



(10) **DE 10 2014 011 670 B3** 2015.10.15

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 011 670.0**

(22) Anmeldetag: **05.08.2014**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **15.10.2015**

(51) Int Cl.: **G01K 7/30 (2006.01)**

**G01R 33/035 (2006.01)**

**G01K 7/36 (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, vertr. durch das  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,  
dieses vertreten durch den Präsidenten der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116  
Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:

**Gramm, Lins & Partner Patent- und  
Rechtsanwälte PartGmbH, 38122 Braunschweig,  
DE**

(72) Erfinder:

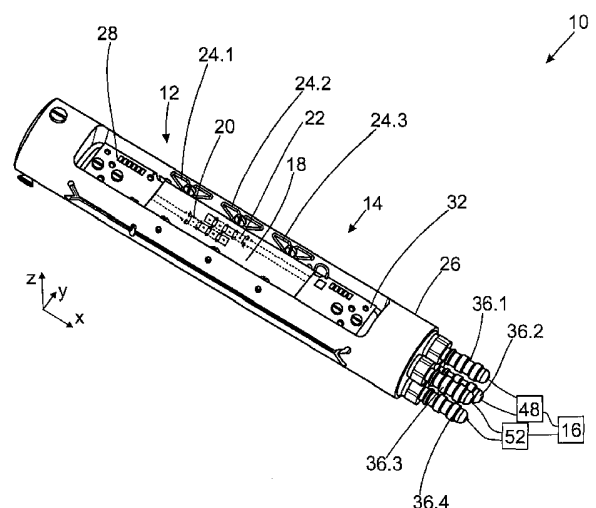
**Kirste, Alexander, Dr., 13189 Berlin, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

<b>DE</b>	<b>102 26 619</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>697 32 093</b>	<b>T2</b>
<b>DE</b>	<b>699 35 189</b>	<b>T2</b>

(54) Bezeichnung: **Magnetfeldfluktuationsthermometer**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) mit einem Sensorelement (38), in dem thermische Stromfluktuationen zu einem von außen messbaren Magnetfeld führen, einem ersten Gradiometer (12), das in einem ersten Abstand ( $z_1$ ) vom Sensorelement (38) angeordnet ist und eine erste Detektionsspule (20) und einen ersten SQUID-Stromsensor (30) zum Abgeben einer zum magnetischen Fluss ( $\Phi_1$ ) durch die erste Detektionsspule (20) proportionalen ersten Spannung ( $V_{FLL,1}$ ) umfasst, einem zweiten Gradiometer (14), das in einem zweiten Abstand ( $z_2$ ) vom Sensorelement (38) angeordnet ist und eine zweite Detektionsspule (22) und einen zweiten SQUID-Stromsensor (34) zum Abgeben einer zum magnetischen Fluss ( $\Phi_2$ ) durch die zweite Detektionsspule (22) proportionalen zweiten Spannung ( $V_{FLL,2}$ ) umfasst, und einer -Berechnungseinheit (16) zum Berechnen der Temperatur (T) des Sensorelements (38) aus einer Kreuz-Leistungsdichte ( $S_\phi$ ) der ersten Spannung ( $V_{FLL,1}$ ) und der zweiten Spannung ( $V_{FLL,2}$ ).



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Magnetfeldfluktuationsthermometer. Magnetfeldfluktuationsthermometer, die auch als MFFT (englisch: magnetic field fluctuation thermometer, Magnetfeldfluktuationsthermometer) bekannt sind, sind Rauschthermometer, die als primäre Thermometer betrieben werden können. Unter einem primären Thermometer wird ein Thermometer verstanden, das die absolute Temperatur direkt misst, das heißt ohne Kalibrierung auf einen vorgegebenen Fixpunkt.

**[0002]** Ein Magnetfeldfluktuationsthermometer nutzt thermisch aktivierte elektrische Rauschströme innerhalb eines elektrischen Leiters, die zu einem schwankenden magnetischen Feld an der Oberfläche des Leiters führen. Diese schwankenden Magnetfelder können mit einem SQUID (englisch: superconducting quantum interference device, supraleitender Quanteninterferenz-Detektor) mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Der SQUID erfasst das rauschende magnetische Feld als thermisches Rauschen des magnetischen Flusses.

**[0003]** Damit das Magnetfeldfluktuationsthermometer als primäres Thermometer verwendet werden kann, muss der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem gemessenen Rauschen des magnetischen Flusses theoretisch bekannt sein. Die entsprechende Rechnung setzt oft voraus, dass die Detektorspule, mit der das Magnetfeld erfasst wird, durch einen beliebig dünnen Leiter gebildet ist. Wird jedoch ein sehr dünner Leiter für die Detektionsspule verwendet, führt dies zu einem erhöhten nicht-thermischen Rauschen und damit zu einem schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das wiederum führt dazu, dass das Magnetfeldfluktuationsthermometer bei tiefen Temperaturen eine nur geringe Messgenauigkeit aufweist.

**[0004]** Aus der DE 699 35 189 T2 ist ein Tieftemperaturthermometer bekannt, welches die Temperatur auf Basis des Rauschstroms in einem Widerstand erfasst. Dazu ist ein Satz an superleitenden Spulen vorhanden, die in Reihe zwischen diesem Widerstand und einem Gleichstrom-SQUID geschaltet. Mittels des Gleichstrom-SQUIDs wird der Rauschstrom im Widerstand gemessen. Bei niedrigen Frequenzen eines angelegten Wechselstroms ist die Rauschstromdichte proportional zur Temperatur, sodass durch Messen der Rauschstromdichte die Temperatur gemessen werden kann.

**[0005]** Aus der DE 102 26 619 A1 ist ein Rauschthermometer bekannt, das einen Schwingkreis aufweist. Durch die Verwendung des Schwingkreises wird die mittlere Rauschspannung in einem zum Messen verwendeten ohmschen Widerstand proportional zum Kehrwert aus dem Produkt des ohmschen Widerstands und der Kapazität des Kondensators des Schwingkreises. Da das Rauschsignal zudem proportional zum ohmschen Widerstand ist, kann der Einfluss des ohmschen Widerstands eliminiert werden. Schwankungen im Herstellungsprozess des ohmschen Widerstands schlagen so nicht auf das Messergebnis durch. Ein derartiges Rauschthermometer ist für sehr tiefe Temperaturen und zur Rückführung der Temperaturmessung auf Naturkonstanten nicht geeignet.

**[0006]** Aus der DE 697 32 093 T2 wird eine Vorrichtung beschrieben, mittels der bei Raumtemperatur mittels eines SQUIDs beispielsweise Risse orts aufgelöst vermessen werden können. Hochgenaue Temperaturmessungen, die auf Naturkonstanten zurückgeführt werden können, sind mit dieser Vorrichtung nicht möglich.

**[0007]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein verbessertes Magnetfeldfluktuationsthermometer vorzuschlagen.

**[0008]** Die Erfindung löst das Problem durch ein Magnetfeldfluktuationsthermometer, das mit (a) einem Sensorelement, in dem thermische Stromfluktuationen zu einem von außen messbaren Magnetfeld führen, (b) einem ersten Gradiometer, das in einem ersten Abstand vom Sensorelement angeordnet ist und eine erste Detektionsspule und einen ersten SQUID-Stromsensor zum Abgeben einer zum magnetischen Fluss durch die erste Detektionsspule proportionalen ersten Spannung umfasst, (c) einem zweiten Gradiometer, das in einem zweiten Abstand vom Sensorelement angeordnet ist und eine zweite Detektionsspule und einen zweiten SQUID-Stromsensor zum Abgeben einer zum magnetischen Fluss durch die zweite Detektionsspule proportionalen zweiten Spannung umfasst, und einer Temperatur-Berechnungseinheit zum Berechnen der Temperatur des Sensorelements aus einer Kreuz-Leistungsdichte der ersten Spannung mit der zweiten Spannung.

**[0009]** Vorteilhaft an diesen Magnetfeldfluktuationsthermometer ist, dass es mit geringer Messunsicherheit als primäres Thermometer bei tiefen Temperaturen einsetzbar ist. Durch die Berechnung der Temperatur aus der Kreuz-Leistungsdichte können nichtthermische Rauschanteile stark reduziert werden. Das ermöglicht es, eine Leiterbreite der Leiter, aus denen die Detektionsspulen aufgebaut sind, so klein zu wählen, dass die Näherung als eindimensionales, also ideal fadenförmiges, Objekt möglich ist, sodass Feldverzerrungen durch

supraleitende Strukturen vernachlässigt werden können. Das führt zu einer geringen systematischen Messunsicherheit. Auf diese Weise wird der Zusammenhang zwischen der absoluten Temperatur und der spektralen Leistungsdichte des thermischen Magnetfeldrauschens wie folgt analytisch berechenbar.

**[0010]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Sensorelement insbesondere ein metallischer Körper verstanden, insbesondere ein Körper aus Kupfer. Das Kupfer hat vorzugsweise eine Reinheit von zumindest 99,99%.

**[0011]** Günstig ist es, wenn das Sensorelement zumindest an der Stelle, die dem ersten Gradiometer und dem zweiten Gradiometer benachbart ist, eine plane Oberfläche besitzt.

**[0012]** Unter dem Merkmal, dass das erste Gradiometer in einem ersten Abstand vom Sensorelement angeordnet ist, wird insbesondere verstanden, dass ein Abstand angebbar ist, anhand dessen die Abhängigkeit der spektralen Leistungsdichte des thermischen Magnetfeldrauschens aus der Temperatur berechenbar ist. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass der erste Abstand und der zweite Abstand verschieden sind.

**[0013]** Ein Gradiometer ist eine aus mehreren Teilspulen (Leiterelementen) zusammengesetzte Spule, die geeignet ist, einen Magnetfeldgradienten zu detektieren, während homogene Magnetfelder (homogene Magnetfeldanteile) nicht zum Signal beitragen. Bei Serien-Gradiometern sind die Teilspulen dann flächengleich (unter Berücksichtigung der Windungszahlen) und mit entgegengesetztem Wicklungssinn, aber nicht notwendigerweise identisch in der Form.

**[0014]** Vorteilhaft ist zudem, dass mit dem erfindungsgemäßen Magnetfeldfluktuationsthermometer eine Messgenauigkeit von zumindest 3%, insbesondere von 1% erreichbar, bei einem Millikelvin erreichbar ist. Damit ist die Messgenauigkeit gegenüber bestehenden Temperaturskalen halbierbar.

**[0015]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der erste SQUID-Stromsensor ein erstes SQUID-Element und eine erste elektronische Schaltung, die ausgebildet ist zum Konstant-Halten des elektrischen Stroms, der durch das erste SQUID-Element fließt. Alternativ oder zusätzlich umfasst der zweite SQUID-Stromsensor ein zweites SQUID-Element und eine zweite elektronische Schaltung, die ausgebildet ist zum Konstant-Halten des elektrischen Stroms, der durch das zweite SQUID-Element fließt. Dieser elektrische Strom kann null sein, was bevorzugt ist, oder von null verschieden sein.

**[0016]** Es ist möglich, dass die elektronische Schaltung zum Betreiben bei Raumtemperatur ausgebildet ist. Es ist damit entbehrlich, dass die elektronische Schaltung tieftemperaturtauglich sein muss. Das ermöglicht einen einfachen Aufbau der elektronischen Schaltung. Durch das Berechnen der Temperatur aus der Kreuz-Leistungsdichte kommt es auch dann nicht zu einer deutlichen Zunahme der Messunsicherheit, wenn die elektronische Schaltung bei Raumtemperatur betrieben wird.

**[0017]** Vorzugsweise sind die erste elektronische Schaltung und die zweite elektronische Schaltung so ausgebildet, dass ihr thermisches Rauschen unkorreliert ist. Dadurch werden die unvermeidlich auftretenden nichtthermischen Rauschanteile beim Berechnen der Kreuz-Leistungsdichte unterdrückt, was das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessert.

**[0018]** Vorzugsweise sind das erste Gradiometer und das zweite Gradiometer so angeordnet, dass sie voneinander weitgehend entkoppelt sind. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass eine Änderung einer elektrischen Größe, insbesondere des elektrischen Stroms, in einem Gradiometer die zum magnetischen Fluss proportionale Spannung im anderen Gradiometer nicht beeinflusst. Dadurch sind die beiden Gradiometer entkoppelt und ein Rauschen, das nicht vom Sensorelement stammt, wird durch das Berechnen der Kreuzkorrelation zumindest für lange Messzeiten eliminiert.

**[0019]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind die erste Detektionsspule und die zweite Detektionsspule durch Schichten auf einem Chip gebildet. Beispielsweise umfasst die erste Detektorsspule und/oder die zweite Detektorsspule Dünnschichtleiter, insbesondere Niob-Dünnschichtleiter. Die Dünnschichtleiter können mittels Fotolithographie hergestellt sein. Der Chip hat ein Substrat, das beispielsweise ein Silizium- oder ein Saphir-Wafer ist.

**[0020]** Vorzugsweise haben die Detektionsspulen eine Rotationssymmetrie. Das heißt, dass sie sich entlang einer geometrischen Figur erstrecken, die durch Drehung um einen vorgegebenen Drehwinkel auf sich selbst abgebildet wird. Selbstverständlich müssen die Detektionsspulen kontaktiert sein und können daher nicht im

streng mathematischen Sinne symmetrisch sein, da die Kontaktstelle einen Symmetriebruch darstellt. Unter der geometrischen Struktur wird daher die Abstraktion der Kontur der Detektionsspule verstanden, die insbesondere den Bereich der Kontaktierung außer Betracht lässt. Besonders günstig ist es, wenn die Detektionsspulen in diesem Sinne rotationssymmetrisch, insbesondere kreisförmig sind.

**[0021]** Günstig ist es, wenn der erste Abstand und/oder der zweite Abstand höchstens 150 Mikrometer betragen. Da das Magnetfeld mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche des Sensorelements schwächer wird, ist ein geringer Abstand vorteilhaft. Besonders günstig ist es, wenn die Detektionsspulen auf einem Chip aufgebracht sind. In diesem Fall ist der Abstand der Detektionsspulen vom Sensorelement mit hoher Genauigkeit bestimmbar. Auf den Chip aufgebrachte Spulen erlauben einen sehr geringen Abstand zwischen Sensorelement und Spulen, der an eine Berührung von Sensorelement und Detektionsspulen grenzt.

**[0022]** Besonders günstig ist es, wenn die erste Detektionsspule aus einem Leiter aufgebaut ist, der eine Leiterbreite von höchstens 10 Mikrometer, insbesondere höchstens 5 Mikrometer, hat. Besonders günstig ist es, wenn die Leiterbreite kleiner ist als 3 Mikrometer. Je geringer die Leiterbreite ist, desto eher trifft die Näherung zu, dass der Leiter eindimensional ist. Die angegebene geringe Leiterbreite führt daher zu einer geringen systematischen Messunsicherheit aufgrund der Näherung des Leiters als eindimensionales Objekt.

**[0023]** Vorzugsweise hat die erste Detektorspule einen ersten effektiven Spulendurchmesser und einen ersten Spulenmittelpunkt und die zweite Detektorspule hat einen zweiten effektiven Spulendurchmesser und einen zweiten Spulenmittelpunkt, wobei ein Abstand zwischen dem ersten Spulenmittelpunkt und dem zweiten Spulenmittelpunkt höchstens das 10-fache des Minimums aus dem ersten effektiven Spulendurchmesser und zweitem effektiven Spulendurchmesser beträgt. In diesem Fall erfassen beide Detektionsspulen im Wesentlichen das gleiche Magnetfeld des Sensorelements, so dass sich aufgrund der Berechnung der Kreuz-Leistungsdichte ein großes Messsignal ergibt, was zu einem geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnis führt.

**[0024]** Unter dem effektiven Spulendurchmesser wird der Kreisdurchmesser verstanden, wenn die Detektionsspule kreisförmig im technischen Sinne ist. Ist die jeweilige Spule nicht kreisförmig, so ist der effektive Spulendurchmesser der Durchmesser eines Kreises gleicher Querschnittsfläche.

**[0025]** Vorzugsweise beträgt die Leiterbreite höchstens ein Zehntel des Minimums aus dem ersten effektiven Spulendurchmesser und zweitem effektiven Spulendurchmesser. Alternativ oder zusätzlich beträgt die Leiterbreite höchstens ein Zehntel des Minimums aus erstem Abstand und zweitem Abstand. Alternativ oder zusätzlich beträgt die Leiterbreite höchstens ein Zehntel der Dicke des Sensorelements am Ort der ersten Detektorspule und am Ort der zweiten Detektorspule. Die angegebenen Eigenschaften der Leiterbreite führen dazu, dass der Leiter als in guter Näherung eindimensional betrachtet werden kann. Das vermindert die systematische Messunsicherheit.

**[0026]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Magnetfeldfluktuationsthermometer einen Spektrumanalysator zur Bestimmung der Kreuz-Leistungsdichte der Spannungen. Der Spektrumanalysator ist beispielsweise ein FFT-Spektrumanalysator, insbesondere ein zweikanal-FFT-Spektrumanalysator. Dieses Gerät gibt die spektrale Kreuz-Leistungsdichte direkt aus.

**[0027]** Vorzugsweise umfasst das Magnetfeldfluktuationsthermometer eine Kalibrierspule, die so relativ zu den Detektionsspulen und dem Sensorelement angeordnet ist, dass ein vorgegebener elektrischer Strom durch die Kalibrierspule zu einem mit einer Unsicherheit von höchstens 0,1% bekannten magnetischen Fluss in den Detektionsspulen führt. Es ist dann möglich, das erste Gradiometer und das zweite Gradiometer durch Anlegen eines elektrischen Stroms an die Kalibrierspulen zu kalibrieren.

**[0028]** In diesem Fall ist es günstig, wenn die Berechnungseinheit einen Spektrum-Analysator und eine steuerbare Gleichstrom-Wechselstromquelle umfasst. Die Kalibrierspule ist nur an die Gleichstrom-Wechselstromquelle angeschlossen. Die Berechnungseinheit kann in diesem Fall auch Ansteuereinheit oder Steuer- und Auswerteeinheit genannt werden.

**[0029]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

**[0030]** Fig. 1 eine dreidimensionale Ansicht in ein geöffnetes Magnetfeldfluktuationsthermometer gemäß der vorliegenden Erfindung,

**[0031]** Fig. 2 einen Querschnitt durch das Magnetfeldfluktuationsthermometer gemäß Fig. 1,

[0032] Fig. 3 ein Schaltbild des Magnetfeldfluktuationsthermometers,

[0033] Fig. 4a ein Ersatzschaltbild einer Detektionsspule eines erfindungsgemäßen Magnetfeldfluktuationsthermometers,

[0034] Fig. 4b eine alternative Ausführungsform einer Detektionsspule,

[0035] Fig. 4c eine Anordnung bzw. Verschaltung der Gradiometer der beiden Detektionsspulen und

[0036] Fig. 5 ein Ersatzschaltbild einer Kalibrierspule eines erfindungsgemäßen Magnetfeldfluktuationsthermometers. Die

[0037] Fig. 6a, Fig. 6b, Fig. 6c, Fig. 6d zeigen mögliche Geometrien von Detektionsspulen, die

[0038] Fig. 7 zeigt eine Ansicht auf Detektionsspulen von oben auf den Chip und

[0039] Fig. 8 ist eine Schemazeichnung zur Erläuterung der Herleitung der Formel für die Auswertung des Messergebnisses.

[0040] Fig. 1 zeigt ein erfindungsgemäßes Magnetfeldfluktuationsthermometer **10**, das ein erstes Gradiometer **12** und ein zweites Gradiometer **14** sowie eine Berechnungseinheit **16** umfasst, die schematisch eingezeichnet ist.

[0041] Das erste Gradiometer **12** umfasst einen Chip **18**, auf den auf seine in Fig. 1 nach unten weisende Seite eine erste Detektionsspule **20** in Dünnschichttechnik aufgebracht ist. Der Chip **18** ist zudem Teil des zweiten Gradiometers **14** und trägt eine zweite Detektionsstufe **22**, die ebenfalls in Fig. 1 nach unten weist und daher gestrichelt eingezeichnet ist.

[0042] Der Chip **18** ist mittels Federn **24.1**, **24.2**, **24.3** an einem Gehäuse **26** festgespannt. Die Federn sind aus einer Kupferlegierung gefertigt, im vorliegenden Fall aus CuSn6. Das Gehäuse **26** ist aus hochreinem Kupfer gefertigt und hat eine Reinheit von vorzugsweise mehr als 99,99%, im vorliegenden Fall 99,9998%. Das hochreine Kupfer hat den Vorteil, dass magnetische Ionen im Kristallgitter nur in äußerst geringen Konzentrationen auftreten können, und das Messsignal nicht durch nicht-thermisch-elektronische Beiträge beeinflussen können.

[0043] Das erste Gradiometer **14** umfasst eine erste Platine **28**. Auf einem Silizium-Chip ist in Dünnschichttechnik ein erster SQUID-Stromsensor **30** (siehe Fig. 2) aufgebracht ist, wobei der Chip auf der Platine **28** befestigt ist. Mit dem ersten SQUID-Stromsensor **30** ist ein Strom erfassbar, der durch die erste Detektionsspule **20** fließt. Die genaue Verschaltung ist in Fig. 3 gezeigt. Das zweite Gradiometer **14** besitzt eine zweite Platine **32**, auf die ein zweiter SQUID-Stromsensor **34** (siehe Fig. 2) aufgebracht ist.

[0044] Der erste SQUID-Stromsensor **30** ist über zwei Anschlüsse **36.1**, **36.2** mit einer ersten Schaltung **48**, der zweite SQUID-Stromsensor ist über zwei Anschlüsse **36.3**, **36.4** mit einer zweiten Schaltung **52** verbunden. Dass zwei Anschlüsse existieren, bedeutet aber nicht, dass nur zwei Verbindungsleiter existieren. So existieren Leitungen für die SQUID-Spannung, den SQUID-Bias, ein Feedback und gegebenenfalls weitere Leitungen. Es würde zudem ein einziger Anschluss für ein Leitungsbündel ausreichen. Die beiden Schaltungen **48**, **52** sind ihrerseits mit der Berechnungseinheit **16** verbunden. Es ist möglich, dass die Schaltungen **48**, **52** und die Berechnungseinheit **16** zu einer Auswerteeinheit zusammengefasst sind.

[0045] Fig. 2 zeigt das Magnetfeldfluktuationsthermometer **10** in einem Querschnitt. Es ist zu erkennen, dass es ein Sensorelement **38** umfasst, das benachbart zum Chip **18** angeordnet ist. Das Sensorelement **38** ist aus hochreinem Kupfer, das im vorliegenden Fall eine Reinheit von mehr als 99,9998% hat.

[0046] Der Abstand zwischen dem Sensorelement und den Gradiometern wird bei der Fertigung des Gehäuses **26** festgelegt. Wenn das Gehäuse **26** wie in einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen zumindest im Wesentlichen spiegelsymmetrisch ist, können erster Chip **18** mit Detektionsspulen **20**, **2** und zweiter Chip **40** mit Kalibrierspule **42** vertauscht werden. Das Gehäuse ist so aufgebaut, dass die Abstände zwischen Chips und Sensorelement **38** frei vorgegeben werden können. Günstigerweise werden dann zwei unterschiedliche Abstände gewählt, so dass es beim Einbau der Chips zwei Möglichkeiten gibt. Die Abstände sind beispielsweise durch einen erhöhten, umlaufenden Rand der Chips **18**, **40** vorgegeben.

[0047] Das Sensorelement **38** ist der Teil des Magnetfeldfluktuationsthermometers **10**, dessen Temperatur das Messergebnis bestimmt, und hat eine Dicke  $t$  und einen Abstand  $z_1$  zur ersten Detektionsspule.

[0048] Das Magnetfeldfluktuationsthermometer **10** umfasst einen zweiten Chip **40**, auf den eine Kalibrierspule **42** in Dünnschichttechnik aufgebracht ist. Die Kalibrierspule **42** ist dem Sensorelement **38** zugewandt. Es ist zu erkennen, dass das Sensorelement **38** zwischen dem Chip **18** und dem zweiten Chip **40** angeordnet ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die Kalibrierspule **42** nur rein schematisch angedeutet ist, ein Schaltbild der genauen Ausgestaltung findet sich in **Fig. 5**. Es ist zu erkennen, dass der zweite Chip **40** durch Federn **24.4**, **24.5**, **24.6** fixiert ist. Die Kalibrierspule **42** ist elektrisch mit Leitern einer dritten Platine **44** verbunden. Die Kalibrierspule ist an eine Gleichstrom- oder Wechselstromquelle angeschlossen. Das ist jedoch nur für den Zeitraum der Kalibrierung notwendig.

[0049] **Fig. 3** zeigt ein Schaltbild des Magnetfeldfluktuationsthermometers. Die erste Detektionsspule **20** besteht aus mindestens zwei Teil-Spulen unterschiedlicher Wicklungsrichtungen. Auch die zweite Detektionsspule **22** besteht aus zwei Teil-Spulen unterschiedlicher Wicklungsorientierung. Die Anordnung der Teil-Spulen relativ zueinander ist in den **Fig. 4a** beziehungsweise **Fig. 4b** gezeigt.

[0050] Es ist zu erkennen, dass der erste SQUID-Stromsensor **30** ein erstes SQUID-Element **46** in Form von zwei Josephson-Kontakten und eine erste elektronische Schaltung **48** umfasst, die mit dem ersten SQUID-Element **46** verbunden ist. Das SQUID-Element kann ein oder zwei Josephson-Kontakte enthalten (RF-SQUID bzw. dc-SQUID). Im vorliegenden Fall wird ein DC-SQUID verwendet, der zwei Josephson-Kontakte besitzt.

[0051] Die elektronische Schaltung **48** ist eingerichtet zum Konstant-Halten eines elektrischen Stroms  $I_{46}$  im supraleitenden Eingangskreis des SQUID-Sensors und damit gleichzeitig auch in der ersten Detektionsspule **20**. Die erste elektronische Schaltung **48** gibt eine erste Spannung  $V_{FLL,1}$  ab, die proportional zum magnetischen Fluss  $\Phi_1$  durch die erste Detektorsspule **22** ist. Die elektronische Schaltung **48** ist dazu in Form einer Flussregelschleife mit dem ersten SQUID-Element **46** verbunden, die auch unter ihrer englischen Bezeichnung Flux Locked Loop (FLL) bekannt ist.

[0052] Gestrichelt ist eine weitere Verschaltung eingezeichnet, bei der die Rückkopplung direkt in das SQUID-Element erfolgt. Diese Art der Rückkopplung hat jedoch den Nachteil, dass der Flusstransfer von den Detektionsspulen in das jeweilige SQUID-Element frequenzabhängig wird. Der Grund hierfür ist die frequenzabhängige Induktivität der Detektionsspule aufgrund des Skin-Effekts im Sensorelement **38**, die die Gesamt-Induktivität beeinflusst. Die in durchgezogenen Linien gezeichnete Schaltung ist daher bevorzugt, bei der die Rückkopplung durch den integrierten Rückkopplungs-Trafo erfolgt. Das hat den Vorteil, dass die Wechselwirkung zwischen den beiden Detektionsspulen **20**, **22** und zwischen den Detektionsspulen einerseits und dem Sensorelement **38** andererseits innerhalb der Bandbreite der Flussregelschleife unterdrückt wird.

[0053] Der zweite SQUID-Stromsensor **34** ist so aufgebaut wie der erste SQUID-Stromsensor **30** und umfasst ein zweites SQUID-Element **50** und eine zweite elektronische Schaltung **52**, die so ausgebildet ist, dass sie eine zweite Spannung  $V_{FLL,2}$  abgibt, die proportional ist zum magnetischen Fluss  $\Phi_2$  durch die zweite Detektorsspule **22**.

[0054] Die Geometrie der Kalibrierspule **42** entspricht vorzugsweise der Geometrie von erster Detektionsspule **20** und/oder zweiter Detektionsspule **22**, so dass der magnetische Fluss  $\Phi$ , der durch die Kalibrierspule **42** aufgebaut wird, wenn ein Kalibrierstrom  $I_{cal}$  durch die Kalibrierspulen **42** fließt, berechnet werden kann. Wird die Kalibrierspule **42** mit einem Gleichstrom beaufschlagt, kann der Quotient zwischen dem magnetischen Fluss in den Detektionsspulen **20**, **22** und den Spannungen  $V_{FLL,1}$  und  $V_{FLL,2}$  bestimmt werden. Wird ein Wechselstrom an die Kalibrierspule **42** angelegt, so kann die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  des Sensorelements **38** bestimmt werden.

[0055] Die Leitfähigkeit ist implizit in der Gleichung (2) für den magnetischen Fluss enthalten ist. Diese Gleichung ist analytisch für rotationssymmetrische Spulensysteme lösbar. Die eigentliche Berechnung besteht dann in der Lösung der impliziten Gleichung für die Leitfähigkeit.

[0056] **Fig. 4a** zeigt ein Ersatzschaltbild für die erste Detektionsspule **20** und die zweite Detektionsspule **22**. Es ist zu erkennen, dass die erste Detektionsspule **20** eine erste Teilspule **54.1** und eine zweite Teilspule **54.2** aufweist und dass die zweite Detektionsspule **22** eine erste Teilspule **56.1** und eine zweite Teilspule **56.2** besitzt. Lediglich die ersten Teilspulen **54.1** und **56.1**, die oberhalb des schematisch eingezeichneten Sensorelements **38** angeordnet und gleich aufgebaut sind, messen das thermische Magnetflussrauschen. Die

ebenfalls gleich aufgebauten, zweiten Teilspulen **54.2**, **56.2** sind mit den jeweiligen ersten Teilspulen **54.1**, **56.1** in Serie geschaltet und dienen der Entkopplung von erster Detektionsspule **20** und zweiter Detektionsspule **22**.

[0057] Die Bezeichnungen D1, S1, D2 und S2 sind die Bezeichnungen der Bondpads. Die Leitungspaare S und D sind dabei parallel geschaltet, werden aber unterschiedlich angeschlossen: „S“ steht für Signal (Anschluss an den SQUID-Sensor (**30**, **34**)), „D“ steht für Dämpfung (Anschluss an die zusätzlichen RC-Dämpfungselemente, siehe Fig. 3). In Fig. 4a sind die Teilspulen **54.1**, **56.1** und **54.2**, **56.2**, koaxial zueinander angeordnet.

[0058] Fig. 4b zeigt die Anordnung der Teilspulen der Detektionsspulen **20**, **22**, die ein Gradiometer zweiter Ordnung bilden. Es ist möglich, die Struktur der Teilspulen periodisch fortzusetzen. Durch die periodische Fortsetzung der Gradiometer zweiter Ordnung kann die Induktivität der Detektionsspulen **20**, **22** sehr einfach skaliert werden. Damit ist eine gute Anpassung an die Eingangsinduktivität der SQUID-Sensoren **30**, **34** möglich. Außerdem gestattet dies die optimale Ausnutzung der Fläche des Sensorelements **38**, ohne die Teilspulen des Gradiometers zu stark skalieren (vergrößern) zu müssen.

[0059] Fig. 4c illustriert, welche Teil-Spulen der Detektionsspulen **20**, **22** einen Betrag zum Messergebnis liefern.

[0060] Fig. 5 zeigt ein Ersatzschaltbild der Kalibrierspule **42**. Auf dem Chip **40** sind zwei unabhängige Spulen, die die Fläche des Chips **40** optimal ausnutzen. Im Betrieb ist jeweils nur eine Spule angeschlossen und zwar die mit analoger Geometrie zur Detektionsspule **20**, **22**: (+/-I3, +/-J3) für Gradiometer zweiter Ordnung, (+/-I1, +/-J1) für die koaxialen Gradiometer. Dabei sind die Anschlüsse (+/-J1) bzw. (+/-J3) auf der Platine **44** kurzgeschlossen. In das verbleibende Anschlusspaar wird der Strom eingepreßt. Insgesamt sind die Zuleitungen der Kalibrierspule **42** damit auch gradiometrisch bezüglich der Detektionsspulen **20**, **22**.

[0061] Die Fig. 6a, Fig. 6b, Fig. 6c und Fig. 6d zeigen mögliche Anordnungen der Detektionsspulen **20**, **22**. In Fig. 6a sind die erste Detektionsspule **20** und die zweite Detektionsspule **22** übereinander angeordnet. Die Leiter **21**, die die Detektionsspulen bilden, sind aus Niob-Schichten gebildet, die lithografisch aufgebracht wurden. Eine Leiterbreite  $w$  der Leiter beträgt zwischen 2,5 Mikrometer und 5 Mikrometer. Der schematisch angedeutete Chip **18** hat eine Breite von 1 bis 15 Millimeter, insbesondere 13 Millimeter und eine Länge von 30 bis 60 Millimeter, insbesondere ungefähr 40 Millimeter. In Fig. 6a erstrecken sich die Leiter entlang eines Quadrats, die Detektionsspulen weisen daher eine 90°-Drehsymmetrie auf.

[0062] Fig. 6b zeigt eine attraktive Ausführungsform für die Detektionsspulen, die sich entlang eines gleichseitigen Sechsecks erstrecken.

[0063] Fig. 6c zeigt räumlich in der X-Y-Ebene beabstandete Detektorspulen **20**, **22**. Eingezeichnet sind schematisch die B-Feldlinien eines magnetischen Feldes, das entsteht, wenn die Detektionsspulen **20**, **22** von einem elektrischen Strom durchflossen sind. Diese Darstellungen dienen nur zur besseren Veranschaulichung der (internen) Verschaltung der Detektionsspulen. Für die eigentliche Anwendung sind sie so nicht praktikabel, da die Korrelation zu gering sein wird.

[0064] Fig. 6d zeigt eine weitere Ausführungsform von in der X-Y-Ebene separierten Detektionsspulen **20**, **22**, die sich entlang gleichseitiger Sechsecke erstrecken.

[0065] Fig. 7a zeigt zwei rotationssymmetrische Detektionsspulen, die jeweils ein Spulendurchmesser  $D_{20}$  beziehungsweise  $D_{22}$  und einen Spulenzentrum  $M_{20}$  beziehungsweise  $M_{22}$  haben. Ein Abstand  $d_M$  hat im vorliegenden Fall das 3,75-fache des Spulendurchmessers  $D_{20}$ .

[0066] Fig. 7b zeigt zwei Gradiometer zweiter Ordnung mit jeweils zwei Perioden.

[0067] Fig. 8 zeigt eine schematische Ansicht eines Sensorelements zur Erläuterung der folgenden Berechnung der spektralen Kreuz-Leistungsdichte (CPSD) des thermischen magnetischen Flussrauschens in den Detektionsspulen.

#### Theorie für eine unendlich ausgedehnte Platte

[0068] Betrachtet werde ein Modell für das Sensorelement **38** in Form eines beliebig geformten Volumenleiters mit linearer und isotroper elektrischer Leitfähigkeit  $\sigma$  bei der Temperatur  $T$ . Gemäß der Nyquist-Formel

für thermisches Rauschen ist der mittlere quadratische Kurzschlussstrom in y-Richtung in einem infinitesimal kleinen, rechteckigen Volumenelement in einem kleinen Frequenzintervall  $\Delta f$  durch  $\langle i_y^2 \rangle = (4k_B T / \Delta R_y) \Delta f$  gegeben, wobei  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist und  $\Delta R_y = \Delta y' / (\sigma \Delta x' \Delta z')$  der Widerstand des Volumenelements in y-Richtung. Mittels der Stromdipol-Komponente in y-Richtung,  $P_y = i_y \Delta y'$ , können wir die obige Gleichung auch schreiben als  $\langle P_y^2 \rangle = i_y^2 (\Delta y')^2 = 4\sigma k_B T \Delta x' \Delta y' \Delta z' \Delta f$ . Aufgrund der Isotropie gilt

$$\langle P_x^2 \rangle = \langle P_y^2 \rangle = \langle P_z^2 \rangle = 4\sigma k_B T \Delta V' \Delta f \quad (1)$$

mit  $\Delta V' = \Delta x' \Delta y' \Delta z'$ , so dass  $4\sigma k_B T$  die spektrale Dichte des Stromdipols im Einheitsvolumen in jeder Koordinatenrichtung (x, y, z) ist.

**[0069]** Das quadratische Mittel des Rauschens des magnetischen Flusses in einer Detektionsspule mit der Kontur  $c_1$  kann dann mit Hilfe einer frequenzabhängigen Responsefunktion  $g$  berechnet werden, die den Stromdipol  $P$  am Ort  $r'$  und den magnetischen Fluss  $\Phi$  in der Spule durch eine lineare Transformation  $\Phi = P(r') \cdot g(c_1, r', f)$  in Beziehung setzt. Nehmen wir an, dass die Rauschströme in allen Volumenelementen unkorreliert sind, so können die Rauschbeiträge aller Stromdipole durch Integration über das gesamte Leitervolumen  $V$  aufsummiert werden:

$$\langle \Phi^2(c_1) \rangle = \int_V 4\sigma k_B T \Delta f |g(c_1, r', f)|^2 dV' = S_{11} \Delta f \quad (2)$$

**[0070]**  $S_{11}$  ist die spektrale Leistungsdichte (engl. powerspectral density, PSD) des magnetischen Flusses  $\Phi$  in der Spule mit der Kontur  $c_1$ . Diese Gleichung kann verallgemeinert bzw. erweitert werden zur spektralen Kreuz-Leistungsdichte (engl. cross-power spectral density, CPSD)  $S_{12}$  für die Fluktuationen, die in zwei Spulen mit den Konturen  $c_1$  und  $c_2$  auftreten:

$$S_{12}(c_1, c_2) \Delta f = \int_V 4\sigma k_B T \Delta f g(c_1, r', f) \cdot g^*(c_2, r, f) dV' \quad (3)$$

**[0071]** Die Greensche Funktion  $g(c_j, r', t)$ ,  $j = 1, 2$ , wird analog zu Varpula T and Poutanen T 1984 J. Appl. Phys. 55 4015 bestimmt. Dafür wird zunächst das Vektorpotential  $A$  bestimmt, das mit einer zeitveränderlichen, eingepprägten Stromdichte  $J^i(t)$  im Volumenleiter verknüpft ist. Ausgehend von den Maxwell-Gleichungen in komplexer Zeiger-Schreibweise für eine Zeitabhängigkeit der Felder in der Form  $\exp(i\omega t)$  erhält man eine Wellengleichung für  $A$ , die in der quasistatischen Näherung zu einer Diffusionsgleichung für  $A$  vereinfacht werden kann:

$$\nabla^2 A - i\mu\sigma\omega A = -\mu(J' + \phi\nabla\sigma), \quad (4)$$

wobei  $\phi$  das elektrische Potential ist,  $\mu$  die magnetische Permeabilität und  $\omega = 2\pi f$ .

**[0072]** Lösungen dieser gekoppelten Differentialgleichungen für  $A$  und  $\phi$  sind im Allgemeinen schwer zu berechnen, jedoch kann das Problem eines Stromdipols in einer unendlich ausgedehnten Platte analytisch hergeleitet werden. Dazu wird ein Stromdipol  $P = P_y e_y$ , der sich am Ort  $r' = (x', y', -z')$  in einer unendlich ausgedehnten Platte mit der Dicke  $t$  und der konstanten Leitfähigkeit  $\sigma$  befindet, betrachtet, wie in **Fig. 8** dargestellt ist. Dabei ist  $J' = P_y \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z + z') e_y$  und  $\nabla\sigma = \sigma[\delta(z + t) - \delta(z)] e_z$ . Gleichung (4) impliziert nun, dass  $A$  nur zwei von Null verschiedene Komponenten besitzen kann, und zwar  $A_x$  und  $A_z$ . Im interessierenden Bereich  $z \geq 0$  wird  $B$  allein durch  $A_y$  bestimmt, während  $A_z$  nicht weiter betrachtet wird. Setzen wir  $J'$  in Gleichung (4) ein, erhalten wir

$$\nabla^2 A_y - k^2 A_y = \mu P_y \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z + z') \quad (5)$$

mit  $k^2 = i\mu\sigma\omega$ . Für die Lösung der Gleichung (5) wird der Raum in vier Bereich I-IV eingeteilt, wie in **Fig. 8** dargestellt ist. Die allgemeine Lösung im Bereich I über der Platte ( $z \geq 0$ ) lautet

$$A_{yI} = \frac{\mu P_y}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(a, b) e^{ia(x-x')} e^{ib(y-y')} e^{-\sqrt{a^2+b^2}z} da db \quad (6)$$

**[0073]**  $A(a, b)$  sowie fünf weitere Funktionen, die in der allgemeinen Lösung für die Bereiche II-IV auftreten, dienen dazu, die Randbedingungen für  $B$  zu erfüllen:  $A_y$  ist stetig an allen Grenzflächen, während  $\partial A_y / \partial z$  an allen Grenzflächen außer für II-III stetig ist. Dort gilt  $\partial A_{yII} / \partial z - \partial A_{yIII} / \partial z = \mu P_y \delta(x - x') \delta(y - y')$ . Wird das entsprechende  $6 \times 6$ -Gleichungssystem gelöst, so erhält man



$$A(a, b) = e^{-\rho^2 z} (\pi \rho')^{-1} (u + v e^{-2\rho'(t-z)}) (u^2 - v^2 e^{-2\rho' t})^{-1} \quad (7)$$

$$\rho^2 = a^2 + b^2, \rho'^2 = \rho^2 + k^2, u = 1 + \rho/\rho', v = 1 - \rho/\rho' \quad (8)$$

[0074] Da  $A_x = 0$  und  $A_z = \text{const.}$  sind, ergibt sich der magnetische Fluss durch die Kontur  $c_j = c_j(x_j, y_j, z_j)$ ,  $j = 1, 2$ , im Bereich I aus der Integration über Formel (6):

$$\Phi_j = \oint_{c_j} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r} = \oint_{c_j} A_{y1} dy_j \quad (9)$$

[0075] Hieraus lässt sich  $g_y$  ablesen als:

$$g_y(c_j, \mathbf{r}', f) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} A(a, b) \oint_{c_j} e^{ia(x_j-x')} e^{ib(y_j-y')} e^{-\sqrt{a^2+b^2}z_j} dy_j da db \quad (10)$$

[0076] In analoger Weise wird  $g_x$  aus einem Stromdipol  $\mathbf{P} = P_x \mathbf{e}_x$  abgeleitet. Die Komponente  $g_z$  verschwindet dagegen:  $g_z = 0$ .

[0077] Nachdem die Greensche Funktion  $g$  für einen (punktförmigen) Stromdipol in einer unendlich ausgehenden Platte abgeleitet wurde, kann die spektrale Kreuz-Leistungsdichte  $S_{12}(c_1, c_2)$  aus Gleichung (3) berechnet werden:

$$S_{12}(c_1, c_2) = 4\sigma k_B T \int_V (g_x(c_1, \dots) g_x^*(c_2, \dots) + g_y(c_1, \dots) g_y^*(c_2, \dots)) dV' \quad (11)$$

[0078] Dazu wird das Parsevalsche Theorem für die zweidimensionale Fouriertransformation verwendet, und wir erhalten schließlich die spektrale Kreuz-Leistungsdichte für zwei beliebige Konturen  $c_1$  und  $c_2$ :

$$S_{12}(c_1, c_2) = \mu^2 \sigma k_B T \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} |A(a, b)|^2 dz' (J_x(c_1) J_x^*(c_2) + J_y(c_1) J_y^*(c_2)) da db \quad (12a)$$

mit

$$J_x(c_j) = \oint_{c_j} e^{iax_j} e^{iby_j} e^{-\sqrt{a^2+b^2}z_j} dx_j \quad \text{und} \quad J_y(c_j) = \oint_{c_j} e^{iax_j} e^{iby_j} e^{-\sqrt{a^2+b^2}z_j} dy_j \quad (12b)$$

[0079] Das Integral von  $|A(a, b)|^2$  über  $z'$  kann in allen Fällen analytisch gelöst und in geschlossener Form dargestellt werden. Die Pfadintegrale  $J_x$  und  $J_y$  hängen von den Konturen  $c_j$  ab und können numerisch ausgewertet werden. Insgesamt müssen dadurch für jeden Punkt des Parameter-Raums ( $c_1, c_2, f, \sigma, t$ ) von  $S_{12}$  zwei Dreifachintegrale (numerisch) ausgewertet werden. Eine weitere Vereinfachung ist möglich, falls die Konturen  $c_j$  planar und parallel zur Platte verlaufen, das heißt, falls  $c_j$  eine konstante Höhe  $z_j$  über der Oberfläche besitzt. In diesem Fall vereinfachen sich die Gleichungen (12a, b) zu

$$S_{12}(c_1, c_2) = \mu^2 \sigma k_B T \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} I_A e^{-\sqrt{a^2+b^2}(z_1+z_2)} (I_x(c_1) I_x^*(c_2) + I_y(c_1) I_y^*(c_2)) da db \quad (13a)$$

mit

$$I_A = \int_0^t |A(a, b)|^2 dz', \quad I_x(c_j) = \oint_{c_j} e^{iax_j} e^{iby_j} dx_j, \quad I_y(c_j) = \oint_{c_j} e^{iax_j} e^{iby_j} dy_j, \quad j = 1, 2 \quad (13b)$$

## Anwendung der Theorie auf das Rauschthermometer

[0080] Wenn wir für das Rauschthermometer den allgemeinen Zusammenhang zwischen der (komplexen) Kreuz-Leistungsdichte  $S_{\Phi,12}(f)$  und der Temperatur  $T$  herstellen, ist es sinnvoll, nur den Realteil von  $S_{\Phi,12}(f)$  zu verwenden, der allein alle relevanten Abhängigkeiten enthält:

$$\operatorname{Re}(S_{\Phi,12}(f)) = G(f) \cdot T \quad (14)$$

[0081] Dann folgt aus (13a) für die frequenzabhängige Funktion  $G(f)$ :

$$G(f) = \operatorname{Re} \left( \mu^2 \sigma k_B \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_A e^{-\sqrt{a^2+b^2}(z_1+z_2)} (I_x(c_1)I_x^*(c_2) + I_y(c_1)I_y^*(c_2)) da db \right) \quad (15)$$

wobei  $I_A$ ,  $I_x$  und  $I_y$  weiterhin durch Gleichung (13b) gegeben sind.

[0082] Die absolute Temperatur ergibt sich dann zu

$$T = \frac{\operatorname{Re}[S_{\Phi,12}(f)]}{G(f)}$$

[0083] Die Die Temperatur ist nicht frequenzabhängig, da sowohl Zähler als auch Nenner den gleichen spektralen Verlauf besitzen. Das Verhältnis ist daher unabhängig von der Frequenz.

## Bezugszeichenliste

10	Magnetfeldfluktuationsthermometer
12	erstes Gradiometer
14	zweites Gradiometer
16	Berechnungseinheit
18	Chip
20	erste Detektionsspule
21	Leiter
22	zweite Detektionsspule
24	Feder
26	Gehäuse
28	erste Platine
30	erster SQUID-Stromsensor
32	zweite Platine
34	zweiter SQUID-Stromsensor
36	Anschluss
38	Sensorelement
40	zweiter Chip
42	Kalibrierspule
44	dritte Platine
46	erstes SQUID-Element
48	elektronische Schaltung
50	zweites SQUID-Element
52	zweite elektronische Schaltung
54	Teilschule
$V_{FLL,1}$	erste Spannung
$V_{FLL,2}$	zweite Spannung
$I_{cal}$	Kalibrierstrom
$\sigma$	elektrische Leitfähigkeit
$S_{\Phi}$	Kreuz-Leistungsdichte
$T$	Temperatur
$z$	Abstand

### Patentansprüche

1. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) mit
  - (a) einem Sensorelement (38), in dem thermische Stromfluktuationen zu einem von außen messbaren Magnetfeld führen,
  - (b) einem ersten Gradiometer (12), das
    - in einem ersten Abstand ( $z_1$ ) vom Sensorelement (38) angeordnet ist und
    - eine erste Detektionsspule (20) und
    - einen ersten SQUID-Stromsensor (30) zum Abgeben einer zum magnetischen Fluss ( $\Phi_1$ ) durch die erste Detektionsspule (20) proportionalen ersten Spannung ( $V_{FLL,1}$ ) umfasst,
  - (c) einem zweiten Gradiometer (14), das
    - in einem zweiten Abstand ( $z_2$ ) vom Sensorelement (38) angeordnet ist und
    - eine zweite Detektionsspule (22) und
    - einen zweiten SQUID-Stromsensor (34) zum Abgeben einer zum magnetischen Fluss ( $\Phi_2$ ) durch die zweite Detektionsspule (22) proportionalen zweiten Spannung ( $V_{FLL,2}$ ) umfasst, und
  - (d) einer Berechnungseinheit (16) zum Berechnen der Temperatur (T) des Sensorelements (38) aus einer Kreuz-Leistungsdichte ( $S_\varphi$ ) der ersten Spannung ( $V_{FLL,1}$ ) und der zweiten Spannung ( $V_{FLL,2}$ ).
  
2. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass
  - (a) der erste SQUID-Stromsensor (30)
    - ein erstes SQUID-Element (46) und
    - eine erste elektronische Schaltung (48), die ausgebildet ist zum Konstant-Halten des elektrischen Stroms, der durch das erste SQUID-Element (46) fließt, umfasst und/oder
  - (b) der zweite SQUID-Stromsensor (34)
    - ein zweites SQUID-Element (50) und
    - eine zweite elektronische Schaltung (52), die ausgebildet ist zum Konstant-Halten des elektrischen Stroms, der durch das zweite SQUID-Element (50) fließt, umfasst.
  
3. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Detektionsspule (20) und die zweite Detektionsspule (22) durch Schichten auf einem Chip (18) gebildet sind.
  
4. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Kalibrierspule (42), die so relativ zu den Detektionsspulen (20, 22) und dem Sensorelement (38) angeordnet ist, dass ein vorgegebener elektrischer Strom durch die Kalibrierspule (42) zu einem mit einer Unsicherheit von höchstens 0,1%, insbesondere höchstens 0,01%, bekannten magnetischen Fluss in den Detektionsspulen (20, 22) führt.
  
5. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach Anspruch (4), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Berechnungseinheit (16) ausgebildet ist zum automatischen Berechnen der elektrischen Leitfähigkeit ( $\sigma$ ) des Sensorelement-Materials des Sensorelements (38) mittels der Kalibrierspule (42).
  
6. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Detektionsspule (20) und/oder die zweite Detektionsspule (22) planar ausgebildet sind.
  
7. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Abstand ( $Z_1$ ) und/oder der zweite Abstand ( $Z_2$ ) höchstens 150 Mikrometer betragen.
  
8. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Detektionsspule (20) aus einem Leiter (21) aufgebaut ist, der eine Leiterbreite (w) von höchstens 10 Mikrometer, insbesondere höchstens 5 Mikrometer, hat.
  
9. Magnetfeldfluktuationsthermometer (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
  - die erste Detektionsspule (20) einen ersten effektiven Spulendurchmesser ( $D_{20}$ ) und einen ersten Spulenmittelpunkt ( $M_{20}$ ) hat,

- die zweite Detektionsspule (**22**) einen zweiten effektiven Spulendurchmesser ( $D_{22}$ ) und einen zweiten Spulenmittelpunkt ( $M_{22}$ ) hat und
- ein Abstand ( $d_M$ ) zwischen dem ersten Spulenmittelpunkt ( $M_{20}$ ) und dem zweiten Spulenmittelpunkt ( $M_{22}$ ) höchstens das Zehnfache des Minimums aus erstem effektiven Spulendurchmesser ( $D_{20}$ ) und zweitem effektiven Spulendurchmesser ( $D_{22}$ ) beträgt.

10. Magnetfeldfluktuationsthermometer (**10**) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Leiterbreite ( $w$ )

- höchstens ein Zehntel, insbesondere höchstens ein Hundertstel, des Minimums aus erstem effektiven Spulendurchmesser ( $D_{20}$ ) und zweitem effektiven Spulendurchmesser ( $D_{22}$ ) beträgt und/oder
- höchstens ein Zehntel des Minimums aus erstem Abstand ( $Z_1$ ) und zweitem Abstand ( $Z_2$ ) beträgt und/oder
- höchstens ein Zehntel der Dicke ( $t$ ) des Sensorelements (**38**) am Ort der ersten Detektorspule (**20**) und am Ort der zweiten Detektorspule (**22**) beträgt.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

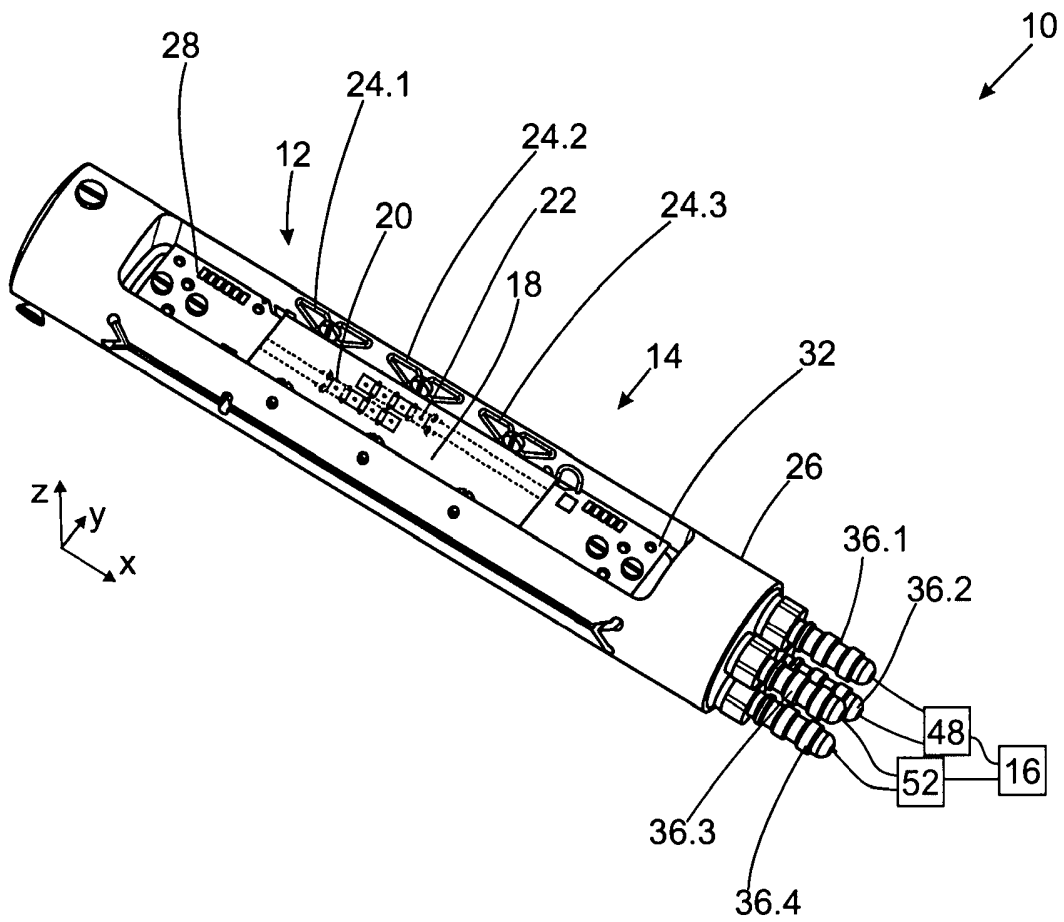


Fig. 1

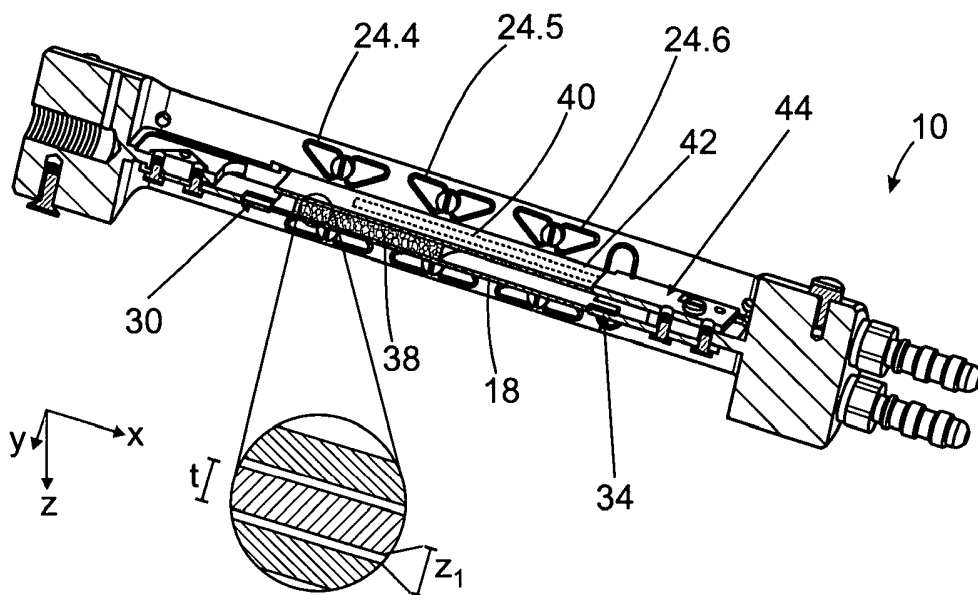


Fig. 2

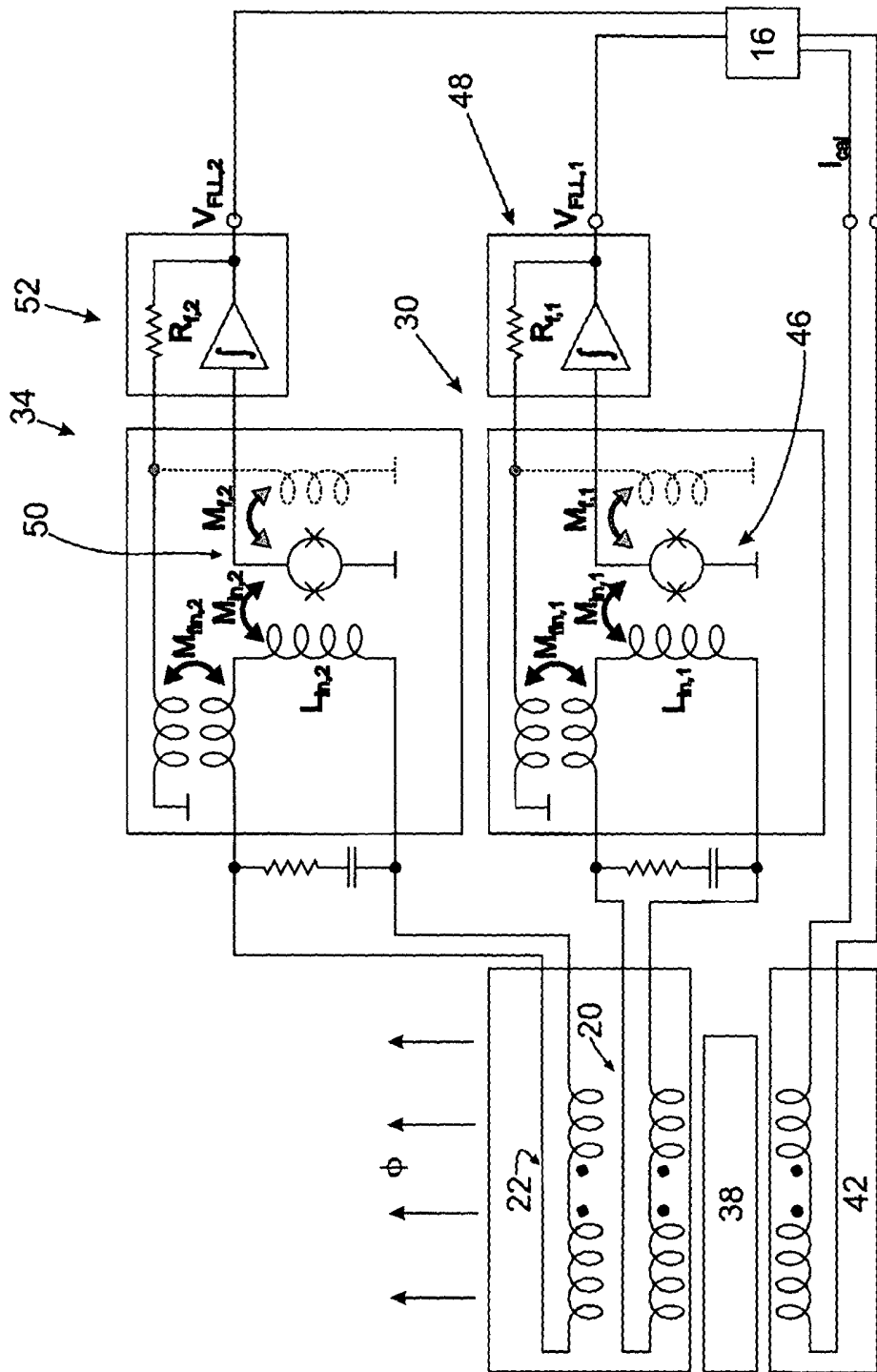


Fig. 3

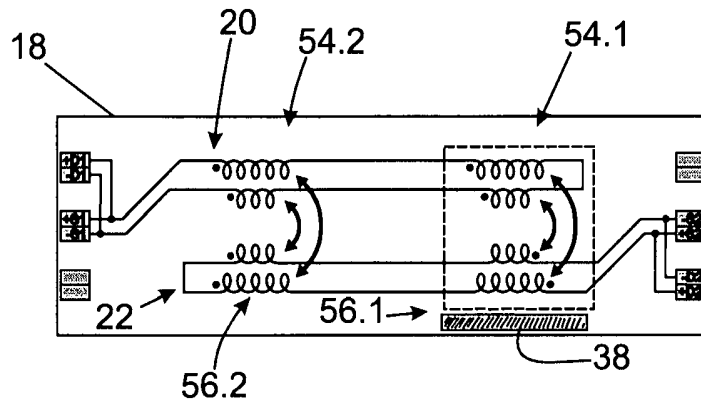


Fig. 4a

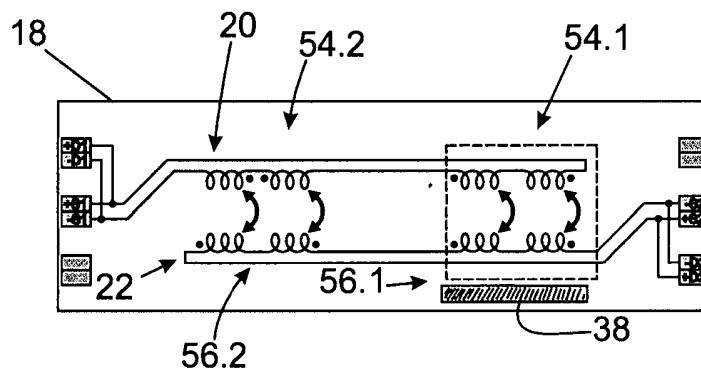


Fig. 4b

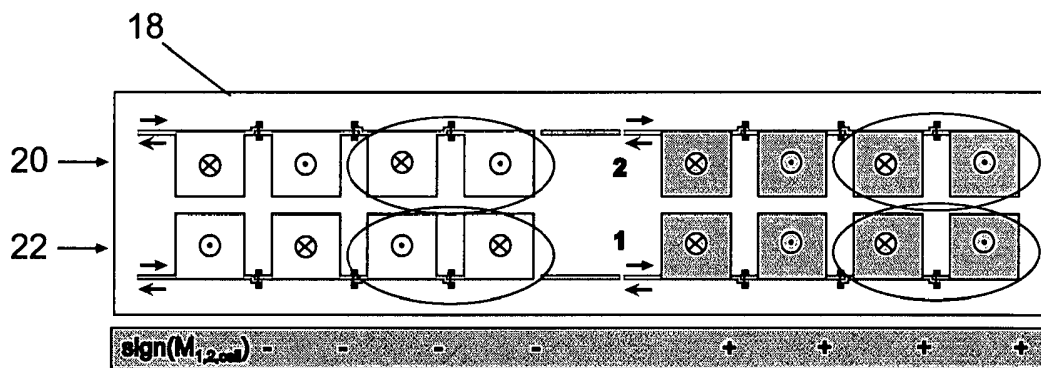


Fig. 4c

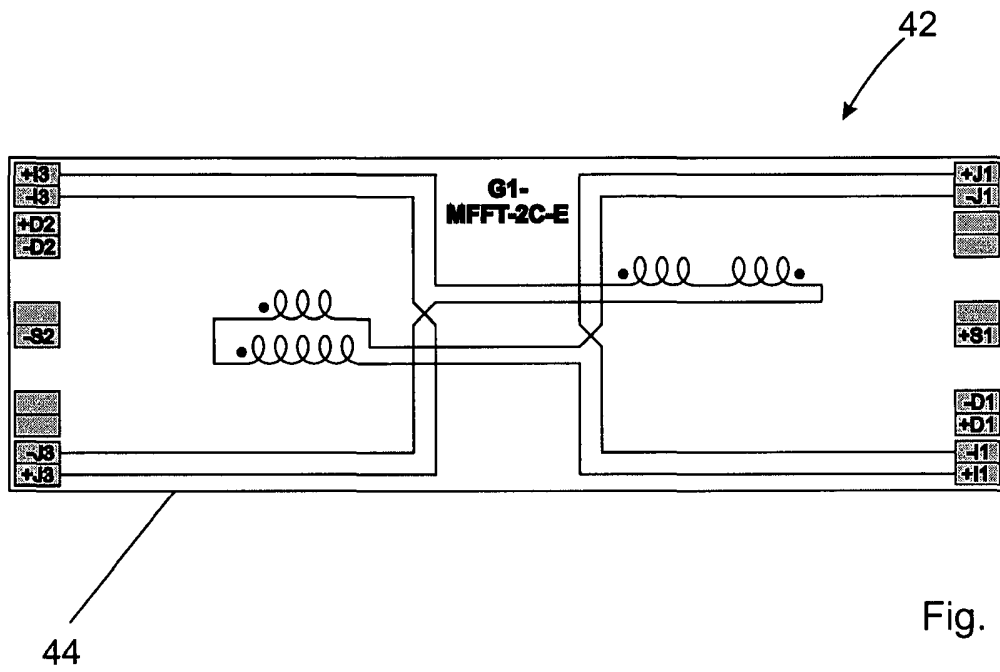
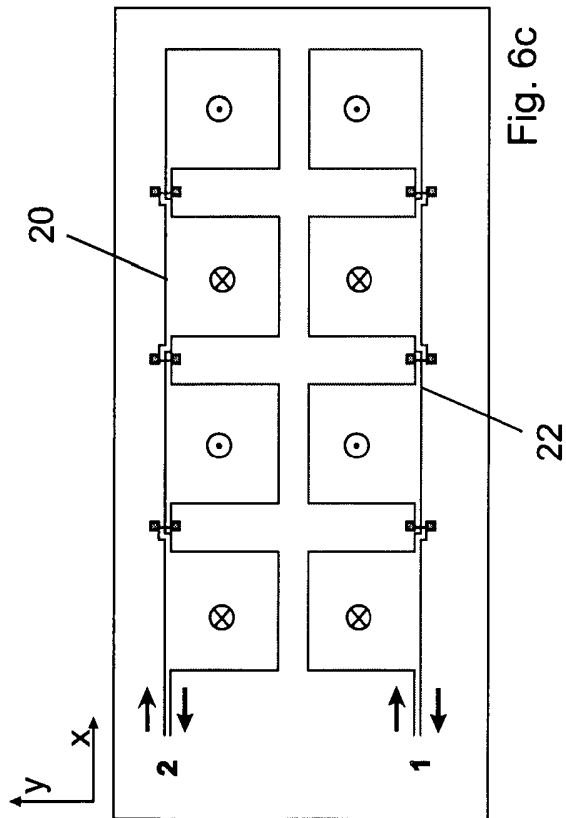
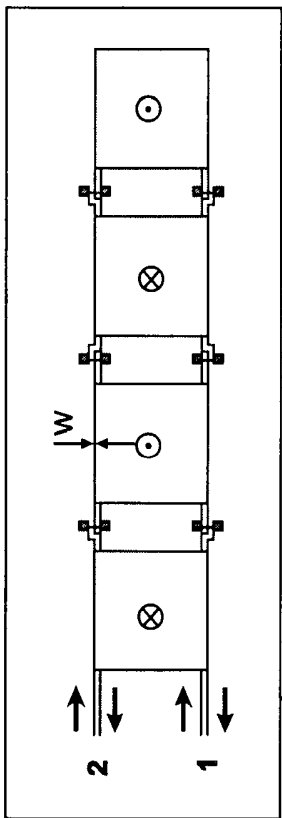
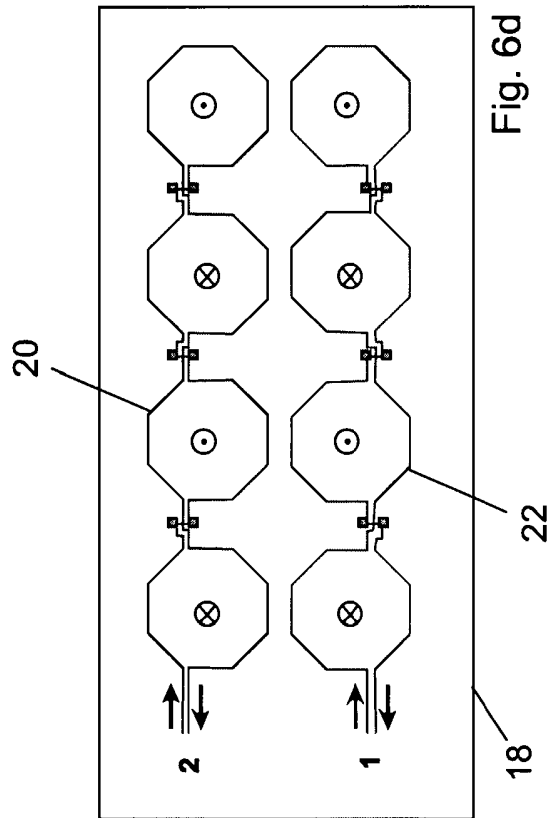
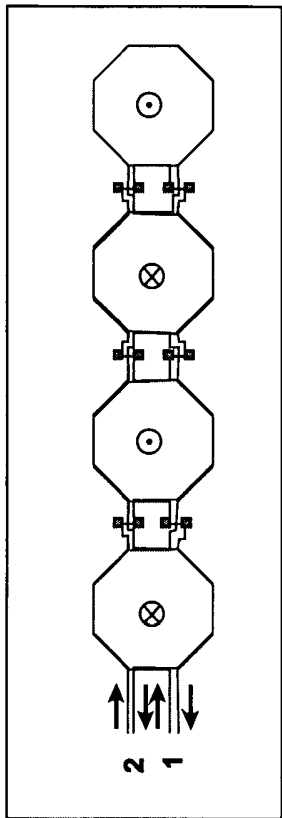


Fig. 5





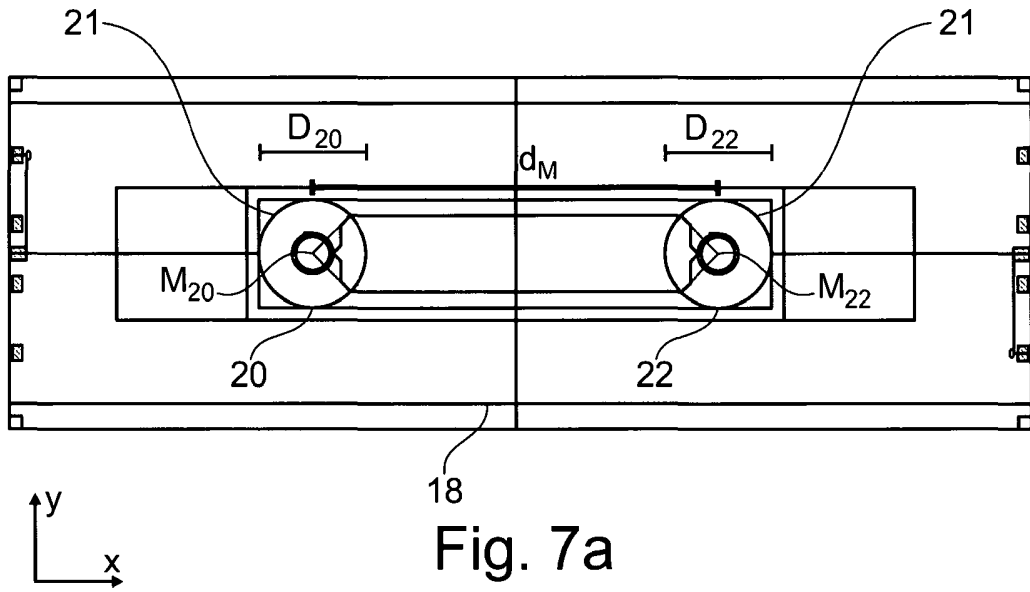


Fig. 7a

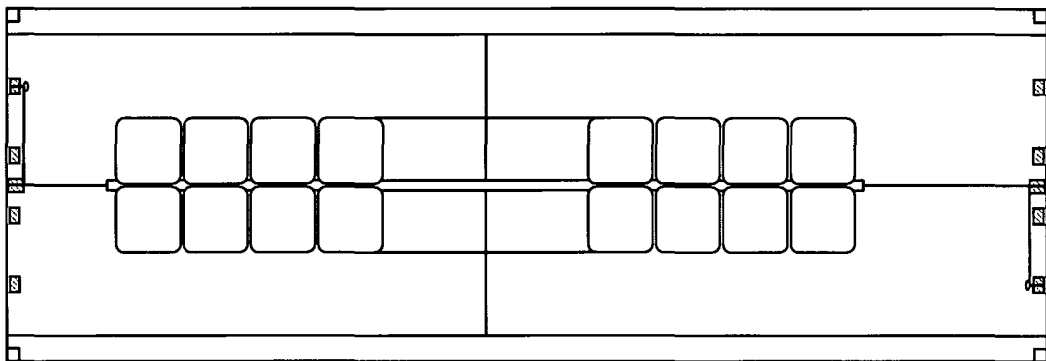
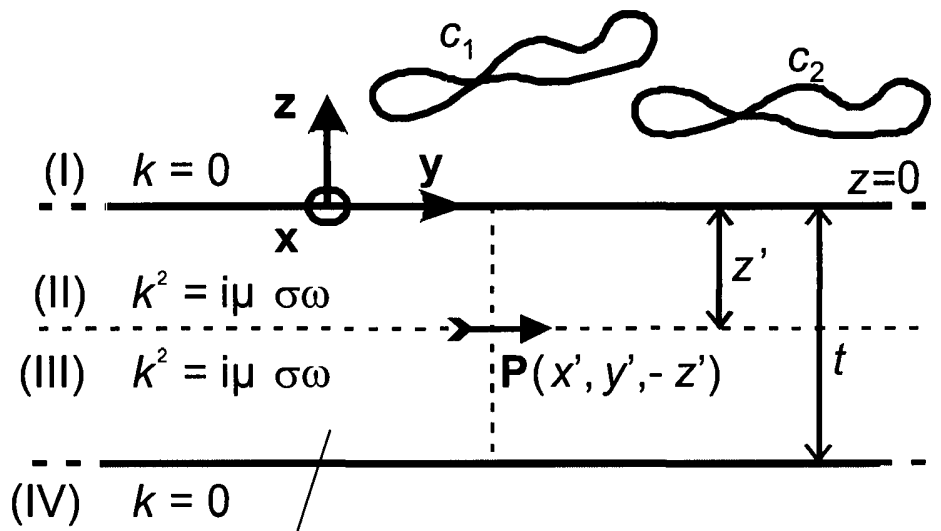


Fig. 7b



38

Fig. 8