



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 130 144.0**
(22) Anmeldetag: **18.11.2021**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **12.01.2023**

(51) Int Cl.: **G01G 7/02 (2006.01)**
G01G 21/28 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Bundesrepublik Deutschland (Physikalisch-
Technische Bundesanstalt), 38116 Braunschweig,
DE**

(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte
PartGmbH, 38122 Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:
Rothleitner, Christian, Dr., 38176 Wendeburg, DE

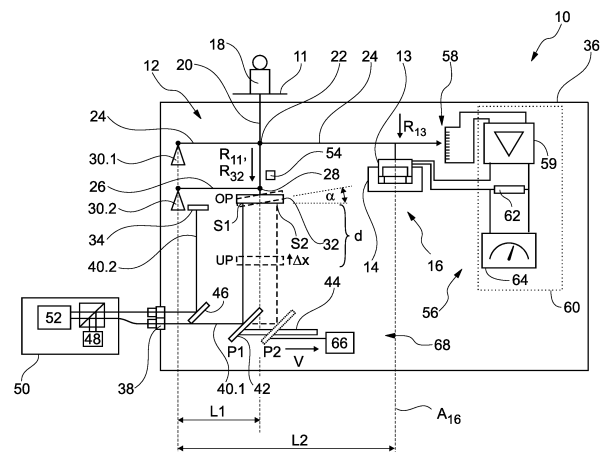
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2016 106 695 A1
EP 3 591 352 A1

**VASILYAN: The progress in development of
the Planck-Balance 2 (PB2): A tabletop Kibble
balance for the mass calibration of E2 class
weights. tm – Technisches Messen 2021; 88(12):
S. 731–756, veröffentlicht am 09. November 2021
(Published Online).**

(54) Bezeichnung: **Kibble-Waage und Verfahren zum Kalibrieren einer Kibble-Waage**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Waage (10) mit (a) einer Waagschale (11), (b) einer Parallelführung (12), die einen Hebel (24) aufweist, wobei auf den Hebel (24) eine Gewichtskraft des Prüflings (18) wirkt, wobei der Hebel (24) in zumindest einem Biegelager gelagert ist, und wobei die Waagschale (11) mittels der Parallelführung (12) in eine Waagschalenbewegungsrichtung (R_{11}) bewegbar ist, und (c) einer Tauchspule (16), die einen ortsfesten Fest-Magneten (14), und einen beweglichen Tauch-Magneten (13), insbesondere eine Tauch-Magnetspule, aufweist, zum Kompensieren der Gewichtskraft (F_g) des Prüflings (18). Erfindungsgemäß vorgesehen ist (d) ein Messspiegel (32), der bewegungsstarr relativ zur Waagschale (11) befestigt ist und angeordnet ist zum Bewegen entlang einer Messspiegel-Bewegungsrichtung (R_{32}), (e) eine Laserstrahlungsquelle (38) zum Abgeben eines Laserstrahls (40) und (f) ein Referenzspiegel (34), der relativ zum Auflager (30) ortsfest befestigt ist, wobei (g) der Messspiegel (32) und der Referenzspiegel (34) zum interferometrischen Messen einer Messspiegelgeschwindigkeit (v) des Messspiegels (32) angeordnet sind.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Waage gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

[0002] Waagen sind in Form von Wägezellen mit elektromagnetischer Kraftkompensation (EMK) bekannt. Der Vorteil an Wägezellen ist, dass sie mit vergleichsweise kleinen Magneten auskommen. Bei diesen Waagen wird die Kraft, die von der Tauchspule kompensiert werden muss, dadurch verringert, dass die Gewichtskraft des Prüflings über den Hebel auf eine Tauschspule geleitet wird.

[0003] Kibble-Waagen werden verwendet, um die Einheit der Masse im Internationalen Einheitensystem (SI), das Kilogramm, darzustellen. Durch sie wird die Masse eines Gewichtsstücks ohne Zuhilfenahme einer Referenzmasse bestimmt. Diese Messung stellt eine Absolutmessung dar, welche höhere Anforderungen an die Auflösung und Genauigkeit der Messparameter stellt.

[0004] Bekannte Kibble-Waagen besitzen keinen Hebel. Die Verwendung von Kibble-Waagen ermöglicht dadurch zwar eine geringere Messunsicherheit, sie haben aber den Nachteil, dass die Tauchspule im Vergleich zu einer Wägezelle gleichen Messbereichs deutlich größer ausgebildet sein muss. Das ist für die praktische Anwendung nachteilig.

[0005] Aus dem Artikel „The progress in development of the Planck-Balance 2“ (PB2): A tabletop Kibble balance for the mass calibration of E2 dass weights von Suren Vasilyan et al, Technisches Messen 2021; 88(12): 731-756, <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0101>, ist eine gattungsgemäße Kibble-Waage bekannt.

[0006] Die EP 3 591 352 A1 beschreibt eine Kibble-Waage, die in einem statischen Betriebsmodus und einem dynamischen Betriebsmodus betreibbar ist. Im dynamischen Betriebsmodus wird eine Spannung gemessen, die an einem Widerstandselement abfällt. Dieses Widerstandselement ist aus zwei Teilwiderstandselementen aufgebaut, die in zwei unterschiedliche Schalteranordnungen mit unterschiedlichen Gesamtverhältnissen geschaltet werden kann. Auf diese Weise kann die Kibble-Waage in mehreren Messbereichen betrieben werden.

[0007] Die DE 10 2016 106 695 A1 beschreibt eine Kibble-Waage, bei der die Wägebalken selbst als Parallelenker wirken.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messunsicherheit bei Kibble-Waagen zu vermindern.

[0009] Die Erfindung löst das Problem durch eine Waage mit den Merkmalen von Anspruch 1.

[0010] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Kalibrieren einer solchen Waage mit den Merkmalen von Anspruch 7.

[0011] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass mit einer solchen Waage eine deutlich geringere Messunsicherheit erreichbar ist, ohne dass dazu eine große Tauchspule verwendet werden muss.

[0012] Dass das Prinzip der Wägezelle mit dem Prinzip einer Kibble-Waage kombinierbar ist, wurde bislang für nicht sinnvoll möglich gehalten. Der Grund dafür ist, dass die Messunsicherheit, die durch die Hebelübersetzung in der Parallelführung verursacht wird, nicht messbar und nicht kompensierbar war.

[0013] Das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren zum Kalibrieren der Waage erlaubt es, den Tauchspulenparameter so zu bestimmen, dass die durch die Hebelübersetzung verursachte Messunsicherheit kompensiert wird. Es ist daher möglich, die erfindungsgemäße Waage zu kalibrieren, ohne auf bereits kalibrierte Massenstücke zurückgreifen zu müssen. Das erlaubt den Einsatz der Waage zur Darstellung der SI-Einheit Kilogramm. Häufig wird zudem eine geringere Messunsicherheit erreicht.

[0014] Vorteilhaft ist zudem, dass der Gewinn an verminderter Messunsicherheit in der Regel mit einem vergleichsweise geringen zusätzlichen apparativen Aufwand einhergeht.

[0015] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einer Waage insbesondere eine Vorrichtung verstanden, mittels der die Masse eines Prüflings mit einer relativen Messunsicherheit von höchstens 10^{-5} , insbesondere höchstens 10^{-6} , vorzugsweise höchstens 10^{-7} , bevorzugt höchstens 10^{-8} , bei einer Prüflingsmasse von 0,1 kg messbar ist.

[0016] Unter der Waagschale wird insbesondere ein Bestandteil der Waage verstanden, der zum Aufnehmen des Prüflings ausgebildet ist. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass die Waagschale schalenförmig ausgebildet ist. Insbesondere kann die Waagschale eine ebene Oberfläche zum Auflegen des Prüflings haben.

[0017] Unter der Parallelführung wird insbesondere eine mechanische Parallelführung verstanden, die so ausgebildet ist, dass die Waagschalenbewegungsrichtung parallel zu einer Tauchspulenbewegungsrichtung verläuft, mit der der bewegliche

Tauch-Magnet, insbesondere die Tauch-Magnet-spule, sich bewegt.

[0018] Die Tauchspule weist in der Regel einen Elektromagneten und einen Permanentmagneten auf. Häufig ist der Fest-Magnet ein Permanentmagnet und der Tauch-Magnet eine Spule, also ein Elektromagnet, das ist aber nicht notwendig. Es ist auch möglich, dass der Fest-Magnet ein Elektromagnet ist und der Tauch-Magnet ein Permanentmagnet. Zudem ist es möglich, dass sowohl der Fest-Magnet als auch der Tauch-Magnet Elektromagnete sind.

[0019] Unter dem Merkmal, dass der Messspiegel bewegungsstarr relativ zur Waagschale befestigt ist, wird insbesondere verstanden, dass, wenn sich die Waagschale um einen vorgegebenen Weg bewegt, sich der Messspiegel stets um den gleichen Weg bewegt.

[0020] Vorzugsweise verläuft eine reflektierende Oberfläche des Messspiegels zumindest im Wesentlichen parallel zu einer Oberfläche der Waagschale. Unter diesem Merkmal wird insbesondere verstanden, dass ein Winkel zwischen der Oberfläche der Waagschale und der reflektierenden Oberfläche des Messspiegels höchstens 1° , sondern höchstens $0,1^\circ$ beträgt. Günstig ist es, wenn die reflektierende Oberfläche des Messspiegels senkrecht zur Messspiegel-Bewegungsrichtung verläuft.

[0021] Besonders günstig ist es, wenn die reflektierende Oberfläche des Messspiegels senkrecht zu einer Messspiegel-Bewegungsrichtung verläuft, in die der Messspiegel sich bewegt, wenn sich die Waagschale bewegt.

[0022] Unter der Laserstrahlungsquelle wird insbesondere ein Objekt verstanden, das gebildet ist zum Abgeben von kohärentem Laserlicht, insbesondere stabilisiertem Laserlicht. Die Laserstrahlungsquelle kann einen, vorzugsweise stabilisierten, Laser aufweisen. Alternativ ist die Laserstrahlungsquelle durch einen Anschluss gebildet, an den ein Laser, beispielsweise mittels eines Lichtleiters, angeschlossen werden kann.

[0023] Unter dem Merkmal, dass der Messspiegel und der Referenzspiegel zum interferometrischen Messen einer Messspiegelgeschwindigkeit des Messspiegels angeordnet sind, wird insbesondere verstanden, dass mittels des Laserstrahls, der von der Laserstrahlungsquelle abgegeben wird, durch Reflexion an den Spiegeln zwei Laserstrahlen erhalten werden, die durch Interferierenlassen ein Interferenzmuster ergeben, aus dem mittels einer Interferenzmustererfassungseinheit die Messspiegelgeschwindigkeit abgeleitet werden kann.

[0024] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt die Waage, die auch als Kibble-Wägezelle bezeichnet werden könnte, einen Antrieb zum Bewegen der Waagschale. Insbesondere ist der Antrieb ausgebildet zum sinusförmigen Bewegen der Waagschale.

[0025] Vorzugsweise besitzt die Waage eine interferometrische Kippwinkeländerungsmessvorrichtung zum Messen einer Kippwinkeländerung eines Kippwinkels zwischen einer Oberfläche des Messspiegels und der Waagschalenbewegungsrichtung. Wie weiter unten dargelegt, kann eine Kippwinkeländerung eine systematische Messunsicherheit bewirken. Durch das Messen der Kippwinkeländerung wird diese systematische Messunsicherheit kompensierbar, wie weiter unten dargelegt wird.

[0026] Beispielsweise weist die Kippwinkeländerungsmessvorrichtung einen Umlenkspiegel auf, der angeordnet ist zum Umlenken von Laserlicht von der Laserstrahlungsquelle zum Messspiegel und der in einer Verschieberichtung quer, vorzugsweise senkrecht, zur Waagschalenbewegungsrichtung bewegbar geführt gelagert ist. Auf diese Weise können die Messspiegelhübe einfach gemessen werden.

[0027] Günstig ist es, wenn der Umlenkspiegel geführt in eine erste Messposition bringbar ist, in der Laserlicht auf eine erste Stelle auf dem Messspiegel fällt, und in eine zweite Messposition bringbar ist, in der Laserlicht auf eine zweite Stelle auf dem Messspiegel fällt.

[0028] Alternativ besitzt die Kippwinkeländerungsmessvorrichtung zumindest einen Strahlteiler zum Erzeugen von zumindest zwei Laserstrahlen aus Laserlicht, wobei der erste Laserstrahl an der ersten Stelle auf dem Messspiegel auftrifft und der zweite Laserstrahl an der zweiten Stelle. Es ist dann möglich, die Messspiegelhübe zu messen, ohne dass der Strahlteiler oder eine andere Komponente des Interferometers bewegt werden muss.

[0029] Vorzugsweise besitzt die Waage eine Interferenzeinheit, die zusammen mit dem Referenzspiegel und dem Messspiegel ein Interferometer bildet. Die Interferenzeinheit kann von den sonstigen Komponenten der Waage trennbar ausgebildet sein. Insbesondere kann die Interferenzeinheit mittels eines Lichtleiters mit einem Lichtleiteranschluss der Waage verbindbar ausgebildet sein.

[0030] Die Waage besitzt vorzugsweise eine Kompensationsschaltung zum Erzeugen eines Tauchspulenstroms zum Kompensieren der Gewichtskraft des Prüflings, wobei die Kompensationsschaltung einen Spannungsmesser und/oder ein Widerstandselement aufweist. Die Waage besitzt vorzugsweise

zudem eine Auswerteeinheit, die ausgebildet ist zum automatischen (i) Erfassen einer Waagschalengeschwindigkeit, mit der sich die Waagschale bewegt, auf Basis von Interferometerdaten des Interferometers, (ii) Erfassen einer induzierten Spannung, die in der Tauchspule induziert wird, und (iii) Berechnen einer Prüflingsmasse eines Prüflings in der Waagschale aus der Waagschalengeschwindigkeit und der induzierten Spannung.

[0031] Vorzugsweise beträgt eine relative Messunsicherheit des Spannungsmessers höchstens 10^{-7} , insbesondere höchstens 10^{-8} . Alternativ oder zusätzlich beträgt eine relative Messunsicherheit des elektrischen Widerstandswerts des Widerstandselements vorzugsweise höchstens 10^{-7} , insbesondere höchstens 10^{-8} .

[0032] Vorzugsweise ist die Auswerteeinheit ausgebildet zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit dem Schritt (a) Schalten in einen Kalibriermodus, insbesondere aufgrund eines externen Signals. Im Kalibriermodus werden vorzugsweise die folgenden Schritte durchgeführt: (i) Ansteuern des Antriebs, sodass die Waagschale mit der Waagschalenfrequenz bewegt wird, (ii) zeitabhängiges Messen einer ersten Erstfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit und einer ersten in der Tauchspule induzierten Spannung $U_{\text{ind},1}$, an einer ersten Stelle S1 des Messspiegels und bei der ersten Waagschalenfrequenz f_1 und daraus Berechnen eines ersten Tauchspulenparameters $T_{1,f1}$, der das Produkt aus magnetischer Flussdichte B des Tauchspulenmagneten und Länge l_{13} der Tauchspule enthält, (iii) zeitabhängiges Messen einer zweiten Erstfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit an einer zweiten Stelle des Messspiegels und der ersten in der Tauchspule induzierten Spannung $U_{\text{ind},1}$ bei der ersten Waagschalenfrequenz f_1 und daraus Berechnen eines zweiten Tauchspulenparameters $T_{2,f1}$, (iv) zeitabhängiges Messen einer ersten Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit an der ersten Stelle des Messspiegels bei einer zweiten Waagschalenfrequenz f_2 und einer zweiten in der Tauchspule induzierten Spannung $U_{\text{ind},2}$ und daraus Berechnen eines dritten Tauchspulenparameters $T_{1,f2}$, (v) zeitabhängiges Messen einer zweiten Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit an der zweiten Stelle des Messspiegels und der zweiten in der Tauchspule induzierten Spannung U bei der zweiten Waagschalenfrequenz f_2 und daraus Berechnen eines vierten Tauchspulenparameters $T_{2,f2}$, (vi) Bestimmen eines Schnittpunkts einer ersten Geraden durch den ersten Tauchspulenparameter $T_{1,f1}$ und den zweiten Tauchspulenparameter $T_{2,f1}$ und einer zweiten Geraden durch den dritten Tauchspulenparameter $T_{1,f2}$ und den vierten Tauchspulenparameter $T_{2,f2}$ und (vii) Bestimmen und Speichern eines Ist-Tauchspulenparameters aus dem Schnittpunkt. Auf diese Weise wird ein Tauchspulenparameter bestimmt, der systematische

Fehler kompensiert. Das von der Auswerteeinheit automatisch durchgeführte Verfahren ist eine erfindungsgemäße Lösung des Problems.

[0033] Insbesondere ist die Auswerteeinheit ausgebildet zum Schalten in einen Messmodus, wobei im Messmodus die Prüflingsmasse anhand des Ist-Tauchspulenparameters berechnet wird.

[0034] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist der Antrieb ausgebildet zum Bewegen des Messspiegels zwischen einem unteren Umkehrpunkt und einem oberen Umkehrpunkt. Vorzugsweise beträgt ein Maximal-Messspiegelhub in Form des Abstands zwischen den Umkehrpunkten höchstens 1 mm, insbesondere höchstens 200 μm . Auf diese Weise wird eine besonders kompakte und vergleichsweise einfach aufgebaute Waage erhalten.

[0035] Durch die kurzen Weglängen können Standard-Wägezellen mit Festkörpergelenken verwendet werden. Solche Festkörpergelenke erlauben keine großen Hübe. Für die Herstellung der erfindungsgemäßen Waage kann daher auf Standard-Wägezellen zurückgegriffen werden. Parallelenker vermeiden das Schwingen, das bei Waagen mit frei hängenden Waagschalen auftritt und störend wirkt. Ferner wird die mögliche Messzeit zur Bestimmung der induzierten Spannung und der Messspiegelgeschwindigkeit erheblich verlängert.

[0036] Bekannte Kibble-Waagen haben einen deutlich größeren Maximal-Messspiegelhub. Dadurch fällt der Einfluss einer Kippung des Messspiegels auf die Messunsicherheit deutlich kleiner aus. Je kleiner der Maximal-Messspiegelhub ist, desto wichtiger ist es, die Kippwinkeländerung zu erfassen und zu kompensieren. Zudem besitzen bekannte Kibble-Waagen keine Parallelführung.

[0037] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Waage,

Fig. 2 die Abhängigkeit des Tauchspulenparameters von der Waagschalenfrequenz und

Fig. 3 in der **Fig. 3a** zwei Geraden durch die Messspiegelhübe zu zwei unterschiedlichen Waagschalenfrequenzen zur Bestimmung des Tauchspulenparameters und in der **Fig. 3b** eine Vielzahl von Geraden, die zu unterschiedlichen Waagschalenfrequenzen gehören.

[0038] **Fig. 1** zeigt eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Waage 10, die eine Waagschale 11, eine Parallelführung 12, einen beweglichen Tauch-Magneten 13, hier in Form einer Spule und einen ortsfesten Fest-Magneten 14, hier in

Form eines Permanentmagneten, aufweist. Der Tauch-Magnet 13 und der Fest-Magnet 14 bilden eine Tauchspule 16.

[0039] Auf der Waagschale 11 kann ein Prüfling 18 angeordnet werden, dessen Prüflingsmasse m bestimmt werden soll. Durch die Parallelführung 12 ist die Waagschale 11 in eine Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} hin- und her bewegbar. Vorzugsweise verläuft die Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} in vertikaler Richtung.

[0040] Die Waagschale 11 ist an einem Koppelstück 20 befestigt, das über ein Festkörpergelenk 22 mit einem Hebel 24 verbunden ist. Parallel zum Hebel 24 ist ein Hilfshebel 26 angeordnet, der über ein zweites Festkörpergelenk 28 ebenfalls mit dem Koppelstück 20 verbunden ist. Der Hebel 24 ist in einem ersten Biegelager 30.1 ortsfest gelagert. Der Hilfshebel 26 ist in einem zweiten Biegelager 30.2 ortsfest gelagert.

[0041] Bewegt sich das Koppelstück 20 in Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} , so bewegt sich der Tauch-Magnet 13 in eine Tauchspulenbewegungsrichtung R_{13} , die bevorzugt parallel zur Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} verläuft.

[0042] Zwischen dem ersten Biegelager 30.1 und dem Festkörpergelenk 22 hat der Hebel 24 eine erste Hebellänge L_1 . Ein Abstand zwischen dem ersten Biegelager 30.1 und dem Schnittpunkt zwischen dem Hebel 24 und einer Längsachse A_{16} der Tauchspule 16 entspricht einer zweiten Hebellänge L_2 .

[0043] Am Koppelstück 20 ist ein Messspiegel 32 befestigt. Die Waage 10 besitzt zudem einen Referenzspiegel 34, der ortsfest relativ zum Biegelager 30.1 angeordnet ist. Beispielsweise sind sowohl der Referenzspiegel 34 als auch das ortsfeste Biegelager 30.1 an einem schematisch eingezeichneten Rahmen 36 befestigt. Bewegt sich die Waagschale 11 in Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} , so bewegt sich der Messspiegel 32 in der parallel verlaufenden Messspiegel-Bewegungsrichtung R_{32} .

[0044] Die Waage 10 besitzt eine Laserstrahlungsquelle 38, die im vorliegenden Fall durch einen Lichtleiteranschluss gebildet ist. Ein von der Laserstrahlungsquelle 38 ausgehender Laserstrahl 40.1 fällt auf einen Umlenkspiegel 42 und wird von diesem auf eine erste Stelle S_1 auf dem Messspiegel 32 reflektiert. Der Umlenkspiegel 42 ist linear verschieblich gelagert. Dazu wird eine schematisch eingezeichnete Linearführung 44 verwendet.

[0045] Ein zweiter von der Strahlungsquelle 38 ausgehender Laserstrahl 40.2 fällt auf den Referenzspiegel 34. Dazu kann er von einem Umlenkelement 46 umgelenkt werden.

[0046] Die Laserstrahlen 40.1,40.2 werden von einem Laser 48 einer Interferenzeinheit 50 erzeugt. Mittels einer Interferenzmustererfassungseinheit 52 wird ein Referenzmuster ausgewertet, das durch Überlagerung der beiden reflektierten Laserstrahlen 40.1, 40.2 entsteht. Daraus wird eine Verschiebung Δx des Messspiegels 32 bestimmt. Aus der zeitlichen Änderung dieser Verschiebung wird eine Messspiegelgeschwindigkeit v berechnet.

[0047] Mittels eines Antriebs 54 kann das Koppelstück 20 und damit die Waagschale 11 bewegt werden. Beispielsweise wird das Koppelstück 20 mit einer Waagschalenfrequenz f hin- und her bewegt, insbesondere sinusförmig.

[0048] Die Waage 10 besitzt eine Kompensationsschaltung 56 zum Erzeugen eines Tauchspulenstroms I , der so groß ist, dass die Position der Waagschale 11 genau derjenigen Position entspricht, die die Waagschale 11 hätte, wenn kein Prüfling 18 darauf angeordnet ist. In anderen Worten ist der Tauchspulenstrom I genau so groß, dass die Gewichtskraft des Prüflings 18 kompensiert wird. Selbstverständlich kann der Tauchspulenstrom auch größer oder kleiner sein, wenn beispielsweise die Gewichtskraft des Prüflings oder andere Komponenten der Waage zusätzlich mit kompensiert werden müssen.

[0049] Die Kompensationsschaltung 56 umfasst einen Lageindikator 58, mittels dem die Lage des Hebels 24 detektierbar ist. Ein Verstärker 59 einer Auswerteeinheit 60 der Waage 10 erzeugt daraufhin den Tauchspulenstrom I , der so eingeregelt wird, dass der Lageindikator 58 eine vorgegebene Lage des Hebels 24 erfasst.

[0050] Der Tauchspulenstrom I wird gemessen, indem ein Spannungsabfall über ein Widerstandselement 62 mittels eines Voltmeters 64 gemessen wird.

[0051] Im Folgenden wird das Messprinzip der Waage 10 näher erläutert. Der Prüfling 18 erzeugt eine Gewichtskraft

$$F_g = m \cdot g \quad (1)$$

[0052] Hierbei beschreibt g die lokale Fallbeschleunigung am Ort des Schwerpunkts des Prüflings. Die Tauchspule 16 erzeugt eine elektromagnetische Kraft, welche über den Hebel 24 die Gewichtskraft F_g kompensiert. Diese Kraft ist durch

$$F_{em} = \frac{1}{H} B l_{13} \cdot I \quad (2)$$

vom Tauchspulenstrom I abhängig, aber auch von der magnetischen Flussdichte B , der Länge l_{13} der Spule 13 und einem Hebelverhältnis $H = L_1/L_2$. Je

größer ein Hebelverhältnis $H = L_1/L_2$, desto kleiner ist der benötigte Tauchspulenstrom I zur Kraftkompensation. Der Tauchspulenstrom I wird nach dem Ohmschen Gesetz

$$U_{62} = R_{62} \cdot I \quad (3)$$

durch den Spannungsabfall U_{62} am Widerstandselement 62, das den ohmschen Widerstand R_{62} hat, durch das Voltmeter 64 gemessen.

[0053] Um den Hebel 24 im Gleichgewicht zu halten, wird die Position des Tauch-Magneten 13, der im vorliegenden Fall eine Spule ist, über den Lageindikator 58 bestimmt und durch eine Rückkopplung der benötigte Tauchspulenstrom I reguliert. Die Parallelführung 12 dient zur Stabilisierung des Hebels 24, sodass ein Kippen oder Schwingen der Waagschale 11 unterbunden wird.

[0054] In einem Kalibriermodus ist kein Prüfling 18 auf der Waagschale 11 vorhanden. Mittels des Antriebs 54 wird die Waagschale 11 auf- und ab bewegt. Dieser Modus wird auch als dynamischer Modus oder Geschwindigkeitsmodus bezeichnet. Hierbei wird in der Tauchspule, im vorliegenden Fall in dem Tauch-Magnet 13, eine Spannung U_{ind} gemäß

$$U_{ind} = Bl_{13} \cdot v_{13} = Bl_{13} \cdot v_{32} / H \quad (4)$$

induziert. v_{13} beschreibt die Spulengeschwindigkeit. Durch Kombination der Gleichungen (1) und (2) ergibt sich

$$m = \frac{Bl_{13} \cdot I}{H \cdot g} \quad (5)$$

[0055] Mit Formel (4) folgt

$$m = \frac{U \cdot U_{ind}}{H \cdot v_{32} \cdot R_{62}} \quad (6)$$

[0056] Im dynamischen Modus oszilliert der Messspiegel zwischen einem unteren Umkehrpunkt und einem oberen Umkehrpunkt. Ein Maximalmessspiegelhub M in Form des Abstands d zwischen beiden Umkehrpunkten beträgt vorzugsweise weniger als 1 mm, im vorliegenden Fall beträgt dieser Abstand $d = 40 \mu\text{m}$.

[0057] Im dynamischen Modus wird die Waage 10 in eine vorzugsweise sinusförmige Bewegung versetzt. Die Messspiegelgeschwindigkeit lässt sich dann beschreiben als

$$v = v_0 \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (7)$$

[0058] In Gleichung (5) erscheint die Waagschalenfrequenz f nicht. Wie in **Fig. 2** zu sehen ist, wird den-

noch eine Abhängigkeit des Tauchspulenparameters

$$T = \frac{Bl_{13}}{H}$$

(in Form des Produkts aus magnetischer Flussdichte B und der Länge l_{13} der Spule geteilt durch das Hebelverhältnis H) von der Waagschalenfrequenz f gemessen.

[0059] Erklärt werden kann dieses Phänomen durch die Trägheit des Messspiegels 32. An den Umkehrpunkten der harmonischen Auslenkung wird der Messspiegel 32 weiter gekippt, als nur durch den Führungsfehler. In anderen Worten ändert sich ein Kippwinkel α zwischen einer Oberfläche des Messspiegels 32 und der Position, die die Oberfläche des Messspiegels hätte, wenn der Hebel 24 keinerlei Fehler bewirken würde, in Abhängigkeit von der Position des Messspiegels 32. Es kommt daher zu einer Kippwinkeländerung $\Delta\alpha$ des Kippwinkels α zwischen der Oberfläche des Messspiegels 32 und der Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} .

[0060] Da die Beschleunigung, die bei der Bewegung auf den Messspiegel 32 wirkt, die zweite zeitliche Ableitung der Position ist, ergibt sich, dass die Abhängigkeit proportional zum Quadrat der Waagschalenfrequenz f ist, da diese im Argument der Sinusfunktion steht. Der Tauchspulenparameter

$$T = \frac{Bl_{13}}{H}$$

ergibt sich als Quotient aus der Amplitude der induzierten Spannung U_{ind} und der Amplitude v_0 der Auslenk-Geschwindigkeit v . Es sei vereinfacht angenommen, dass ein Führungsfehler auf die induzierte Spannung keinen messbaren Einfluss hat.

[0061] Zum Kompensieren des in **Fig. 2** gezeigten Fehlers wird zunächst der Laserstrahl 40.1 auf die erste Stelle S1 gerichtet. Dazu wird der Umlenkspiegel 42 an eine mit durchgezogener Linie gezeichnete Position P1 positioniert. Zudem wird der Messspiegel mit einer ersten Waagschalenfrequenz f_1 hin- und her bewegt.

[0062] Danach wird interferometrisch die Positionsänderung des Messspiegels 32 entlang der Waagschalenbewegungsrichtung R_{11} zeitabhängig gemessen. Aus der Positionsänderung wird durch Ableiten nach der Zeit eine erster Erdfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit $v_{1,f_1}(t)$ berechnet. Diese Messspiegelgeschwindigkeit entspricht einer Waagschalengeschwindigkeit v_{11} der Waagschale 11. Es gilt $v_{11} = v_{1,f_1}(t)$. Zudem wird die induzierte erste Spannung $U_{ind,1}$ zeitabhängig gemessen. Mit Formel (4)

$$\frac{U_{ind,1}}{v_{1,f_1}(t)} = \frac{Bl_{13}}{H}$$

wird daraus ein erster Tauchspulenparameter

$$T_{1,f_1} = \frac{Bl_{13}}{H} \text{ berechnet.}$$

[0063] Fig. 3a zeigt den Tauchspulenparameter T_{1,f_1} , der so bestimmt wurde.

[0064] Danach wird der Umlenkspiegel 42 mittels des Messspiegel-Antriebs 66 in die zweite Position P2 bewegt, sodass der Laserstrahl 40.1 auf eine zweite Stelle S2 des Messspiegels 32 fällt. Danach wird bei gleicher Waagschalenfrequenz f_1 auf gleiche Weise eine zweite Erstfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit $v_{2,f_1}(t)$ berechnet. Mit der Formel (4) wird daraus ein zweiter Tauchspulenparameter

$$T_{2,f_1} = \frac{U_{ind}(t)}{v_{2,f_1}(t)} = \frac{Bl_{2,13}}{H} \text{ berechnet.}$$

[0065] Nachfolgend wird die Waagschalenfrequenz f geändert. Mit der neuen Waagschalenfrequenz f_2 werden erneut die Messspiegelgeschwindigkeiten und eine zweite induzierten Spannung $U_{ind,2}$ zeitabhängig gemessen. Daraus ergeben sich ein dritter und ein vierter Tauchspulenparameter T_{1,f_2} und T_{2,f_2} , die ebenfalls in Fig. 3a eingezeichnet sind.

[0066] Alternativ ist es möglich, dass zunächst bei gleichbleibender Position P1 des Umlenkspiegel 42 bei den beiden Waagschalenfrequenzen f_1 , f_2 gemessen und nachfolgend der Umlenkspiegel 42 in die zweite Position P2 bewegt wird.

[0067] Es ist möglich, für jede Gerade mehr als 2 Punkte zu erfassen. Ferner ist es möglich die zwei (oder mehr) Positionen gleichzeitig zu vermessen, indem man, beispielsweise Drei-Strahl-Interferometer nimmt. Dabei ist ein Strahl der Referenzstrahl und die anderen beiden Mess-Strahlen werden zu den zwei Positionen geführt. Beide Mess-Strahlen haben somit zur gleichen Zeit dieselben Umgebungsbedingungen, womit sich die Messunsicherheit verkleinert. Das stellt - unabhängig von anderen in den Figuren gezeigten Merkmalen - eine bevorzugte Ausführung der Erfindung dar.

[0068] Es sei darauf hingewiesen, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass der Umlenkspiegel auf genau zwei Positionen positioniert wird. Insbesondere ist es auch möglich, dass der Umlenkspiegel auf 3, 4, 5 oder mehr Positionen positioniert wird. Die Positionen sind aber vorzugsweise so gewählt, dass die Stellen S_i , auf denen der Laserstrahl auf den Messspiegel 32 fällt, auf einer Geraden liegen. In der Regel ist es aber ausreichend, den Messspiegel auf höchstens vier, insbesondere höchstens drei, Positionen zu bringen und dann den Tauchspulenparameter zu bestimmen. Die Anzahl der minimalen Messpunkte pro Gerade G ist 2. Weitere Messpunkte lassen das Gleichungssystem überbestimmt werden, welches dann durch eine Regression (Methode der kleinsten Quadrate) gelöst wird. Dadurch wird die Messunsicherheit verringert. Es sind stets mindestens 2 Waagschalenfrequenzen notwendig.

[0069] In Fig. 3a sind zudem eine erste Ausgleichsgerade $G1$ durch die Tauchspulenparameter zur ersten Waagschalenfrequenz f_1 und eine zweite Ausgleichsgerade $G2$ durch die Tauchspulenparameter zur zweiten Waagschalenfrequenz f_2 eingezeichnet. Die beiden Ausgleichsgeraden schneiden sich in einem Schnittpunkt Q . Diesem Schnittpunkt entspricht ein Ist-Tauchspulenparameter $T_{ist} = \frac{Bl_{13}}{H}$.

Dieser Ist-Tauchspulenparameter wird, beispielsweise in einem digitalen Speicher der Auswerteeinheit 60, gespeichert.

[0070] Danach wird die Waage in einen Messmodus geschaltet, beispielsweise durch Eingeben eines entsprechenden Signals von einem externen Rechner oder mittels eines Eingabeelements, beispielsweise eines Bildschirms oder einer Taste. Die Masse des Prüflings 18 wird nachfolgend anhand der Formel

$$m = \frac{Bl_{13}}{H} \cdot \frac{l}{g} = T_{ist} \frac{U}{g \cdot R_{62}} \quad (8)$$

bestimmt.

[0071] Es sei darauf hingewiesen, dass die Positionen P1 und P2 des Messspiegels 32 sowie deren Abstand voneinander nicht genau bekannt sein müssen, maßgeblich ist lediglich, dass für alle Waagschalenfrequenzen stets an den beiden Positionen P1 und P2 gemessen wird. Beispielsweise besitzt die Waage zumindest zwei, insbesondere genau zwei, Anschläge, an die der Messspiegel 32 anschlägt, wenn er in der ersten Position oder der zweiten Position ist.

[0072] Die Laser-Strahlungsquelle 38, der Referenzspiegel 34, der Messspiegel 32 sowie der Umlenkspiegel 42 sind Bestandteile einer Kippwinkeländerungsmessvorrichtung 68.

[0073] Fig. 3b zeigt Ausgleichsgeraden für eine Mehrzahl unterschiedlicher Waagschalenfrequenzen f .

Bezugszeichenliste

10	Waage
11	Waagschale
12	Parallelführung
13	Tauch-Magnet, Tauch-Magnetspule
14	Fest-Magnet
16	Tauchspule
18	Prüfling

20	Koppelstück	L	Hebellänge
22	Festkörpergelenk	M_{\max}	Maximal-Messspiegelhub
24	Hebel	m	Prüflingsmasse
26	Hilfshebel	P	Position
28	zweites Festkörpergelenk	Q	Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden
30	Biegelager		
32	Messspiegel	S	Stelle
34	Referenzspiegel	R_{11}	Waagschalenbewegungsrichtung,
36	Rahmen	R_{13}	Tauchspulenbewegungsrichtung
38	Laserstrahlungsquelle	R_{32}	Messspiegel-Bewegungsrichtung
40	Laserstrahl	t	Zeit
42	Umlenkspiegel	T	Tauchspulenparameter
44	Linearführung	U	Spannung
46	Umlenkelement	U_{ind}	induzierte Spannung
48	Laser	v	Messspiegelgeschwindigkeit
50	Interferenzeinheit	$V_{1,f1}$	erste Ersthäufigkeit-Messspiegelgeschwindigkeit
52	Interferenzmustererfassungseinheit	$V_{2,f1}$	zweite Ersthäufigkeit-Messspiegelgeschwindigkeit
54	Antrieb	$V_{1,f2}$	erste Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit
56	Kompensationsschaltung	$V_{2,f2}$	zweite Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit
58	Lageindikator		
59	Verstärker		
60	Auswerteeinheit	V	Verschieberichtung
62	Widerstandselement		Patentansprüche
64	Voltmeter		
66	Messspiegel-Antrieb		1. Waage (10) mit
68	Kippwinkeländerungsmessvorrichtung		(a) einer Waagschale (11),
α	Kippwinkel		(b) einer Parallelführung (12),
$\Delta\alpha$	Kippwinkeländerung		- die einen Hebel (24) aufweist,
A_{16}	Längsachse		- wobei auf den Hebel (24) eine Gewichtskraft (F_g) des Prüflings (18) wirkt,
B	magnetischen Flussdichte		- wobei der Hebel (24) in zumindest einem Biegelager gelagert ist, und
d	Abstand		- wobei die Waagschale (11) mittels der Parallelführung (12) in eine Waagschalenbewegungsrichtung (R_{11}) bewegbar ist, und
f_1, f_2	Waagschalenfrequenz (Anregungsfrequenz)		(c) einer Tauchspule (16), die
F_g	Gewichtskraft		einen ortsfesten Fest-Magneten (14), und
g	Fallbeschleunigung		einen beweglichen Tauch-Magneten (13), insbesondere eine Tauch-Magnetspule, aufweist, zum Kompensieren der Gewichtskraft (F_g) des Prüflings (18),
G	Ausgleichsgerade		(d) einem Messspiegel (32), der
H	Hebelverhältnis		bewegungsstarr relativ zur Waagschale (11) befestigt ist und angeordnet ist zum Bewegen entlang einer Messspiegel-Bewegungsrichtung (R_{32}),
I	Tauchspulenstrom		(e) einer Laserstrahlungsquelle (38) zum Abgeben eines Laserstrahls (40)
I_{13}	Länge der Spule		und
			(f) einem Referenzspiegel (34), der relativ zu einem

Auflager (30) ortsfest befestigt ist,
 (g) wobei der Messspiegel (32) und der Referenzspiegel (34) zum interferometrischen Messen einer Messspiegelgeschwindigkeit (v) des Messspiegels (32) angeordnet sind,
 (h) einer Kompensationsschaltung (56) zum Erzeugen eines Tauchspulenstroms (I) zum Kompensieren der Gewichtskraft (F_g) des Prüflings (18),
 (i) wobei die Kompensationsschaltung (56) einen Spannungsmesser (64), dessen relative Messunsicherheit höchstens 10^{-8} beträgt, und/oder ein Widerstandselement (62), wobei eine relative Messunsicherheit des elektrischen Widerstandswerts des Widerstandselements (62) höchstens 10^{-8} beträgt, aufweist,
 (j) einer Auswerteeinheit (60), die ausgebildet ist zum automatischen

- Erfassen einer Waagschalengeschwindigkeit (v_{11}), mit der sich die Waagschale (11) bewegt, auf Basis von Interferometerdaten des Interferometers,
- Erfassen einer induzierten Spannung (U_{ind}), die in der Tauchspule (16) induziert wird, und
- Berechnen einer Prüflingsmasse eines Prüflings (18) in der Waagschale (11) aus der Waagschalengeschwindigkeit und der induzierten Spannung (U_{ind}) **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswerteeinheit (60) ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(a) Schalten in einen Kalibriermodus, im Kalibriermodus Durchführen der folgenden Schritte:

(i) Ansteuern eines Antriebs (54), sodass die Waagschale (11) mit einer Waagschalenfrequenz (f_1) bewegt wird,

(ii) zeitabhängiges Messen einer ersten Erdfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{1,f_1}) und einer ersten in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,1,f_1}$) an einer ersten Stelle (S1) des Messspiegels (32) und bei der ersten Waagschalenfrequenz (f_1) und daraus Berechnen eines ersten Tauchspulenparameters (T_{1,f_1}), der das Produkt aus magnetischer Flussdichte (B) der Tauchspule (16) und Länge (l_{13}) der Tauchspule (16) enthält,

(iii) zeitabhängiges Messen einer zweiten Erdfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{2,f_1}) an einer zweiten Stelle (S2) des Messspiegels (32) und der ersten in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,2,f_1}$) bei der ersten Waagschalenfrequenz (f_1) und daraus Berechnen eines zweiten Tauchspulenparameters (T_{2,f_1}),

(iv) zeitabhängiges Messen einer ersten Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{1,f_2}) an der ersten Stelle (S1) des Messspiegels (32) und einer zweiten in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,1,f_2}$) bei einer zweiten Waagschalenfrequenz (f_2) und daraus Berechnen eines dritten Tauchspulenparameters (T_{1,f_2}),

(v) zeitabhängiges Messen einer zweiten Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{2,f_2}) und einer zweiten in der Tauchspule (16) induzierten Span-

nung ($U_{ind,2,f_2}$) an der zweiten Stelle (S2) des Messspiegels (32) bei der zweiten Waagschalenfrequenz (f_2) und daraus Berechnen eines vierten Tauchspulenparameters (T_{2,f_2}),
 (vi) Bestimmen eines Schnittpunkts (Q) einer ersten Geraden (G1) durch den ersten Tauchspulenparameter (T_{1,f_1}) und den zweiten Tauchspulenparameter (T_{2,f_1}) und einer zweiten Geraden (G2) durch den dritten Tauchspulenparameter (T_{1,f_2}) und den vierten Tauchspulenparameter (T_{2,f_2}) und
 (vii) Bestimmen und Speichern eines Ist-Tauchspulenparameters (T) aus dem Schnittpunkt (Q) und
 (b) Schalten in einen Messmodus und im Messmodus Berechnen der Prüflingsmasse (m) anhand des Ist-Tauchspulenparameters (T).

2. Waage (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) der Antrieb (54) ausgebildet ist zum Bewegen des Messspiegels (32) zwischen einem unteren Umkehrpunkt (UP) und einem oberen Umkehrpunkt (OP) und dass
 (b) ein Maximalmessspiegelhub (M_{max}) in Form des Abstands zwischen den Umkehrpunkten höchstens 1 mm, insbesondere höchstens 200 μ m beträgt.

3. Waage (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch**
 (a) eine interferometrische Kippwinkeländerungsmessvorrichtung (68) zum Messen einer Kippwinkeländerung ($\Delta\alpha$) eines Kippwinkels (α) zwischen einer Oberfläche des Messspiegels (32) und der Waagschalenbewegungsrichtung (R_{11}) und
 (b) den Antrieb (54) zum, insbesondere sinusförmigen, Bewegen der Waagschale (11).

4. Waage (10) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass
 die Kippwinkeländerungsmessvorrichtung (68) einen Umlenkspiegel (42) aufweist, der angeordnet ist zum Umlenken von Laserlicht von der Laserstrahlungsquelle (38) zum Messspiegel (32) und
 in einer Verschieberichtung quer zur Waagschalenbewegungsrichtung (R_{11}) bewegbar geführt gelagert ist.

5. Waage (10) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass
 der Umlenkspiegel (42) geführt
 in eine erste Messposition (P1) bringbar ist, in der Laserlicht auf eine erste Stelle (S1) auf dem Messspiegel (32) fällt, und
 in eine zweite Messposition (P2) bringbar ist, in der Laserlicht auf eine zweite Stelle (S2) auf dem Messspiegel (32) fällt.

6. Waage (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Interferenzeinheit (50), die zusammen mit dem Referenz-

spiegel (34) und dem Messspiegel (32) ein Interferometer bildet.

Stelle (S2) liegt, wiederholt werden und die jeweiligen Geraden Ausgleichsgeraden sind.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

7. Verfahren zum Kalibrieren einer Waage (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Schritte:

- (i) Bewegen der Waagschale (11) mit einer ersten Waagschalenfrequenz (f_1),
- (ii) zeitabhängiges Messen einer ersten Ersthäufigkeit-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{1,f_1}) und der ersten der in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,1}$) an einer ersten Stelle (S1) des Messspiegels (32) und bei der ersten Waagschalenfrequenz (f_1) und daraus Berechnen eines ersten Tauchspulenparameters (T_{1,f_1}), der das Produkt aus magnetischer Flussdichte (B) der Tauchspule (16) und Länge (l_{13}) der Tauchspule (16) enthält,
- (iii) zeitabhängiges Messen einer zweiten Ersthäufigkeit-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{2,f_1}) an einer zweiten Stelle (S2) des Messspiegels (32) und der ersten in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,1}$) bei der ersten Waagschalenfrequenz (f_1) und daraus Berechnen eines zweiten Tauchspulenparameters (T_{2,f_1}),
- (iv) zeitabhängiges Messen einer ersten Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{1,f_2}) an der ersten Stelle (S1) des Messspiegels (32) und der zweiten in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,2}$) bei einer zweiten Waagschalenfrequenz (f_2) und daraus Berechnen eines dritten Tauchspulenparameters (T_{1,f_2}),
- (v) zeitabhängiges Messen einer zweiten Zweitfrequenz-Messspiegelgeschwindigkeit (v_{2,f_2}) an der zweiten Stelle (S2) des Messspiegels (32) und der zweiten in der Tauchspule (16) induzierten Spannung ($U_{ind,2}$) bei der zweiten Waagschalenfrequenz (f_2) und daraus Berechnen eines vierten Tauchspulenparameters (T_{2,f_2}),
- (vi) Bestimmen eines Schnittpunkts (Q) einer ersten Geraden (G1) durch den ersten Tauchspulenparameter (T_{1,f_1}) und den zweiten Tauchspulenparameter (T_{2,f_1}) und einer zweiten Geraden (G2) durch den dritten Tauchspulenparameter (T_{1,f_2}) und den vierten Tauchspulenparameter (T_{2,f_2}) und
- (vii) Bestimmen und Speichern eines Ist-Tauchspulenparameters (T) aus dem Schnittpunkt (Q).

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) die Schritte (i) bis (iii) von Anspruch 7 für zumindest eine weitere Waagschalenfrequenz (f) wiederholt werden und/oder
- (b) die Schritte (i) bis (iii) und/oder (iv) und (v) von Anspruch 7 für zumindest eine weitere Stelle, die zwischen der ersten Stelle (S1) und der zweiten

Anhängende Zeichnungen

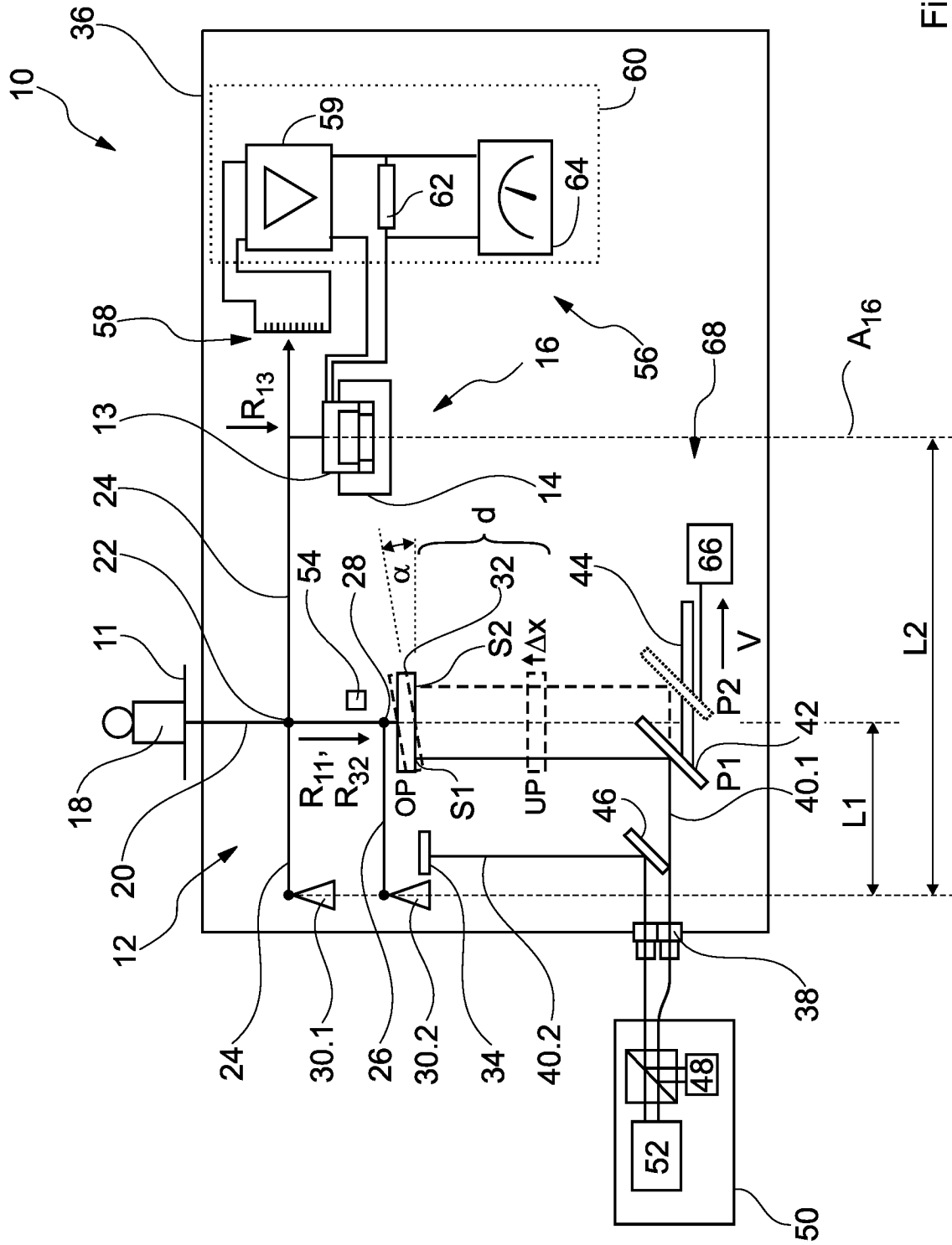


Fig. 1

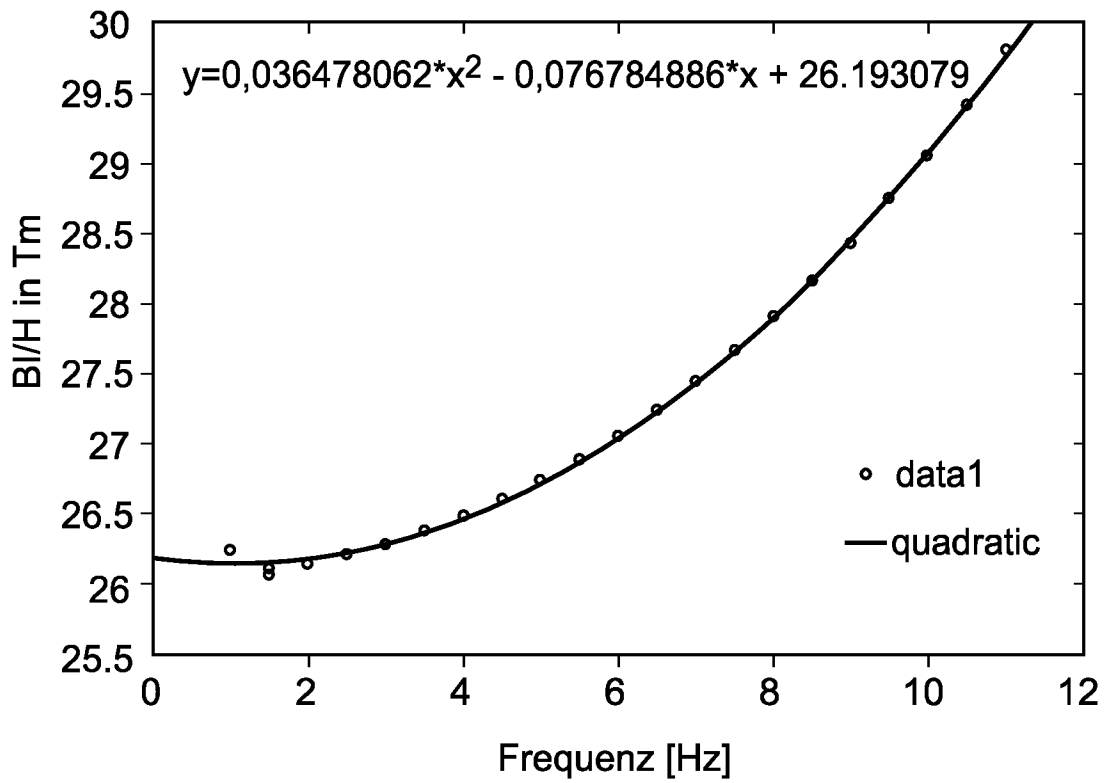


Fig. 2

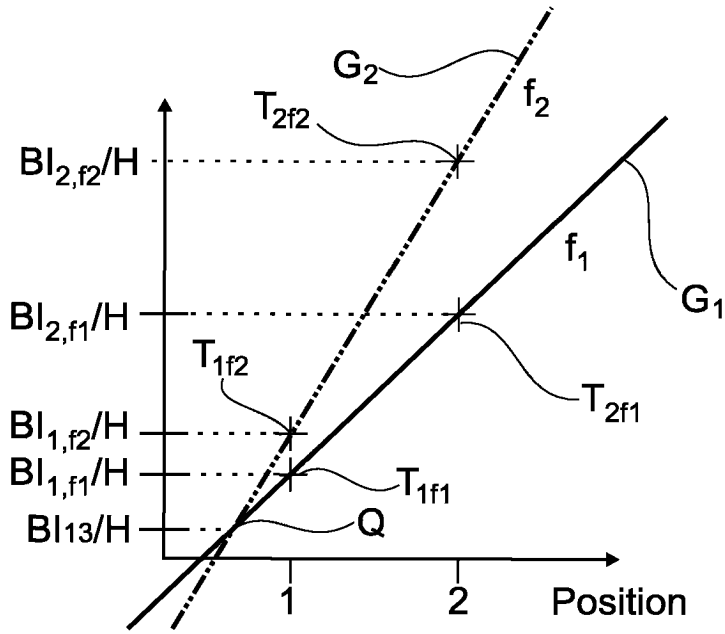


Fig. 3a

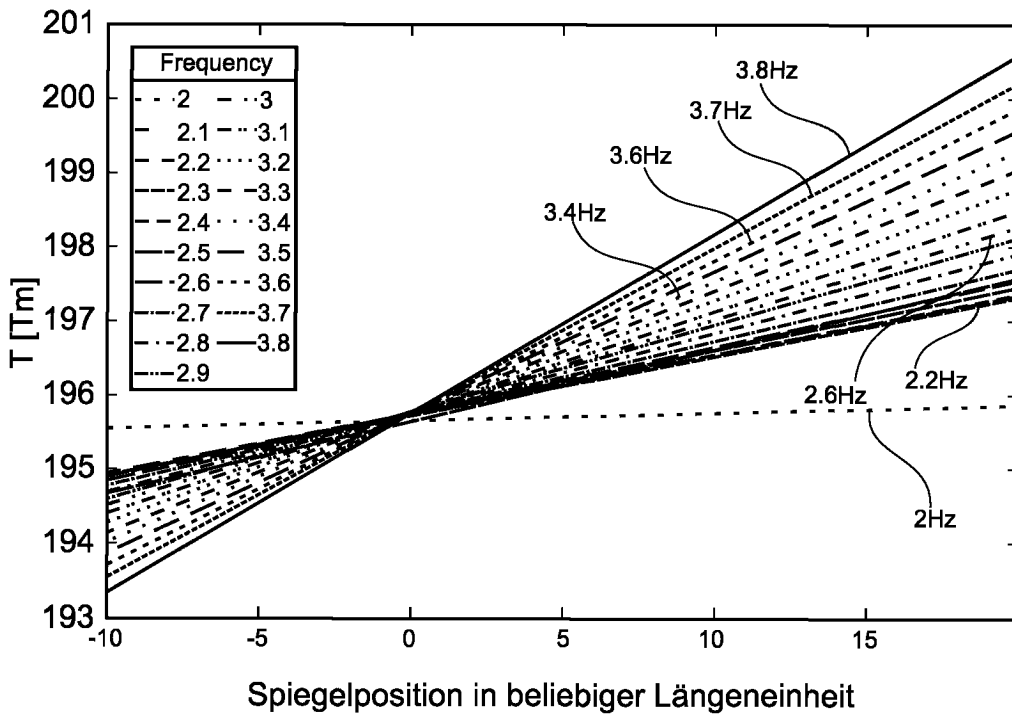


Fig. 3b