - x_{1n} vorzugsweise stetig oder kontinuierlich. Entsprechend wird auch die Messhöhe für die untere Längskante LK festgelegt.

[0085] Die Figur 11 zeigt eine dritte Ausführungsform der Erfindung in einer schematisch perspektivischen Darstellung. Der hier gezeigte Windungsabschnitt 120 umfasst zwei benachbarten Windungen 110 mit jeweils schräg verlaufenden, einander zugewandten Seitenflächen 131. Durch den schrägen, von der Vertikalen abweichenden Verlauf der Seitenflächen 131 schließen

diese einen sogenannten Öffnungswinkel α ein, welcher entlang der Messtrecke bzw. entlang des Spiralverlaufs variierend ausgebildet ist und innerhalb der Wertereihe α_1 - α_n um einen mittleren Öffnungswinkel α variiert. Der mittlere Öffnungswinkel α kann beispielhaft 5° betragen, die Varianz liegt insbesondere bei mindestens +/- 0,1°, wodurch der Öffnungswinkel α dann innerhalb der Wertereihe α_1 - α_n mindestens zwischen 4,9° und 5,1° variiert. Die geometrische Ausgestaltung des Öffnungswinkels α bewirkt bspw. einen innerhalb der Wertereihe x_{21} - x_{2n} variierenden Abstand x_2 im Bereich der oberen Längskante LK, wohingegen der Abstand x_1 im Bereich der unteren Längskante LK entlang der Messstrecke konstant sein kann.

[0086] Optional kann, wie in der Figur 12 in schematisch perspektivischer Darstellung gezeigt, ein variierender Öffnungswinkel α durch die Geometrie der Seitenflächen 131 auch so gewählt werden, dass der Abstand x_1, x_2 der benachbarten Windungen 110 sowohl im Bereich der oberen Längskante LK, innerhalb der Wertereihe x_{21} - x_{2n}, als auch im Bereich der unteren Längskante LK, innerhalb der Wertereihe x_{11} - x_{1n} variiert. Dies kann insbesondere durch einen unregelmäßigen, variierenden Verlauf der jeweiligen Längskante LK erreicht werden.

[0087] Die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen 131 kann aber auch so ausgebildet sein, dass der Abstand x zwischen den benachbarten Windungen 110 über die vollständige Höhe h der Spiralklinge 130 konstant ist und entlang der Messtrecke variiert. Eine derartige, vierte Ausführungsform der Erfindung ist schließlich der Figur 13 in schematisch perspektivischer Darstellung eines Windungsabschnitts 120 zu entnehmen. Diese Ausführung hat insbesondere den Vorteil, dass die Messhöhe für das optische Messverfahren auf beliebiger Höhe h der Spiralklinge 130 gewählt werden kann.

[0088] Die Figur 14 zeigt eine perspektivische Darstellung einer Spiralfeder 100 nach einer sechsten Ausführungsform der Erfindung. Wie anhand der rein der Veranschaulichung dienenden Markierungen auf den Windungen 110 dargestellt, befindet sich die Spiralfeder 100 in einer um die halbe Schwingungsweite ausgelenkten Stellung. Ein Ausschnitt eines Windungsabschnitts 120 sowie die darin erkennbare Seitenfläche 131 der Spiralklinge 130 ist in vergrößerter Darstellung veranschaulicht. Entlang des Spiralverlaufs entspricht die Länge der Seitenfläche 131 mindestens der Winkelverschiebung β (s. hierzu Figur 4) und in Richtung der Drehachse 220 vorzugsweise der Höhe h der Spiralklinge 130 und mindestens 50,0 μm.

[0089] In den Figuren 15 und 16 ist jeweils eine optische Darstellung der messtechnisch erfassten Oberflächenbeschaffenheit der vergrößert dargestellten Seitenfläche 131 der Spiralklinge 130 aus Figur 14 sowie das zugehörige Rauheits- (unten), Welligkeits- (mittig) und Primärprofil (oben) dargestellt. Der in der Figur 15 gezeigte und messtechnisch erfasste Ausschnitt der Seitenfläche 131 erstreckt sich 0,45 mm entlang des Windungsverlaufs. Das zugehörige Rauheitsprofil, zeigt den Verlauf der Rautiefe R_z als Abweichung 3. Ordnung vom Oberflächensollwert über die Messstrecke von 0,45 mm. Der Betrag der maximalen Änderung der Rautiefe R_z liegt hier bei 0,042 μm.

[0090] Gut zu erkennen ist ferner, dass die Intervalle im Rauheitsprofil, innerhalb derer Schwankungen der Rautiefe R_z zwischen positiven und negativen Werten auftreten, d. h. die Nulllinie durchlaufen wird, wesentlich kleiner als im Welligkeitsprofil sind. Anders ausgedrückt enthält das Rauheitsprofil über die gleiche Messstrecke von hier 0,45 mm eine vielfach höhere Anzahl an Schnittpunkten mit der Nulllinie als das Welligkeitsprofil. Das Welligkeitsprofil zeigt den Verlauf der Wellentiefe Wt als Abweichung 2. Ordnung vom Oberflächensollwert ebenfalls über die Messstrecke von 0,45 mm des Windungsverlaufs. Der Betrag der maximalen Änderung der Wellentiefe Wt liegt hier bei 0,046 μm.

[0091] Im Primärprofil ist eine Überlagerung des Welligkeitsprofils und des Rauheitsprofils wiederum über dieselbe Messstrecke von 0,45 mm aufgetragen. Leicht ersichtlich ist, dass der Verlauf des Rauheitsprofils den durch die Welligkeit bedingten Abweichungen 2. Ordnung folgt. Im Primärprofil und entlang der Oberfläche des tatsächlich vermessenen Werkstücks, im vorliegenden Fall also der Seitenfläche 131 der Spiralklinge 130, bildet der Verlauf des Welligkeitsprofils folglich die Nulllinie des Rauheitsprofils. Die Nulllinie des Welligkeitsprofil entspricht der tatsächlichen Oberfläche, also der gewünschten Form, und im vorliegenden Ausführungsbeispiel dem stetigen Krümmungsverlauf der Seitenfläche 131 der Spiralklinge 130.

[0092] Die dem in der Figur 15 gezeigten Welligkeitsprofil entsprechende Welligkeit einer oder beider der einander zugewandten Seitenflächen 131 der Spiralklinge 130 entlang einer mindestens der Winkelverschiebung β entsprechenden Messstrecke und entlang des Windungsverlaufs, bewirkt eine erfindungsgemäße Varianz des Abstands x, die als Referenz zur Erfassung der Winkelverschiebung β mittels optischer Messmittel und zur Bestimmung der Schwingungsweite und/oder -frequenz, geeignet ist.

[0093] Optional kann eine entsprechende Welligkeit auch entlang der Höhe h einer oder beider der einander zugewandten Seitenflächen 131 der Spiralklinge 130 ausgestaltet sein. Der in der Figur 16 gezeigte und messtechnisch erfasste Ausschnitt der Seitenfläche 131 erstreckt sich 0,3 mm entlang des Windungsverlaufs. Die Messstrecke verläuft diesmal entlang der Höhe h der Spiralklinge 130 und weist eine Länge von 0,1 mm auf. Das zugehörige Rauheit- und Welligkeitsprofil, zeigt den Verlauf der Rautiefe R_z als Abweichung 3. Ordnung bzw. den Verlauf der Welligkeit Wt als Abweichung 2. Ordnung vom Oberflächensollwert über die entlang der Höhe h verlaufende Messstrecke von 0,1 mm. Die Nulllinie des Rauheits-, Welligkeits- und des Primärprofils entspricht in diesem Fall folglich der Höhe eines Querschnitts der

Spiralklinge (s. z. B. Figur 3). Der Betrag der maximalen Änderung der Rautiefe R_z liegt hier bei 0,054 μm, der Betrag der maximalen Änderung der Wellentiefe Wt bei 0,013 μm. Die in der Oberfläche des Ausschnitts der Spiralklinge 130 sichtbaren, kraterartigen Vertiefungen sind Bestandteil des Rauheitsprofils.

Bezugszeichenliste

[0094]

100	Spiralfeder
110	Windung
120	Windungsabschnitt
130	Spiralklinge
131	Seitenfläche der Spiralklinge
140	inneres Windungsende
150	äußeres Windungsende
160	optisches Messmittel
200	Schwingsystem
210	Schwingkörper
220	Drehachse
230	inneres Federbefestigungsmittel
240	äußeres Federhalteelement
b	Breite der Spiralklinge
h	Höhe der Spiralklinge
x	Abstand zwischen benachbarten Windungen
UP	Umkehrpunkt
WA	schwingungsbedingter Windungsabstand
Wt	Wellentiefe
R_z	Rautiefe
0	spannungsfreie Mittellage
α	Öffnungswinkel
β	Winkelverschiebung

Patentansprüche

1. Optisches Messverfahren zur Bestimmung der Schwingungsweite (SW) einer Spiralfeder (100) mit mehreren Windungen (110), die sich entlang jeweiliger Kreisbahnen einem spiralförmigen, insbesondere archimedischen und/oder logarithmischen Verlauf folgend erstrecken, wobei

- während der Schwingungsbewegung der Spiralfeder (100), in mindestens einem Windungsabschnitt (120) eine Auslenkung benachbarter Windungen (110) zueinander und entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen, anhand einer Varianz des Abstands (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) entlang des Windungsabschnitts (120) optisch erfasst wird,
- anhand der maximalen Auslenkung eine entsprechende Winkelverschiebung (β) der benachbarten Windungen (110) zueinander bestimmt wird, und
- auf Basis der Winkelverschiebung (β) die Schwingungsweite und/oder - frequenz der Spiralfeder (100) rechnerisch ermittelt wird.

2. Messverfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
für die optische Erfassung der Auslenkung benachbarter Windungen (110) zueinander mindestens ein Windungsabschnitt (120) festgelegt wird, innerhalb dessen die Varianz des Abstands (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) zumindest entlang einer der Winkelverschiebung (ß) entsprechenden Messstrecke mindestens 0,02%, vorzugsweise 0,04% und besonders bevorzugt 0,05 % beträgt.

3. Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Abstand (x), als radialer Abstand (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) entlang eines Radius der Spiralfeder (100) ausgehend von einer Seitenfläche (131) einer der Windungen (110) hin zu der gegenüberliegenden Seitenfläche (131) der anderen Windung (110) definiert wird.

4. Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Varianz des Abstands (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) entlang des Windungsabschnitts (120) auf einer oder mehreren in Bezug auf die Höhe (h) der Spiralfeder (100) definierten Messhöhen erfasst wird, und die Messhöhen auf Basis der Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) festgelegt werden.

5. Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Schwingungsfrequenz anhand der Schwingungsdauer der Spiralfeder (100) ermittelt wird, wobei eine einmalige Auslenkung benachbarter Windungen (110) zueinander um die Winkelabweichung (β) einer Halbschwingung der Spiralfeder (100) entspricht.

6. Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
anhand der ermittelten Schwingungsweite und/oder -frequenz ein Soll-/Ist-Wert-Vergleich, insbesondere zur Bestimmung der Gangabweichung des Uhrwerks durchgeführt wird, wobei die ermittelte Schwingungsweite und/oder -frequenz dem Ist-Wert

entspricht und dieser mit einem entsprechenden, zuvor festgelegten Soll-Wert verglichen wird.

7. Spiralfeder (100), geeignet zur Verwendung in einem optischen Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit mehreren Windungen (110), die sich entlang jeweiliger Kreisbahnen einen spiralförmigen, insbesondere archimedischen und/oder logarithmischen Verlauf bildend erstrecken, welche Spiralfeder (100), insbesondere zur Taktgebung eines mechanischen Uhrwerks, zu einer Schwingungsbewegung anregbar ist, wobei benachbarte Windungen (110) entlang ihrer jeweiligen Kreisbahnen um eine Winkelverschiebung (ß) zueinander ausgelenkt werden,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Abstand (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) zumindest entlang einer der Winkelverschiebung (β) entsprechenden Messstrecke variiert.

8. Spiralfeder (100) nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass
der variierende Abstand (x) durch die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) der benachbarten Windungen (110) der Spiralfeder (100) bewirkt wird und der Abstand sowohl entlang der Messstrecke als auch entlang der Höhe (h) der einander zugewandten Seitenflächen (131) der Spiralfeder (130) variiert.

9. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 7 oder 8,
dadurch gekennzeichnet, dass
der variierende Abstand (x) durch die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) der benachbarten Windungen (110) der Spiralfeder (100) bewirkt wird, wobei die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) derart ausgebildet ist, dass der Abstand (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) über die vollständige Höhe (h) der einander zugewandten Seitenflächen (131) konstant ist und entlang der Messstrecke variiert.

10. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 7 bis 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Varianz des Abstands (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) entlang der Messstrecke mindestens 0,02%, vorzugsweise mindestens 0,05% und höchstens 1,5% beträgt und/oder entlang der Höhe (h) mindestens 0,01% und höchstens 2,0% beträgt.

11. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 7 bis 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Abstand (x) entlang der Messstrecke kontinuierlich oder stetig variiert.

12. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 7 bis 11,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Oberflächenbeschaffenheit einer oder beider der einander zugewandten Seitenflächen (131) mit einer die Varianz des Abstands (x) entlang der Messstrecke und/oder entlang der Höhe (h) bewirkenden Welligkeit ausgestaltet ist.

13. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 7 bis 12
dadurch gekennzeichnet, dass
die Rautiefe R_z der einander zugewandten Seitenflächen (131) höchstens 0,5 μm beträgt.

14. Spiralfeder (100) nach Anspruch 12 oder 13,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Welligkeit einer nach DIN 4760:1982-06 definierten Gestaltabweichung 2. Ordnung entspricht und/oder die Rautiefe R_z einer nach DIN 4760:1982-06 definierten Gestaltabweichung 3. oder 4. Ordnung entspricht.

15. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 7 bis 14,
dadurch gekennzeichnet, dass
der variierende Abstand (x) durch die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) der benachbarten Windungen (110) der Spiralfeder (100) bewirkt wird, wobei die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) derart ausgebildet ist, dass der Abstand (x) zwischen den Windungen (110) entweder über die vollständige Höhe (h) der einander zugewandten Seitenflächen (131) oder lediglich auf einer bestimmten Höhe (h) oder einem bestimmten Höhenbereichen entlang der Messstrecke variiert.

16. Spiralfeder (100) nach Anspruch 15,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Abstand (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) im Bereich der unteren Längskante (LK) der einander zugewandten Seitenflächen (131) von dem Abstand (x) zwischen den benachbarten Windungen (110) im Bereich der oberen Längskante (LK) der einander zugewandten Seitenflächen (131) abweicht, wobei der Abstand (x) im Bereich der oberen Längskante (LK) und/oder im Bereich der unteren Längskante (LK) entlang der Messstrecke variiert.

17. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 15 bis 16,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) einem über die Höhe (h) einer oder beider Seitenflächen (131) konkaven und/oder konvexen Verlauf folgend ausgebildet ist, wobei der konkave und/oder konvexe Verlauf entlang der Messstrecke

variieren.

18. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 15 bis 17,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) einen dazwischenliegenden Öffnungswinkel (α) einschließend ausgebildet ist, wobei der Öffnungswinkel (α) entlang der Messstrecke variiert.

19. Spiralfeder (100) nach einem der Ansprüche 15 bis 18,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Geometrie der einander zugewandten Seitenflächen (131) der Windungen (110) im Bereich der oberen und/oder unteren Längskante (LK) derart ausgebildet ist, dass die Längskanten (LK) zumindest entlang der Messstrecke einen unregelmäßigen Verlauf aufweisen.

Fig. 1

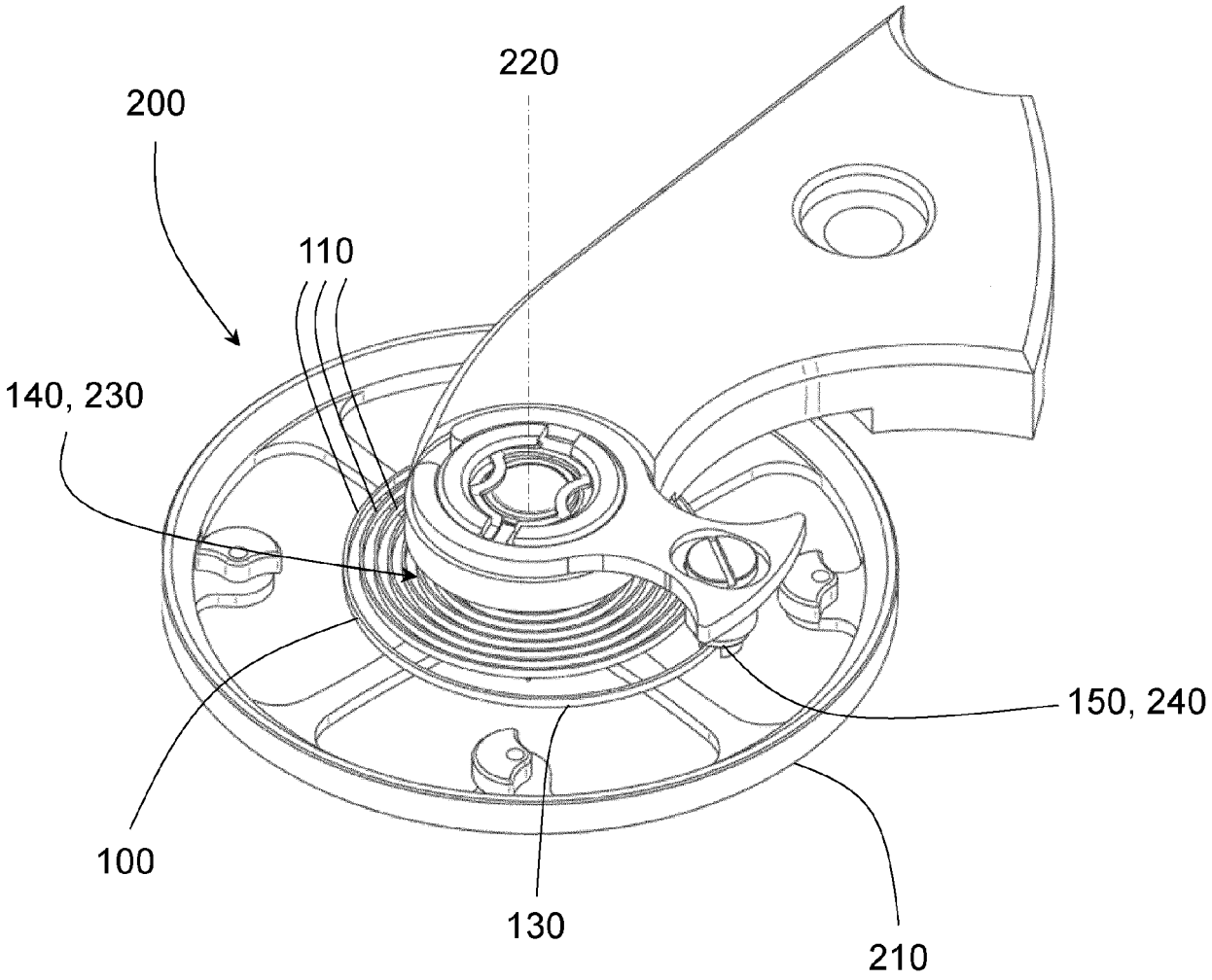


Fig. 2

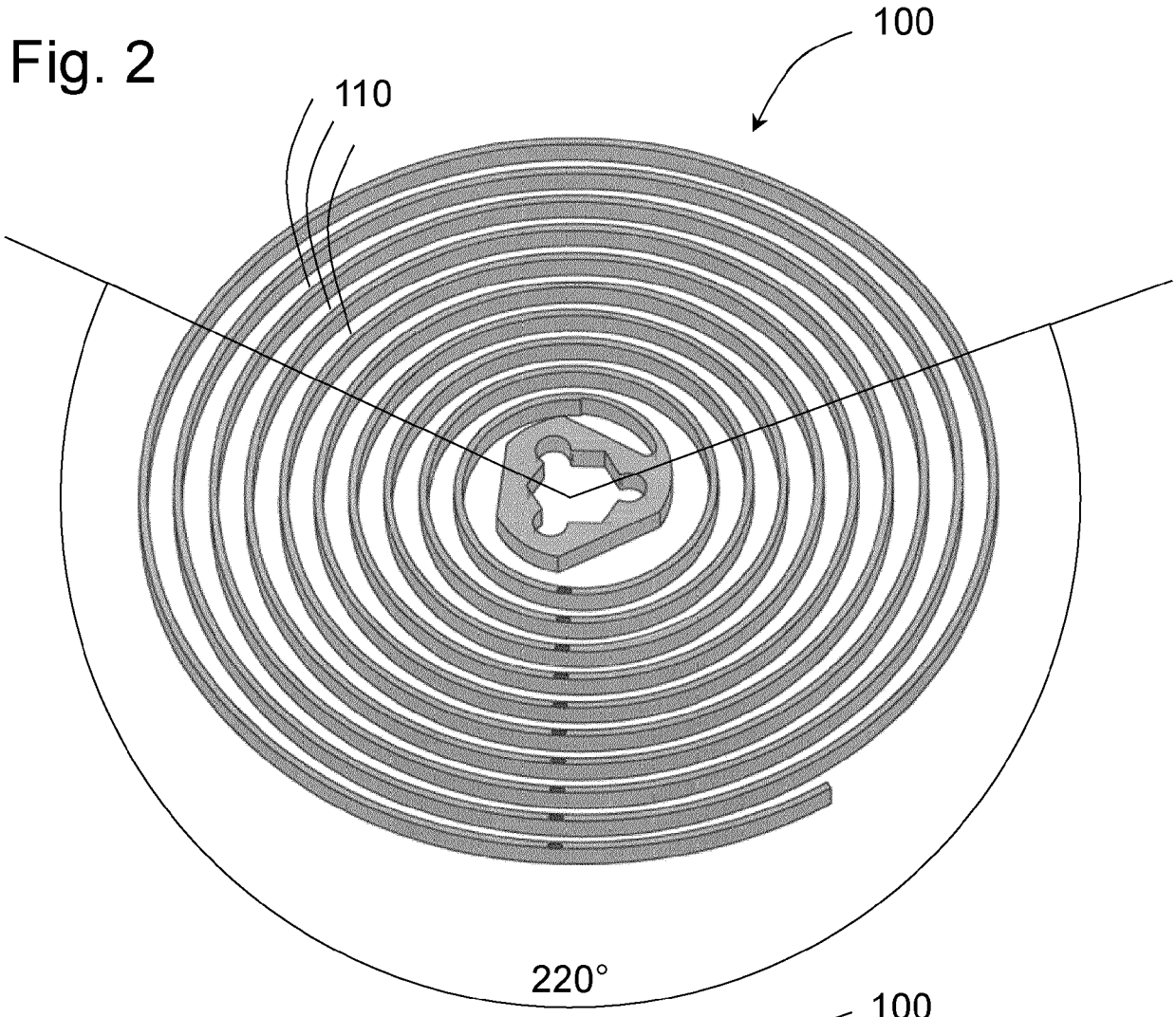


Fig. 3

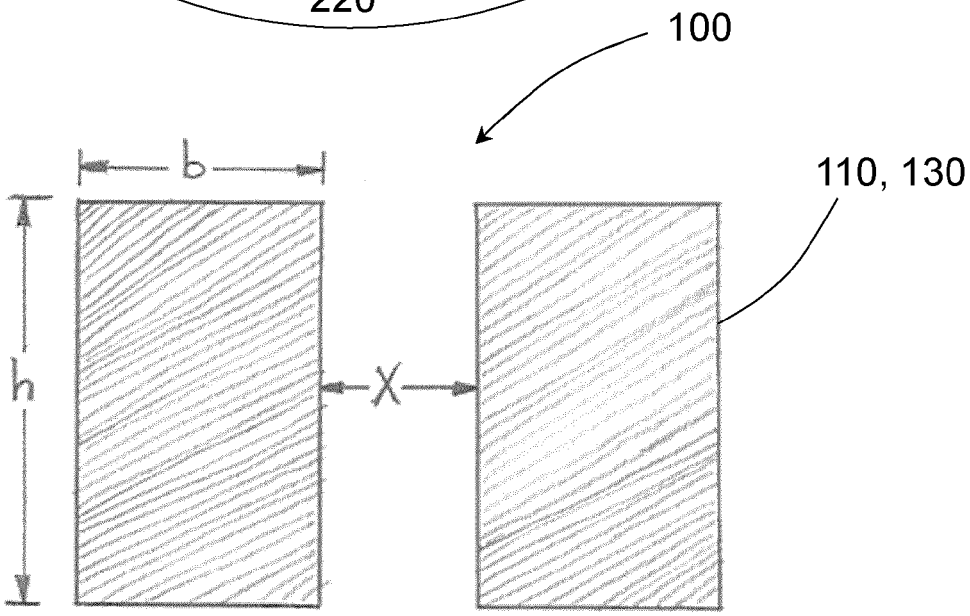


Fig. 4

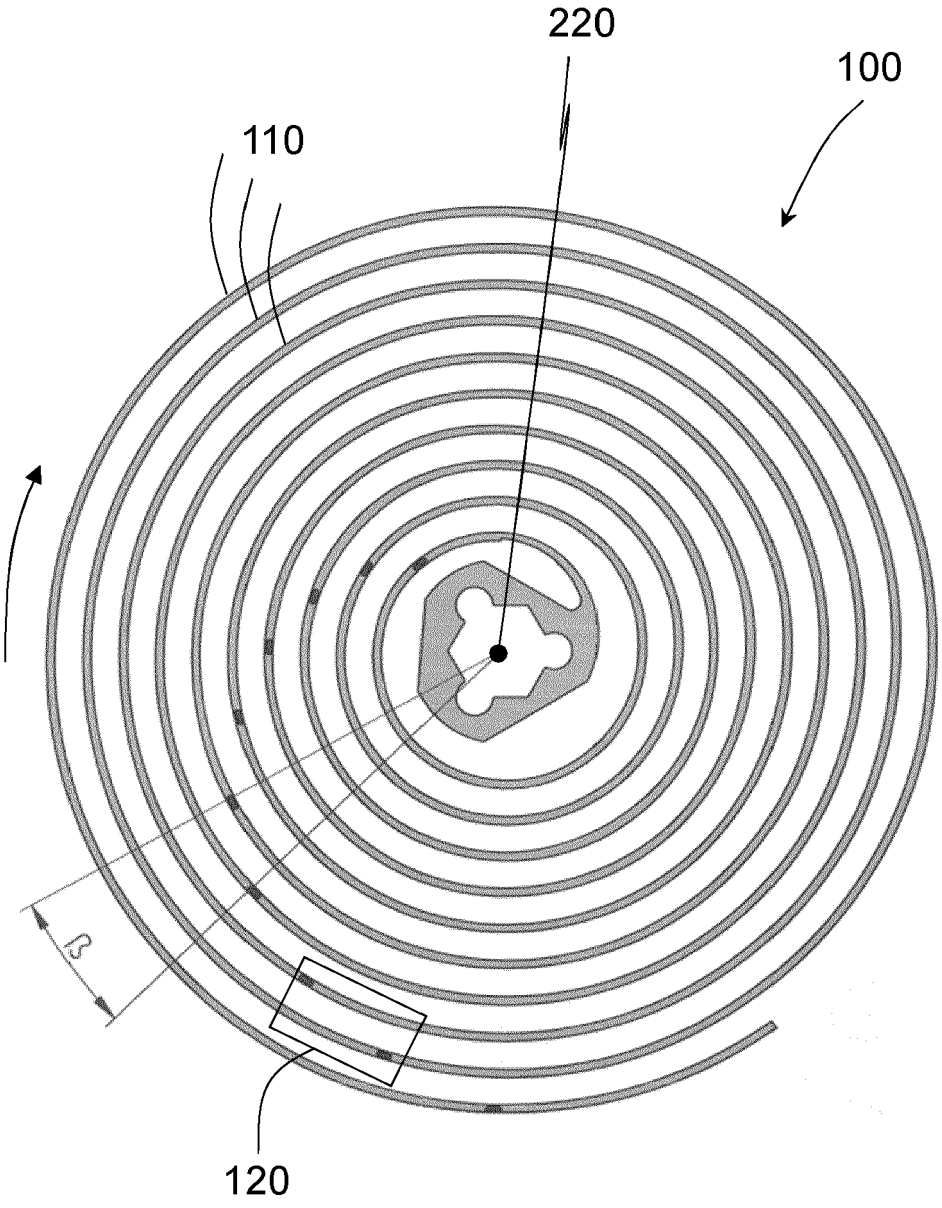


Fig. 5

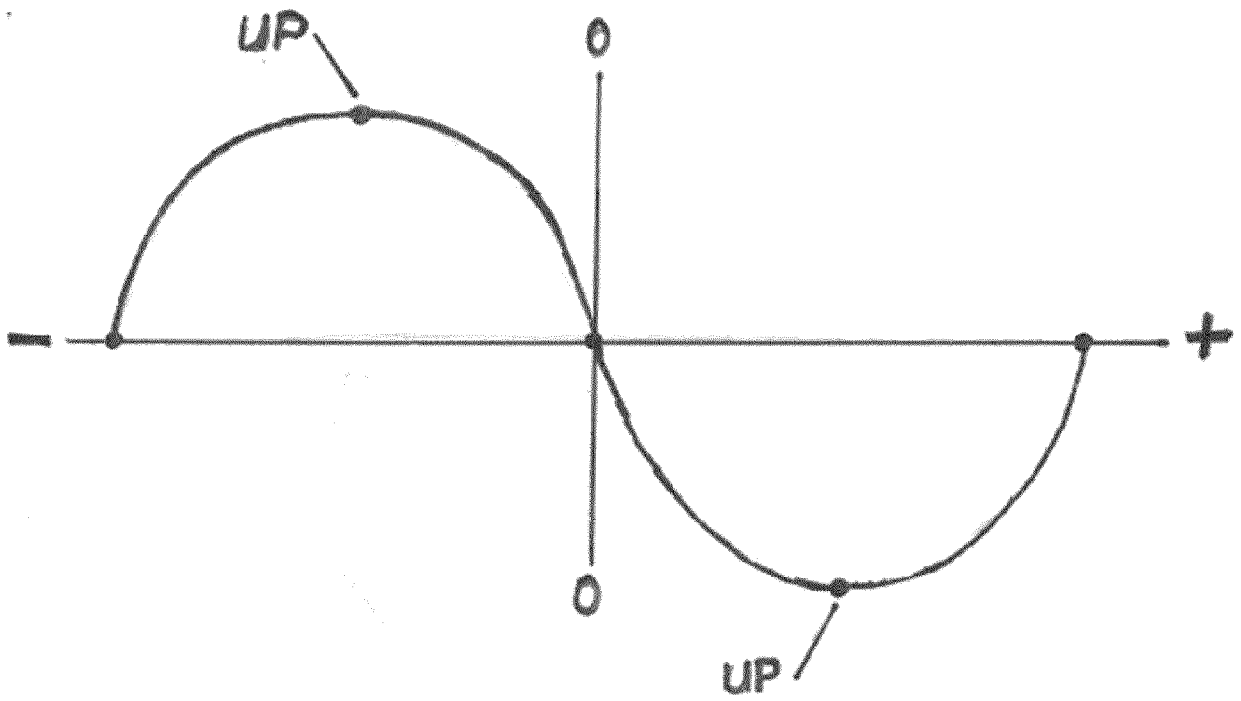


Fig. 6

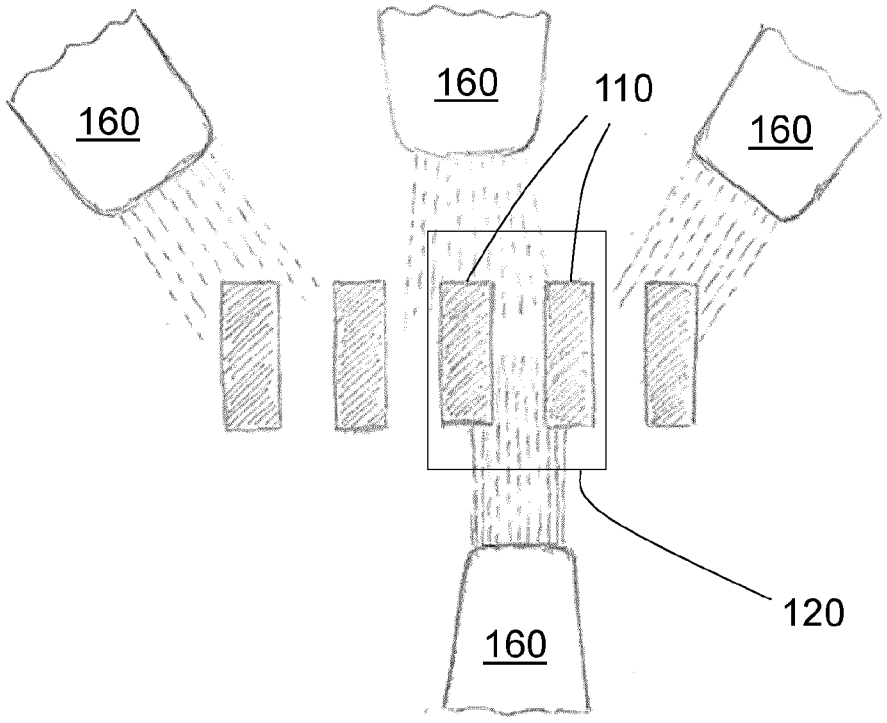


Fig. 7

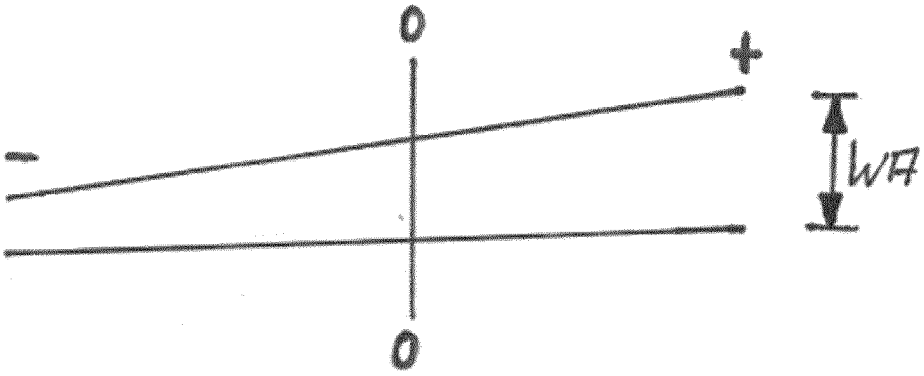


Fig. 8

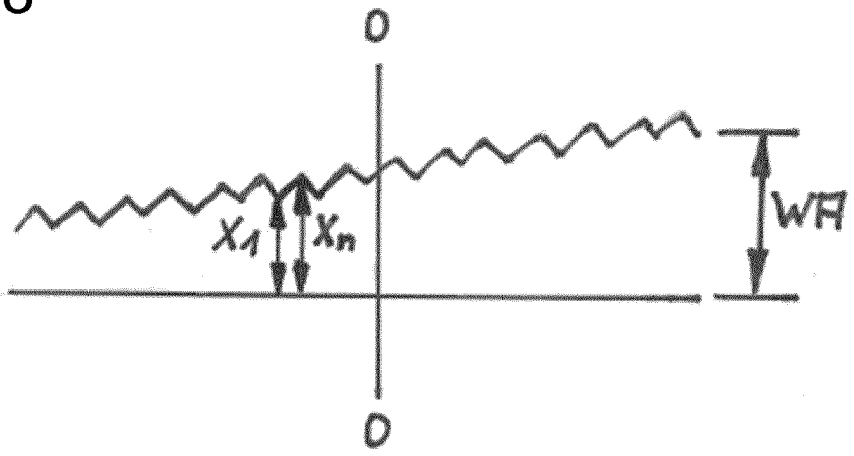


Fig. 9

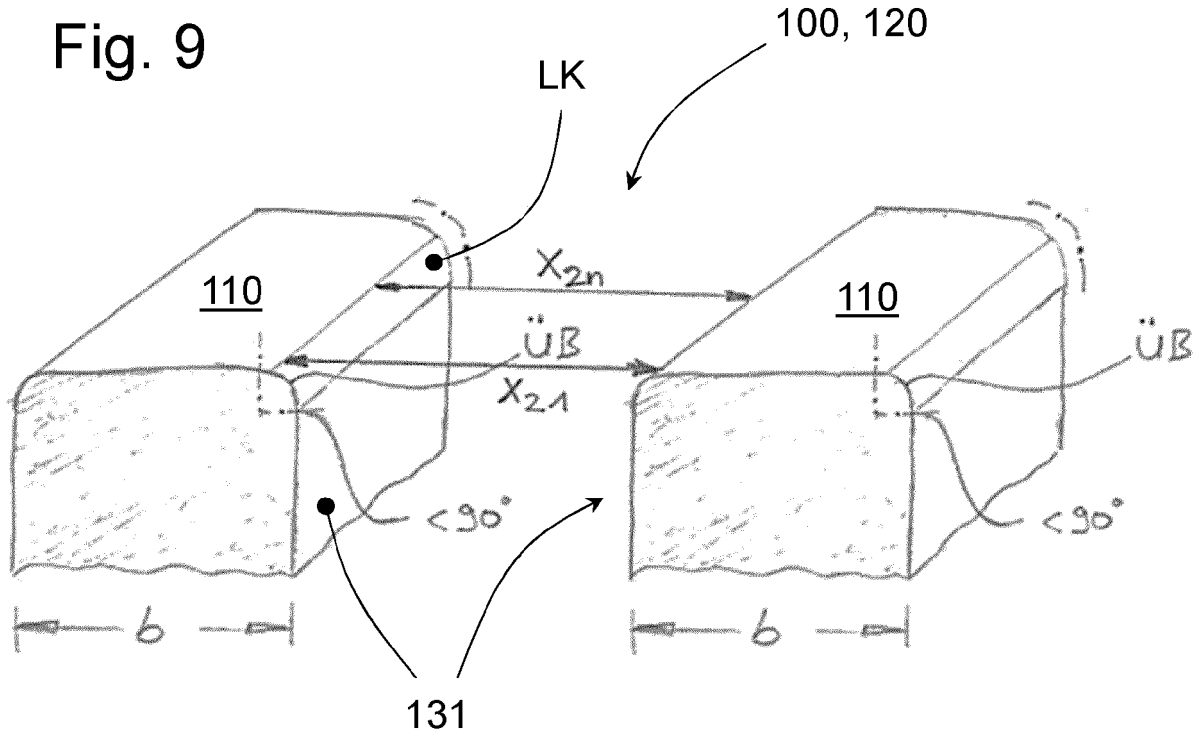


Fig. 10

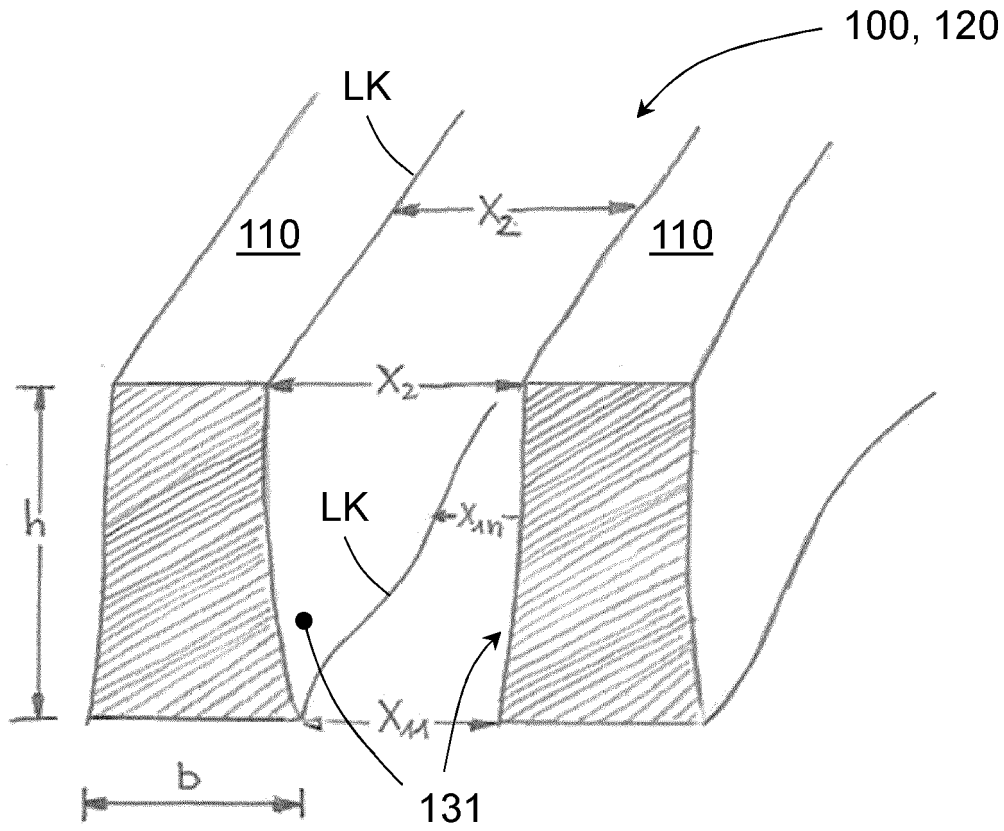

100, 120
LK
110
X_2
110
X_2
h
LK
X_{1n}
X_{11}
b
131

Fig. 11

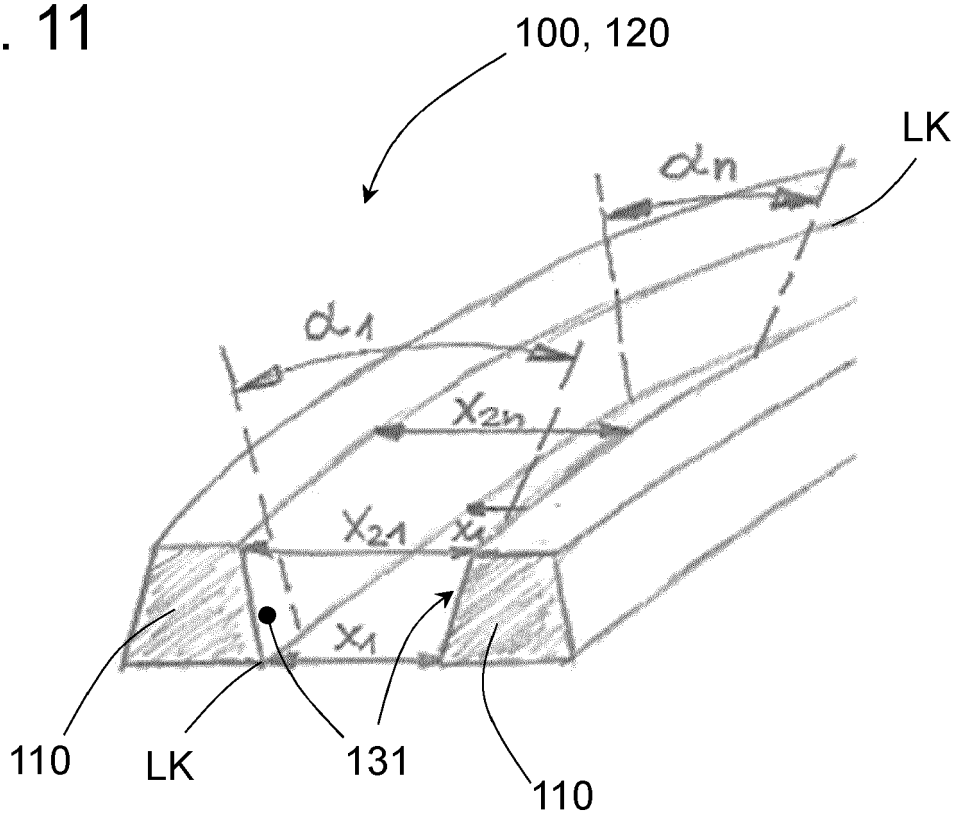

100, 120
LK
d_n
d_1
X_{2n}
X_{21}
X_{11}
X_1
110
LK
131
110

Fig. 12

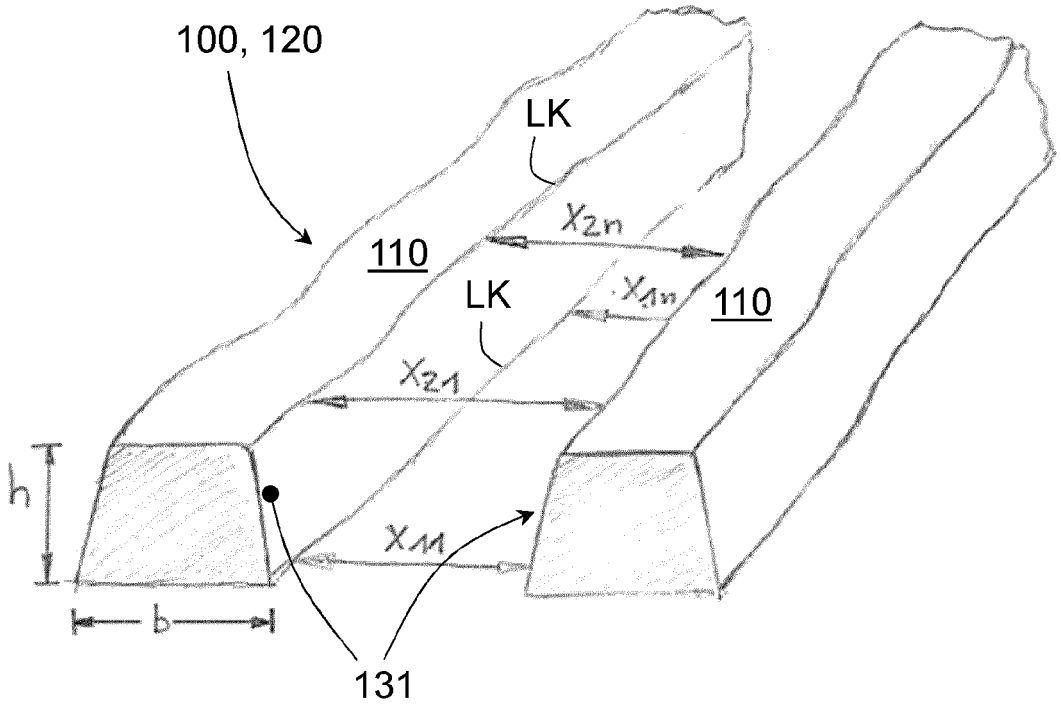

100, 120
LK
x_{2n}
110
LK
x_{1n}
110
x_{21}
h
x_{11}
b
131

Fig. 13

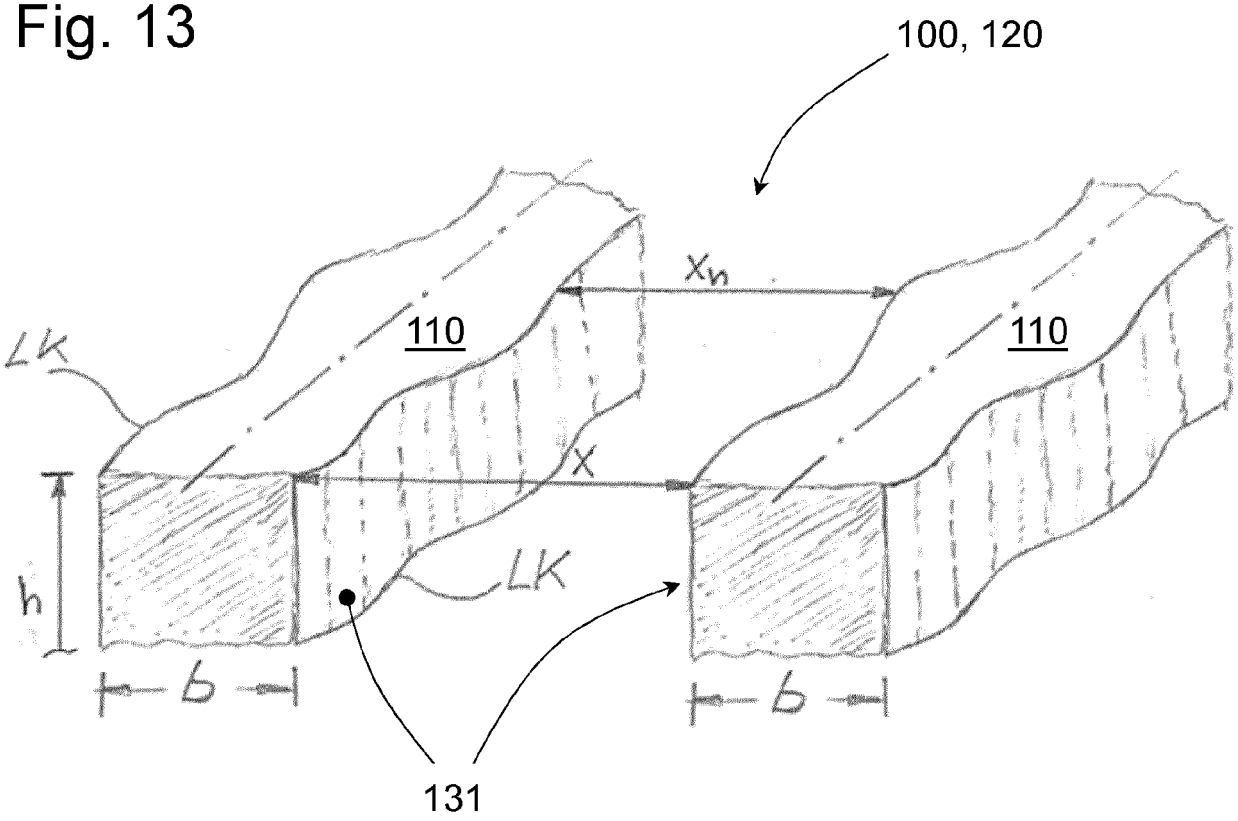
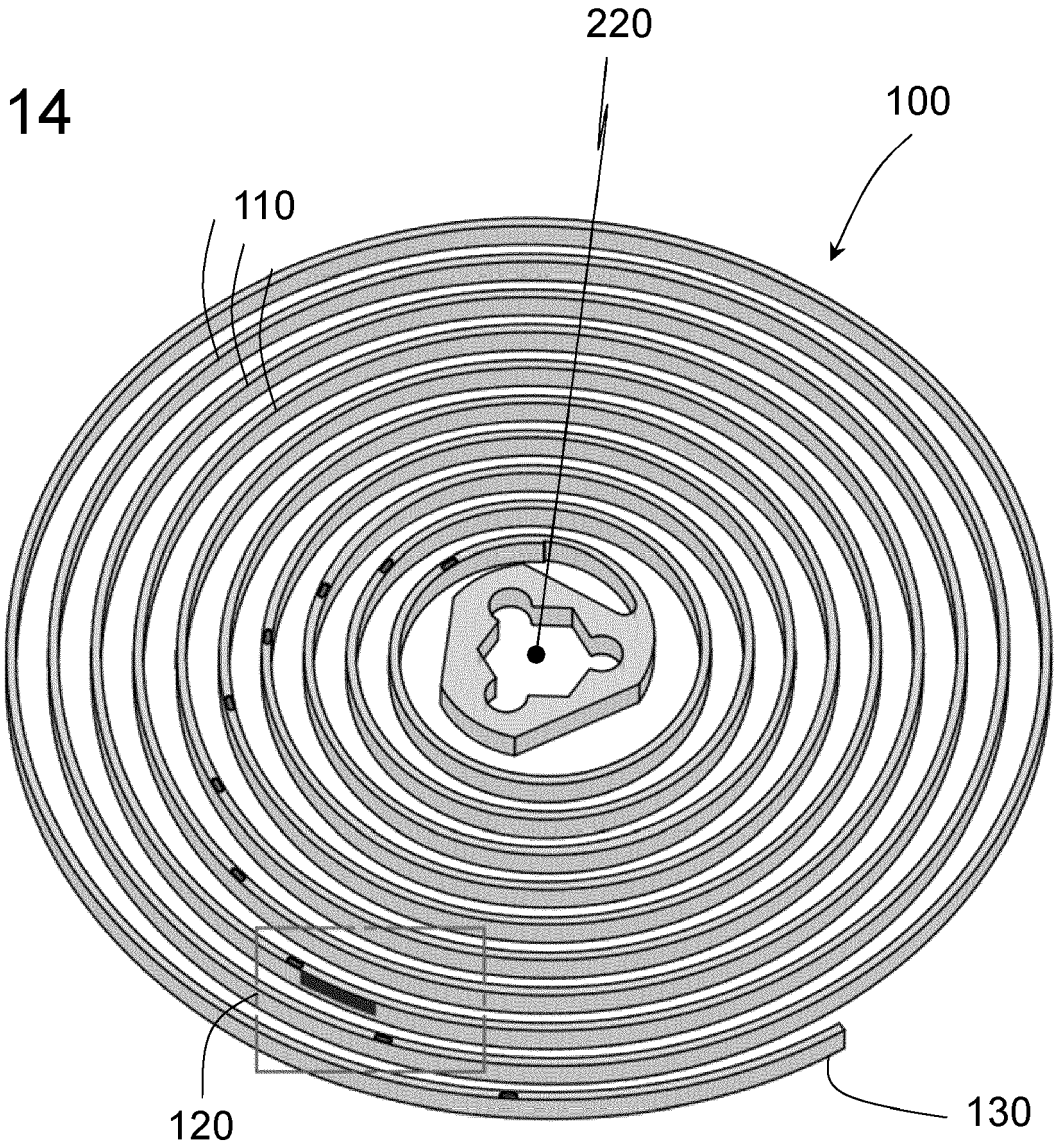

100, 120
x_n
110
110
LK
x
LK
h
b
b
131

Fig. 14



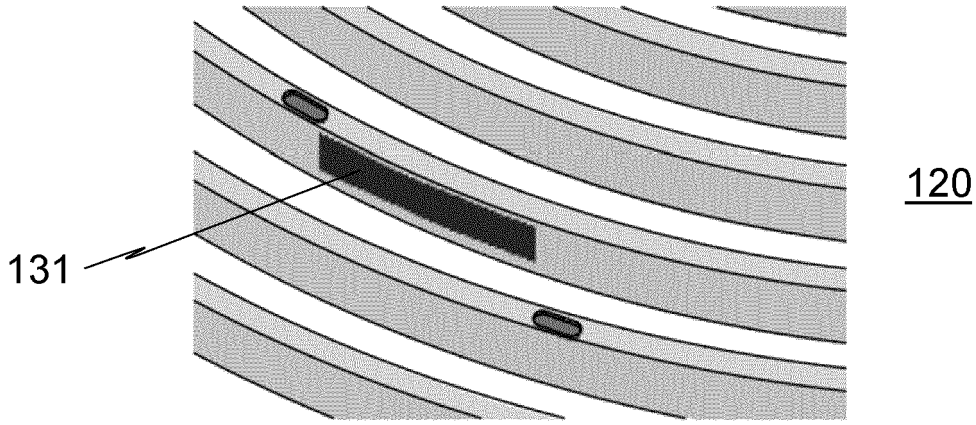


Fig. 15

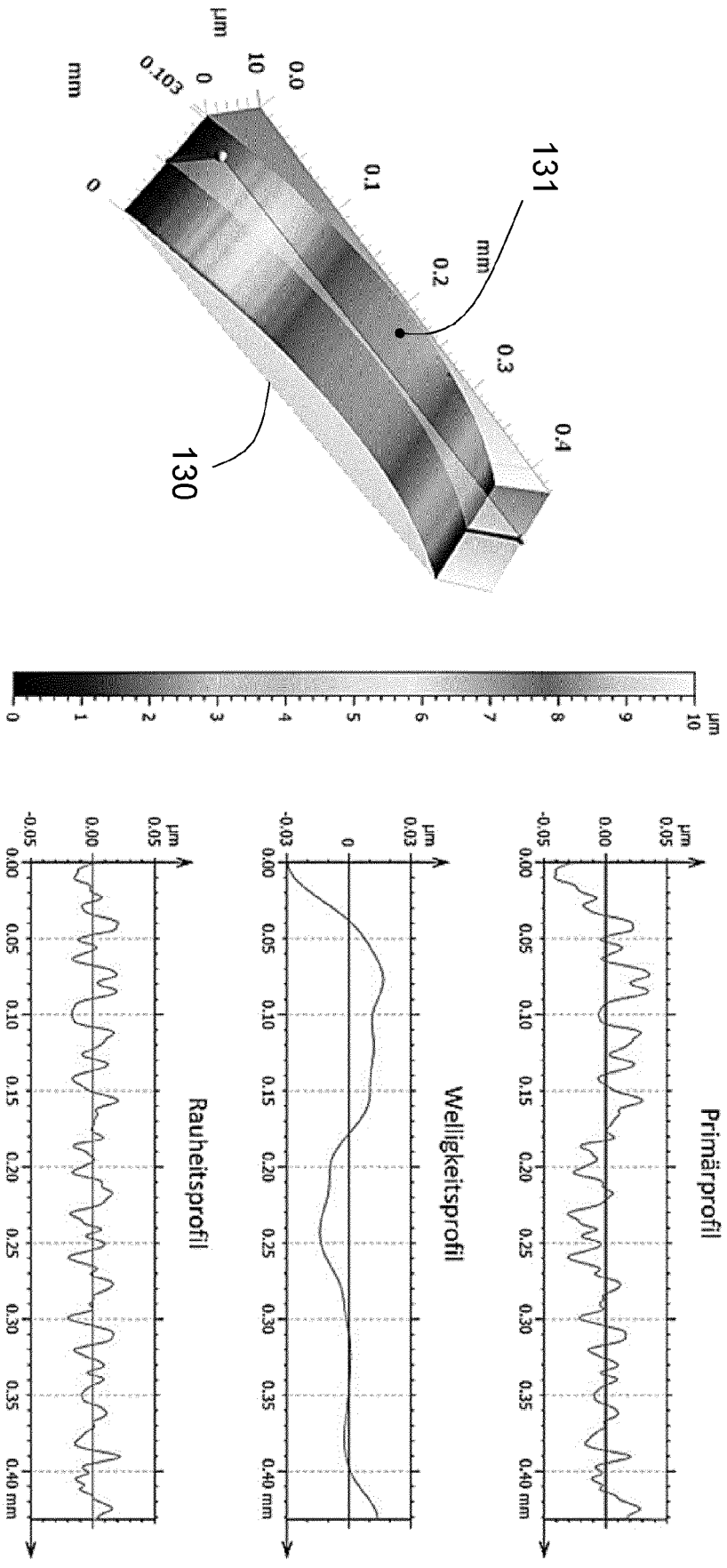
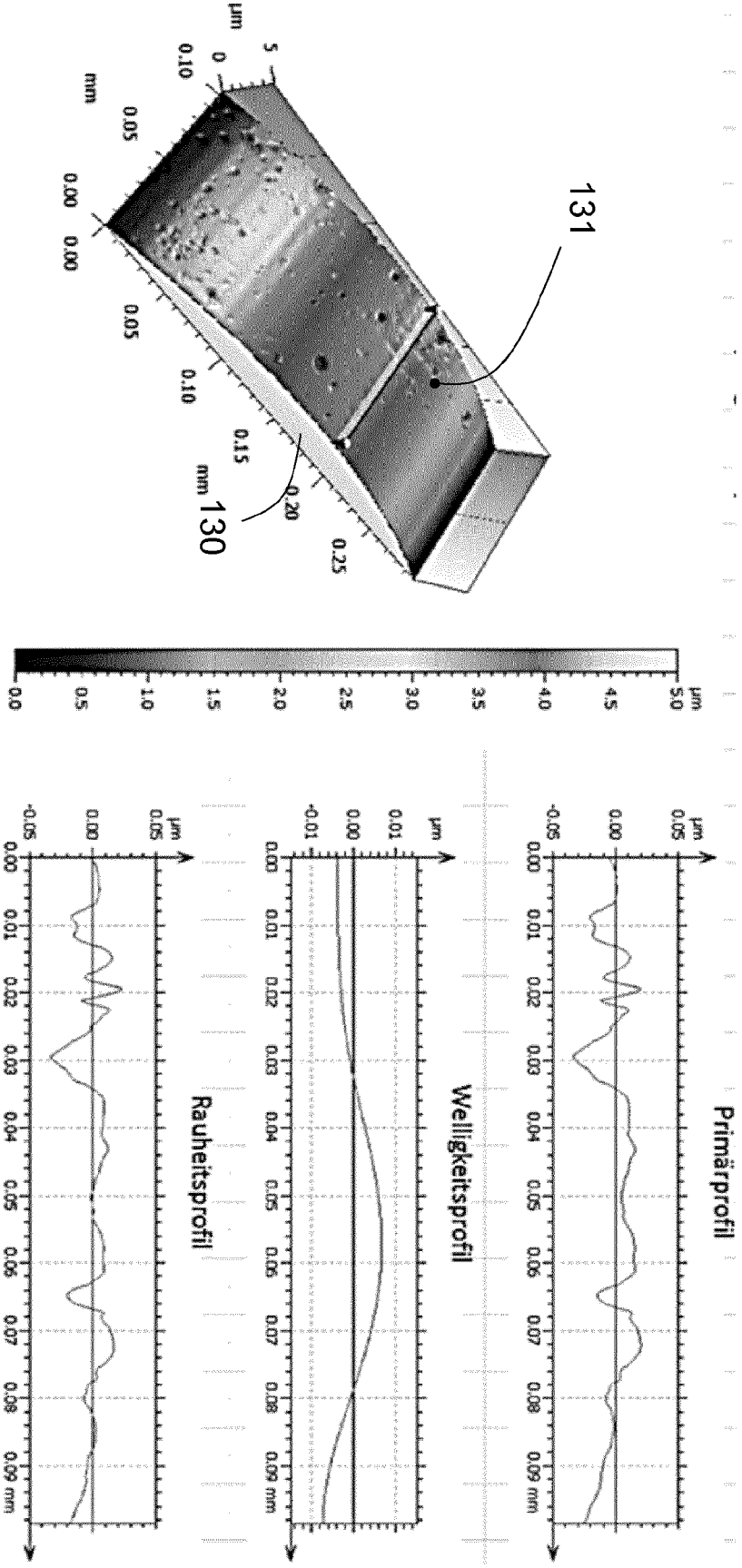


Fig. 16



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 23 21 3905

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	EP 4 030 243 A1 (RICHEMONT INT SA [CH]) 20. Juli 2022 (2022-07-20) * Absatz [0083] *	1-19	INV. G04B17/06 G04D7/00 G04D7/10 G04D7/12
X Y A	EP 3 159 747 A1 (ETA SA MFT HORLOGERE SUISSE [CH]) 26. April 2017 (2017-04-26) * Abbildungen 1-3, 6 *	7,9,11 8,15,16 1-6,10, 12-14, 17-19	
Y	EP 3 452 874 B1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 10. Juni 2020 (2020-06-10) * Abbildung 2 *	8,15,16	
X A	CH 713 269 B1 (NIVAROX SA [CH]) 15. September 2020 (2020-09-15) * Abbildung 4 *	7,12 1-6, 8-11, 13-19	
A	EP 2 685 325 B1 (DIAMAZE MICROTECHNOLOGY SA [CH]; GFD GES FÜR DIAMANTPRODUKTE MBH [DE]) 6. April 2016 (2016-04-06) * Absatz [0023] *	13	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) G04B G04D

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
Den Haag	13. Mai 2024	Scordel, Maxime

KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE

X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie
A : technologischer Hintergrund
O : nichtschriftliche Offenbarung
P : Zwischenliteratur

T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze
E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
D : in der Anmeldung angeführtes Dokument
L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument

& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR. EP 23 21 3905

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

13-05-2024

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 4030243 A1	20-07-2022	CN 116783558 A	19-09-2023
		EP 4030243 A1	20-07-2022
		EP 4278234 A1	22-11-2023
		JP 2024507061 A	16-02-2024
		US 2024069496 A1	29-02-2024
		WO 2022152857 A1	21-07-2022
EP 3159747 A1	26-04-2017	CN 106990699 A	28-07-2017
		EP 3159747 A1	26-04-2017
		EP 3159750 A1	26-04-2017
		JP 6293843 B2	14-03-2018
		JP 2017083438 A	18-05-2017
		RU 2016141486 A	23-04-2018
		TW 201727404 A	01-08-2017
		US 2017115630 A1	27-04-2017
EP 3452874 B1	10-06-2020	EP 3452874 A1	13-03-2019
		WO 2017191533 A1	09-11-2017
CH 713269 B1	15-09-2020	KEINE	
EP 2685325 B1	06-04-2016	KEINE	

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 3452874 B1 **[0005]**
- WO 2014203085 A1 **[0006]**
- EP 2407831 B1 **[0008]**
- EP 2887152 B1 **[0008] [0009]**
- WO 2015087252 A1 **[0013]**
- CH 713269 B1 **[0014]**