



(10) **DE 10 2016 111 157 B4** 2021.11.11

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 111 157.0**
(22) Anmeldetag: **17.06.2016**
(43) Offenlegungstag: **21.12.2017**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **11.11.2021**

(51) Int Cl.: **G01V 7/02 (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, vertreten durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:
**Schmaljohann, Frank, Dipl.-Ing., 38104
Braunschweig, DE; Hagedorn, Daniel, Dr. rer. nat.,
38159 Vechelde, DE; Löffler, Frank, Prof. Dr.-Ing.,
38176 Wendeburg, DE**

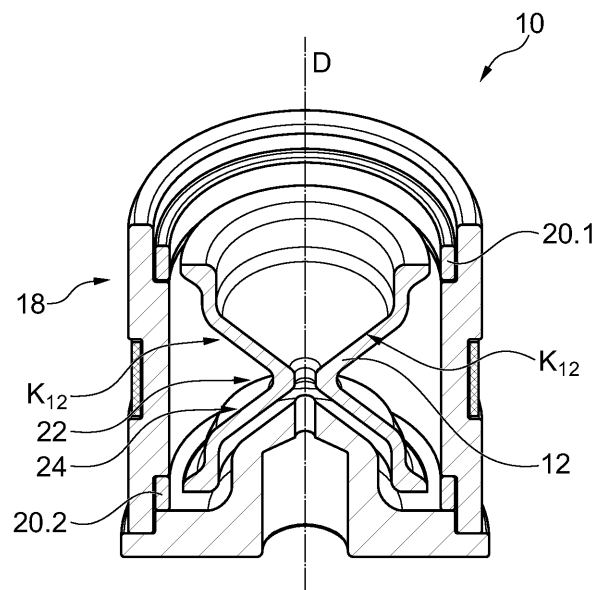
(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und
Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,
DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	197 10 269	C1
DE	695 21 235	T2
US	5 012 216	A
US	6 079 267	A
US	5 204 568	A

(54) Bezeichnung: **Gravimeter**

(57) Hauptanspruch: Gravimeter (10) mit
(a) einem Massekörper (12),
(b) einer Haltevorrichtung (14) zum Halten des Massekörpers (12) an einer vorbestimmten Position und
(c) einer Positions-Erfassungsvorrichtung (18) zum Erfassen der Position des Massekörpers (12), wobei
(d) der Massekörper (12) eine Einschnürung (22) besitzt, dadurch gekennzeichnet, dass
(e) der Massekörper (12) zumindest im Bereich der Einschnürung (22) doppelkegelstumpfförmig ausgebildet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Gravimeter mit (a) einem Massekörper, (b) einer Haltevorrichtung zum Halten des Massenkörpers an einer vorbestimmten Position und (c) einer Position-Erfassungsvorrichtung zum Erfassen der Position des Massekörpers, wobei (d) der Massekörper eine Einschnürung besitzt.

[0002] Ein derartiges Gravimeter ist aus der DE 695 21 235 T2 und der US 6,079,267 A bekannt.

[0003] Die DE 197 102 69 C1 betrifft ein Gravimeter mit einem Schwebkörper aus einem Typ II Supraleiter.

[0004] Die US 5,012,216 A betrifft ein Gravimeter mit supraleitendem Material bedeckten Spulen mit einem supraleitenden Quanteninterferenzdetektor.

[0005] Ein Gravimeter ist auch aus der US 5,204,568 A bekannt. Das dort beschriebene Gravimeter wird zur gravimetrischen Untersuchung beispielsweise von Bohrlöchern eingesetzt. Der Nachteil an einem derartigen Gravimeter ist, dass höchstgenaue Messungen der Erdbeschleunigung nicht möglich sind. Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, die Messung der Erdbeschleunigung zu verbessern.

[0006] Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Gravimeter, bei dem der Massekörper zumindest im Bereich der Einschnürung doppelkegelstumpfförmig ausgebildet ist.

[0007] Vorteilhaft an einem derartigen Gravimeter ist, dass der Massekörper leicht in der vorbestimmten Position gehalten werden kann. Das erleichtert die hochgenaue Erfassung der Position des Massekörpers und verbessert damit die Messgenauigkeit. Es ist ein weiterer Vorteil, dass das Gravimeter so ausgebildet werden kann, dass es die Erdbeschleunigung unabhängig von seiner Orientierung mit hoher Genauigkeit misst.

[0008] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter der Haltevorrichtung eine Vorrichtung verstanden, mittels der der Massekörper auf einer solchen vorbestimmten Position gehalten werden kann, dass aus der Position selbst oder aber aus dem Aufwand, der notwendig ist, um den Massekörper an der vorbestimmten Position zu halten, die Erdbeschleunigung bestimmbar ist.

[0009] Unter der Positions-Erfassungsvorrichtung wird insbesondere eine Vorrichtung verstanden, die die Position des Massekörpers relativ zur Haltevorrichtung bestimmt.

[0010] Vorzugsweise ist der Massekörper so relativ zur Haltevorrichtung ausgerichtet, dass eine von der Haltevorrichtung auf den Massekörper ausgeübte Haltekraft zumindest auch im Bereich der Einschnürung auf den Massekörper ausgeübt wird.

[0011] Der Massekörper ist zumindest im Bereich der Einschnürung doppelkegelstumpfförmig ausgebildet. Dabei hat sich ein Öffnungswinkel von $90^\circ \pm 5^\circ$ als besonders günstig herausgestellt. Dadurch kann der Massekörper selbstzentrierend von der Haltevorrichtung gehalten werden.

[0012] Da der Massekörper zumindest im Bereich der Einschnürung spiegelsymmetrisch bezüglich einer Symmetrieebene ist, die senkrecht zur Drehsymmetrieachse verläuft, ist, kann der Massekörper so aufgebaut werden, dass eine Drehung des Gravimeters um eine Achse senkrecht zur Drehachse um 180° Grad die Messgenauigkeit nicht signifikant verringert.

[0013] Vorzugsweise hat die Haltevorrichtung zumindest im Bereich der Einschnürung des Massekörpers eine zur Außenkontur des Massekörpers komplementäre Gestalt. In anderen Worten ist die Haltevorrichtung so ausgebildet, dass ein Spalt zwischen dem Massekörper und der Haltevorrichtung an allen Stellen möglichst gleichgroß ist.

[0014] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform enthält der Massekörper, insbesondere auf seiner Oberfläche, ein supraleitendes Material. Die Haltevorrichtung kann eine supraleitende Spule zum Erzeugen eines Magnetfelds aufweisen, das den Massekörper an der vorbestimmten Position hält. Supraleitende Magnete vermögen einerseits starke Magnetfelder zu generieren, sodass der Massekörper eine vergleichsweise große Masse aufweisen kann. Vorzugsweise liegt die Masse des Massekörpers oberhalb von 1 Gramm. Supraleitende Magnete haben zudem den Vorteil, dass sie ein zeitlich konstantes Magnetfeld erzeugen, sodass eine Änderung der Lage des Massekörpers relativ zur Haltevorrichtung in sehr guter Näherung nicht auf Fluktuation des Magnetfelds zurückgeführt werden kann. Das erhöht die Messgenauigkeit.

[0015] Beispielsweise besitzt der Massekörper, beispielsweise auf seiner Oberfläche, Niob. Das Niob kann als Schicht aufgesputtert oder auf eine andere Weise aufgebracht sein. Niob hat den Vorteil, dass es über die höchste Sprungtemperatur eines chemischen Elements verfügt. Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, dass der Massekörper auf seiner Oberfläche eine Hochtemperatur-supraleitende Substanz oder eine sonstige bei Normaldruck (1013 hPa) und einer geeigneten Temperatur supraleitende Substanz aufweist.

[0016] Vorzugsweise umfasst dieses Gravimeter eine Kühlvorrichtung zum Kühlen der Haltevorrichtung und/oder des Massekörpers auf eine Temperatur unterhalb der Sprungtemperatur des jeweiligen supraleitenden Materials.

[0017] Günstig ist es, wenn der Massekörper eine Dichte aufweist, die kleiner ist als 2 Gramm pro Kubikzentimeter, vorzugsweise kleiner als 1,8 Gramm pro Kubikzentimeter.

[0018] Es hat sich als besonders geeignet herausgestellt, wenn der Massekörper aus Magnesium oder einer Magnesiumlegierung herausgestellt ist. Auf diese Weise lassen sich vergleichsweise leichte und/oder kleine Massekörper verwenden, sodass das zum Halten notwendige Magnetfeld ebenfalls vergleichsweise klein sein kann. Günstig ist es, wenn die Masse des Massekörpers kleiner ist als 10 Gramm.

[0019] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform hat die Haltevorrichtung einer Haltevorrichtung-Außenkontur, die zumindest im Bereich der Einschnürungen komplementär zu einer Massekörper-Außenkontur des Massekörpers ist, sodass die Haltevorrichtung den Massekörper bezüglich aller Translationsfreiheitsgrade hält. Vorzugsweise hält die Haltevorrichtung den Massekörper zudem bezüglich von zwei Rotationsfreiheitsgraden. In diesem Fall kann der Massekörper relativ zur Haltevorrichtung lediglich um eine Drehachse rotieren, bei der es sich vorzugsweise um die Drehsymmetrieachse handelt.

[0020] Vorzugsweise umfasst die Positions-Erfassungsvorrichtung eine Mess-Spule, die mit einem supraleitenden Quanteninterferenzdetektor gekoppelt ist. Bei dem Quanteninterferenzdetektor handelt es sich um ein Detektor auf Basis des Josephson-Effekts. Derartige Vorrichtungen werden im Englischen als SQUiD (superconducting quantum interference device) bezeichnet.

[0021] Das Gravimeter besitzt vorzugsweise eine Auswertevorrichtung, die mit der Positions-Erfassungsvorrichtung gekoppelt ist und ausgebildet ist zum automatischen Berechnen der auf den Massekörper wirkenden Beschleunigung a , insbesondere der Erdbeschleunigung g , anhand von Messdaten der Positions-Erfassungsvorrichtung.

[0022] Besonders günstig ist es, wenn die Auswertevorrichtung ausgebildet ist zum automatischen Regeln der Position des Massekörpers auf die vorbestimmte Position durch Verändern einer Rückstellkraft und Berechnen der auf den Massekörper wirkenden Beschleunigung anhand der Rückstellkraft. Beispielsweise erfolgt das Verändern der Rückstellkraft durch Verändern eines Stromflusses durch eine gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorhandene Spule, die mit einem Magnetfeld des Massekör-

pers zusammenwirkt. Alternativ oder zusätzlich kann das Verändern der Rückstellkraft auch ein Verändern eines elektrischen Felds zwischen dem Massekörper und der Haltevorrichtung oder einem sonstigen Bestandteil des Gravimeters erfolgen.

[0023] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 mit den **Fig. 1a** und **Fig. 1b** zwei Querschnitte durch ein erfindungsgemäßes Gravimeter und

Fig. 2 eine schematische Zeichnung der Messspulen des Gravimeters gemäß **Fig. 1**.

[0024] **Fig. 1** zeigt in der **Fig. 1b** ein erfindungsgemäßes Gravimeter **10** welches eine Haltevorrichtung **14** aufweist. Die Haltevorrichtung **14** umfasst im vorliegenden Fall zwei Levitationsspulen **16, 16.2** die supraleitend sind. Das Gravimeter **10** besitzt zudem eine Positions-Erfassungsvorrichtung **18**, die eine erste Mess-Spule **20** und eine zweite Mess-Spule **20** aufweist.

[0025] **Fig. 1a** zeigt der Übersichtlichkeit halber das Gravimeter **10** ohne die Haltevorrichtung. Es ist zu erkennen, dass der Massekörper **12** eine Einschnürung **22** besitzt, die auch als Taille bezeichnet werden könnte. In anderen Worten besitzt der Massekörper **12** eine Massekörper-Außenkontur K_{12} , die in der Umgebung der Haltevorrichtung **14** konkav ausgebildet ist. Der Massekörper **12** ist zudem drehsymmetrisch bezüglich einer Drehachse **D**. Im vorliegenden Fall hat der Massekörper **12** zudem eine Spiegelsymmetrie bezüglich einer Symmetrieebene **S**, die senkrecht zur Drehachse **D** verläuft.

[0026] Die schematische Struktur des Massekörpers **12** ist in **Fig. 2** schematisch gezeigt. Es ist zu erkennen, dass der Massekörper doppelkegelstumpfförmig ausgebildet ist und einen Öffnungswinkel α von 90° aufweist. Wenn im Rahmen dieser Beschreibung davon gesprochen wird, dass der Massekörper im Bereich der Einschnürung doppelkegelstumpfförmig ausgebildet ist, so ist darunter zu verstehen, dass die Massekörper-Außenkontur K_{12} im technischen Sinne eine Kegelstumpfform besitzt. Das heißt, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Massekörper-Außenkontur K_{12} im streng mathematischen Sinne kegelstumpfförmig ist. Vielmehr ist es möglich und in der Regel technisch unvermeidbar, dass die Massekörper-Außenkontur von der idealen Doppelkegelstumpfform abweicht.

[0027] **Fig. 1a** zeigt schematisch, dass der Massekörper **12** eine Beschichtung **24** aus einem supraleitenden Material, in den vorliegenden Fall aus Niob, aufweist. Die Levitationsspulen **16, 16.2** (**Fig. 1b**) haben eine Haltevorrichtung-Außenkontur K_{14} die komplementär zur Massekörper-Außenkontur K_{12} ist. Ein

Spalt zwischen beiden ist daher an allen Stellen im Wesentlichen gleichgroß. Durch die magnetische Abstoßung wird der Massekörper **12** relativ zur Haltevorrichtung **14** in einer stabilen Lage gehalten.

[0028] Fig. 1b zeigt einen weiteren Vorteil des erfindungsgemäßen Gravimeters. Auch wenn das Gravimeter **10** um 90° verkippt wird, so bleibt der Massekörper **12** noch immer stabil von der Haltevorrichtung **14** gehalten und setzt nicht auf ihr auf.

[0029] Fig. 2 zeigt schematisch die Verschaltung der beiden Mess-Spulen 20, 20.2. Diese sind mit einer Stromquelle **26** und einem supraleitenden Quanteninterferenzdetektor (SQUID, englisch für Superconducting Quantum Interference Device) **28** in einem Kreis geschaltet. Ändert sich die Lage des Massekörpers **12** so ändert sich das Magnetfeld in den beiden Mess-Spulen 20, 20.2, womit ein magnetfeldabhängiger elektrischer Kreisstrom angeregt wird. Durch die Verwendung des Quanteninterferenzdetektors **28** fällt an diesem eine messbare elektrische Spannung ab, mit der die Veränderung der Lage des Massekörpers **12** hochgenau bestimmt wird. Dazu ist der Quanteninterferenzdetektor **28** mit einer schematisch eingezeichneten Auswertevorrichtung **30** verbunden, die aus den vom Quanteninterferenzdetektor **28** gemessenen Messdaten die Lage des Messkörpers **12** relativ zur Haltevorrichtung **14** bestimmt.

[0030] In den Figuren nicht eingezeichnet ist eine Bestromungseinheit für die Haltevorrichtung **14**, mittels der ein Strom in die supraleitenden Levitationsspulen 16, 16.2 eingepreßt werden kann.

Bezugszeichenliste

10	Gravimeter
12	Massekörper
14	Haltevorrichtung
16	Levitationsspule
18	Positions-Erfassungsvorrichtung
20	Mess-Spule
22	Einschnürung
24	Beschichtung
26	Stromquelle
28	SQUID
30	Auswertevorrichtung
K₁₂	Massekörper-Außenkontur
K₁₄	Haltevorrichtung-Außenkontur

D	Drehachse
S	Symmetrieachse
α	Öffnungswinkel

Patentansprüche

1. Gravimeter (10) mit
 (a) einem Massekörper (12),
 (b) einer Haltevorrichtung (14) zum Halten des Massekörpers (12) an einer vorbestimmten Position und
 (c) einer Positions-Erfassungsvorrichtung (18) zum Erfassen der Position des Massekörpers (12), wobei
 (d) der Massekörper (12) eine Einschnürung (22) besitzt, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (e) der Massekörper (12) zumindest im Bereich der Einschnürung (22) doppelkegelstumpfförmig ausgebildet ist.

2. Gravimeter (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - der Massekörper (12), insbesondere auf seiner Oberfläche, ein supraleitendes Material enthält und
 - die Haltevorrichtung (14) eine supraleitende Levitationsspule zum Erzeugen eines Magnetfelds, das den Massekörper (12) an der vorbestimmten Position hält, aufweist.

3. Gravimeter (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Haltevorrichtung (14) eine Haltevorrichtung-Außenkontur (K_{14}) hat, die komplementär zu einer Massekörper-Außenkontur (K_{12}) des Massekörpers (12) ist, so dass die Haltevorrichtung (14) den Massekörper (12) bezüglich aller Translationsfreiheitsgrade, insbesondere zudem bezüglich von zwei Rotationsfreiheitsgraden, hält.

4. Gravimeter (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Positions-Erfassungsvorrichtung (18) zumindest eine Mess-Spule (20.1, 20.2) aufweist, die mit einem supraleitenden Quanteninterferenzdetektor (28) gekoppelt ist.

5. Gravimeter (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Auswertevorrichtung (30), die
 - mit der Positions-Erfassungsvorrichtung (18) gekoppelt ist und
 - ausgebildet ist zum automatischen Berechnen der auf den Massekörper (12) wirkenden Beschleunigung (g) anhand von Messdaten der Positions-Erfassungsvorrichtung (18).

6. Gravimeter (10) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswertevorrichtung (30) ausgebildet ist zum automatischen

- Regeln der Position des Massekörpers (12) auf die vorbestimmte Position durch Verändern einer Rückstellkraft und
- Berechnen der auf den Massekörper (12) wirkenden Beschleunigung (g) anhand der Rückstellkraft.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

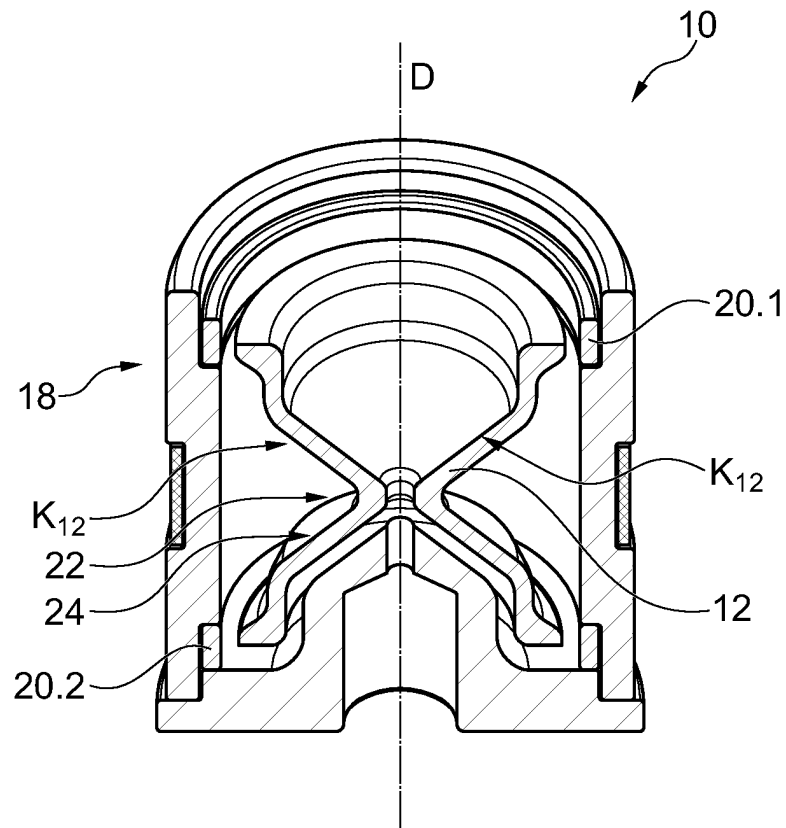


Fig. 1a

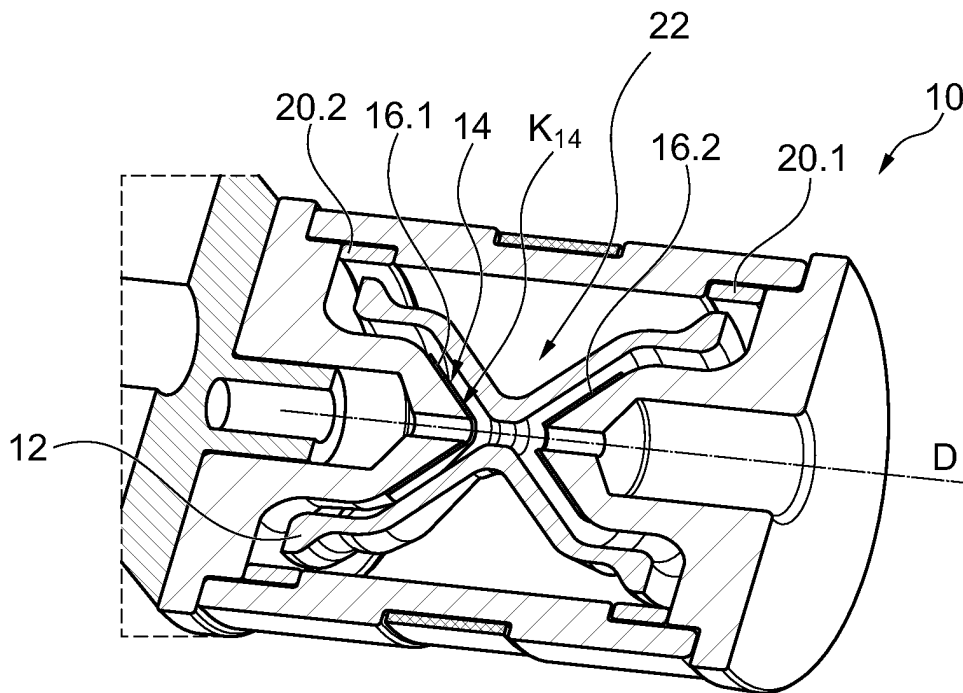


Fig. 1b

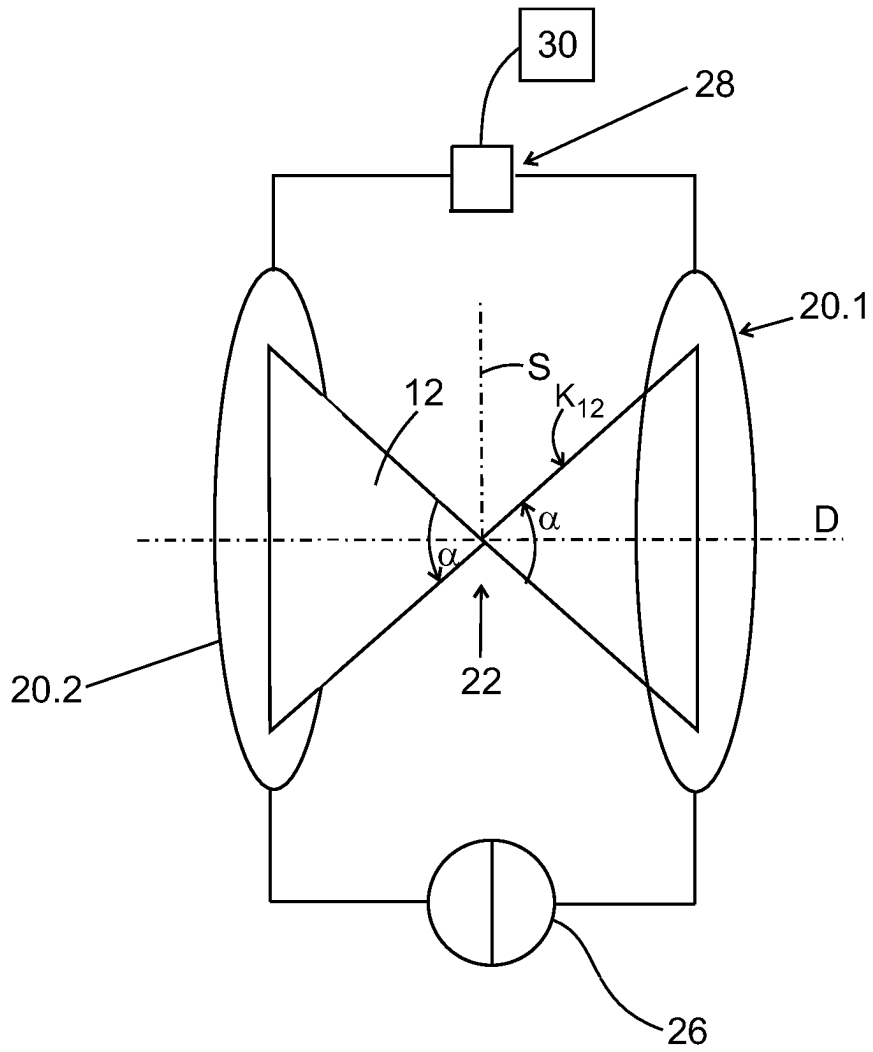


Fig.2