



(10) **DE 10 2015 001 710 B4** 2019.05.09

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 001 710.1**
(22) Anmeldetag: **13.02.2015**
(43) Offenlegungstag: **18.08.2016**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **09.05.2019**

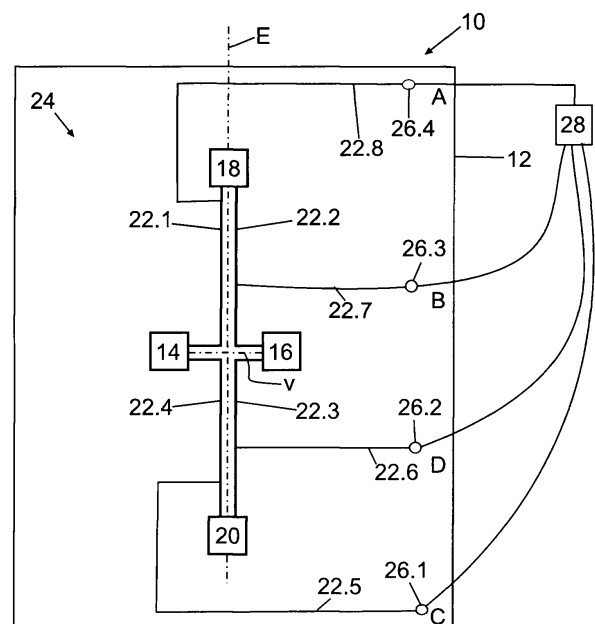
(51) Int Cl.: **G01N 25/18 (2006.01)**

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).

<p>(73) Patentinhaber: Bundesrepublik Deutschland, vertr. durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE</p> <p>(74) Vertreter: Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig, DE</p>	<p>(72) Erfinder: Hammerschmidt, Ulf, Dr., 38112 Braunschweig, DE</p> <p>(56) Ermittelter Stand der Technik:</p> <table><tr><td>DE</td><td>10 2004 022 206</td><td>B4</td></tr><tr><td>DE</td><td>10 2011 002 947</td><td>B3</td></tr><tr><td>DE</td><td>101 33 120</td><td>A1</td></tr><tr><td>DE</td><td>10 2010 012 434</td><td>A1</td></tr><tr><td>WO</td><td>2009/ 153 099</td><td>A1</td></tr></table>	DE	10 2004 022 206	B4	DE	10 2011 002 947	B3	DE	101 33 120	A1	DE	10 2010 012 434	A1	WO	2009/ 153 099	A1
DE	10 2004 022 206	B4														
DE	10 2011 002 947	B3														
DE	101 33 120	A1														
DE	10 2010 012 434	A1														
WO	2009/ 153 099	A1														

(54) Bezeichnung: **Transportgrößen-Messvorrichtung, Sensor dafür und Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße**

(57) Hauptanspruch: Transportgrößen-Messvorrichtung zur Messung einer thermischen Transportgröße, mit
(a) einem Sensor (10), der
- ein erstes Widerstandselement (14),
- ein zweites Widerstandselement (16),
- ein drittes Widerstandselement (18) und
- ein viertes Widerstandselement (20) aufweist, und
(b) einer elektrischen Steuerung (28), die mit den Widerstandselementen (14, 16, 18, 20) zum automatischen Bestromen verbunden ist, dadurch gekennzeichnet, dass
(c) die Widerstandselemente (14, 16, 18, 20) zu einer Brückenschaltung (24) verschaltet und so angeordnet sind, dass beim Bestromen der Brückenschaltung (24) die von den Widerstandselementen (14, 16, 18, 20) kollektiv abgegebene Wärmemenge konstant ist und im stationären Zustand eine konstante Brückenspannung (U_{BC}) entsteht.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Transportgrößen-Messvorrichtung gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

[0002] Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung einen Sensor für eine derartige Transportgrößen-Messvorrichtung.

[0003] Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße.

[0004] Aus der DE 10 2010 018 968 A1 ist ein Verfahren für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bekannt, bei dem ein thermoelektrischer Sensor verwendet wird. Dieser Sensor wird zwischen zwei Probenhälften geklemmt oder in ein Probefluid eingetaucht. Der Sensor umfasst ein elektrisches Widerstandselement, das sowohl als Joulesche Wärmequelle als auch als Thermometer fungiert. Eine entsprechende Transportgrößen-Messvorrichtung ist zudem aus der WO 2011/134559 A1 bekannt. In beiden Fällen wird zur Auswertung ein effektiver Radius verwendet, der gemessen werden muss. Das begrenzt die maximal erreichbare Genauigkeit. Zudem ist es nicht möglich, die Temperatur rückführbar zu messen.

[0005] Aus der DE 10 2004 022 206 B4 ist eine Transportgrößen-Messvorrichtung bekannt, die zwei Heizstreifen aufweist, die so zueinander angeordnet sind, dass in einem Mittenintervall zwischen einem Anfangs-Intervall unmittelbar nach Beginn der Messung und einem End-Intervall, in dem sich der stationäre Zustand eingestellt hat, aus der Steigung der Brückenspannung gegen die logarithmisch aufgetragene Zeit die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden kann. Da Heizstreifen verwendet werden, können sehr kleine Proben so nicht untersucht werden.

[0006] Aus der DE 10 2011 002 947 B3 ist eine Messanordnung von unterschiedlichen Widerständen bekannt, die in einem Gasweg angeordnet und zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet sind. Jeweils zwei der Widerstände sind auf einer Seite eines Sensorelements angeordnet und werden so bestromt, dass eine Verstimmung der Wheatstone-Brücke kompensiert wird. Nachteilig an diesem System ist der vergleichsweise hohe regelungstechnische Aufwand.

[0007] Aus der DE 10 2010 012 434 A1 ist ein thermischer Leitfähigkeitssensor bekannt, der wie der vorgenannte Sensor aufgebaut ist. Eine Seite des Sensorelements ist einer Referenzgasprobe zugewandt, wobei die Wärmeleitfähigkeit des Proben-Gases relativ zu der Wärmeleitfähigkeit des Referenz-Gases bestimmt wird. Nachteilig an einer derartigen Vorrichtung ist, dass eine rückführbare Messung nicht möglich ist, da die Wärmeleitfähigkeit der Referenzgasprobe bekannt sein muss.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0009] Die Erfindung löst das Problem durch eine Transportgrößen-Messvorrichtung zur Messung einer thermischen Transportgröße, insbesondere einer Wärmeleitfähigkeit und/oder einer Temperaturleitfähigkeit, mit den Merkmalen von Anspruch 1.

[0010] Die Erfindung löst das Problem zudem durch einen Sensor für eine Transportgrößen-Messvorrichtung zur Messung einer thermischen Transportgröße, insbesondere einer Wärmeleitfähigkeit und/oder einer Temperaturleitfähigkeit mit den Merkmalen von Anspruch 9, wobei vorzugsweise ein dritter Ebenen-Abstand des dritten Widerstandselements zur Ebene einem vierten Ebenen-Abstand des vierten Widerstandselements zur Ebene entspricht. Der dritte Ebenen-Abstand kann null sein.

[0011] Erfindungsgemäß ist zudem eine Transportgrößen-Messvorrichtung mit einem derartigen Sensor, einer elektrischen Steuerung, die mit den Widerstandselementen zum Bestromen verbunden ist, und einem Spannungsmesser zum Messen der Brückenspannung.

[0012] Gemäß einem weiteren Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße, insbesondere einer Wärmeleitfähigkeit und/oder einer Temperaturleitfähigkeit, mit den Schritten (i) Bestromen einer erfindungsgemäßen Transportgrößen-Messvorrichtung, (ii) Messen der Brückenspannung und (iii) Berechnen der thermischen Transportgröße aus der Brückenspannung.

[0013] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die sich einstellende Temperaturdifferenz zur Ausgangstemperatur lediglich von der Wärmemenge, die von den Widerstandselementen abgegeben wird, der Wärmeleitfähigkeit

higkeit und einem Abstandsfaktor abhängt, der die Abstände der Widerstandselemente zueinander charakterisiert, wie weiter unten in Gleichung 10 angegeben ist. Diese Parameter sind rückführbar messbar, sodass die Wärmeleitfähigkeit rückführbar gemessen werden kann.

[0014] Ein weiterer Vorteil ist, dass die Messung sehr einfach zu realisieren ist. So ist es lediglich notwendig, die Widerstandselemente so lange zu bestromen, bis sich der stationäre Zustand eingestellt hat, bei dem sich die Brückenspannung im Rahmen eines vorgegebenen Toleranzbandes zeitlich nicht mehr ändert.

[0015] Vorteilhaft ist zudem, dass systematische Messunsicherheiten, die von der Wärmeleitfähigkeit des zu vermessenden Materials abhängen, in aller Regel vernachlässigbar klein sind.

[0016] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter der Transportgrößen-Messvorrichtung insbesondere eine Vorrichtung verstanden, die zur Messung der thermischen Transportgröße ausgebildet ist. Das heißt insbesondere, dass sie in der Lage ist, die thermische Messgröße mit einer Messunsicherheit von höchstens 4% genau zu bestimmen.

[0017] Unter einem Widerstandselement wird insbesondere ein elektrisches Widerstandselement verstanden. Das Widerstandselement ist insbesondere ein Element des Sensors, das elektrisch kontaktiert ist, sodass es beim Bestromen Wärme abgibt. Das Widerstandselement hat vorzugsweise einen Widerstand von zumindest 100 Ω . Günstig ist es, wenn der Widerstand kleiner ist als 2000 Ω , insbesondere kleiner 1000 Ω .

[0018] Günstig ist es, wenn die vier Widerstandselemente den im technischen Sinne gleichen Widerstand besitzen. Hierunter ist zu verstehen, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Widerstandselemente im strengen mathematischen Sinne den gleichen elektrischen Widerstand haben. Insbesondere ist es möglich, dass die Differenz zwischen dem maximalen elektrischen Widerstand und dem minimalen elektrischen Widerstand der Widerstandselemente dividiert durch den maximalen elektrischen Widerstand höchstens 5% beträgt. Selbstverständlich ist es meist wünschenswert, dass sich die ohmschen Widerstände der Widerstandselemente möglichst wenig voneinander unterscheiden. Es ist möglich, dass zumindest ein Widerstandselement ein Potentiometer, das außerhalb einer etwaig vorhandenen Folie vorhanden sein kann, umfasst, sodass der ohmsche Widerstand des Widerstandselements einstellbar ist.

[0019] Unter dem Merkmal, dass die Widerstandselemente so angeordnet sind, dass beim Bestromen im stationären Zustand eine konstante Brückenspannung entsteht, wird insbesondere verstanden, dass die Brückenspannung sich einem konstanten Wert annähert, wenn die von den Widerstandselementen kollektiv abgegebene Wärmemenge konstant ist und wenn der Prüfling, mit dem der Sensor in Kontakt gebracht wurde, in hinreichend guter Näherung als unendlich groß betrachtet werden kann.

[0020] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die Transportgröße-Messvorrichtung einen Spannungsmesser, der zum Messen der Brückenspannung mit den elektrischen Widerstandselementen verbunden ist. Der Spannungsmesser kann Teil der elektrischen Steuerung sein, das ist aber nicht notwendig.

[0021] Es ist günstig, nicht aber notwendig, dass die elektrische Steuerung eingerichtet ist zum automatischen Berechnen der Temperatur aus einem elektrischen Strom, mit dem die Widerstandselemente bestromt werden, einerseits, und der Brückenspannung andererseits. Selbstverständlich ist es möglich, dass in die Rechnung weitere Parameter eingehen, insbesondere ein Abstandsfaktor, der die Abstände der Widerstandselemente zueinander beschreibt.

[0022] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform entspricht ein erster Abstand zwischen dem ersten Widerstandselement und dem dritten Widerstandselement einem zweiten Abstand zwischen dem ersten Widerstandselement und dem vierten Widerstandselement, wobei ein dritter Widerstand zu dem zweiten Widerstandselement und dem vierten Widerstandselement dem ersten Abstand entspricht und wobei eine Ebene existiert, die senkrecht zu einer Verbindungslinie zwischen dem ersten Widerstandselement und dem zweiten Widerstandselement verläuft, wobei ein erster Ebenen-Abstand des ersten Widerstandselements zur Ebene einem zweiten Ebenen-Abstand des zweiten Widerstandselements zur Ebene entspricht und wobei ein dritter Ebenen-Abstand des dritten Widerstandselements zur Ebene einem vierten Ebenen-Abstand des vierten Widerstandselements zur Ebene entspricht. Es ergibt sich beispielsweise eine lineare oder eine rautenförmige Anordnung der Widerstandselemente, die einfach zu realisieren und zu berechnen ist.

[0023] Günstig ist es, wenn die Widerstandselemente so zur Brückenschaltung verschaltet sind, dass die Brückenspannung im stationären Zustand in einem linearen Zusammenhang steht, insbesondere proportional

ist, zur Temperaturerhöhung der Widerstandselemente. Die Temperaturerhöhung ist so besonders leicht zu bestimmen. Es kann eine Offset-Spannung existieren.

[0024] Wenn die Widerstandselemente so ausgebildet und verschaltet sind, dass die Brückenspannung im stationären Zustand in einem linearen Zusammenhang steht zum Quotienten aus dem Wärmestrom, der durch Bestromen erzeugt wird, als Zähler und der Wärmeleitfähigkeit eines Prüflings, der in thermischem Kontakt mit den Widerstandselementen steht, als Nenner, lässt sich das Messergebnis besonders leicht auswerten. Insbesondere ist die Brückenspannung im stationären Zustand proportional ist zu diesem Quotienten. Weiter unten ist beschrieben, wie die Anordnung der Widerstandselemente gewählt werden kann, um diese Abhängigkeit zu erreichen.

[0025] Vorzugsweise ist ein vierter Abstand zwischen dem dritten Widerstandselement und dem vierten Widerstandselement um einen Abstandsfaktor größer als ein fünfter Abstand zwischen dem ersten Widerstandselement und dem zweiten Widerstandselement, wobei dieser Abstandsfaktor vorzugsweise zumindest 1,5 beträgt. Je größer dieser Abstandsfaktor ist, desto höher ist die erreichbare Messgenauigkeit, wenngleich die Zeit größer wird, die bis zum Eintreten des stationären Zustands verstreicht.

[0026] Günstig ist es, wenn die Widerstandselemente mit einer 180°-Drehsymmetrie angeordnet sind. Die Abhängigkeit der Brückenspannung von der Temperaturdifferenz lässt sich dann besonders leicht berechnen.

[0027] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform haben die Widerstandselemente gemeinsam einen geometrischen Schwerpunkt und das erste Widerstandselement hat den gleichen Abstand vom Schwerpunkt wie das zweite Widerstandselement. Besonders günstig ist es, wenn das dritte Widerstandselement den gleichen Abstand vom Schwerpunkt hat wie das vierte Widerstandselement. In diesem Fall lässt sich aus der Brückenspannung und der Stromstärke beim Bestromen besonders leicht die Temperaturerhöhung berechnen. Unter einem gleichen Abstand wird ein im technischen Sinne gleicher Abstand verstanden, das heißt, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Abstände im mathematischen Sinne sind, eine Abweichung der Abstände ist möglich, sofern dies die

[0028] Vorzugsweise gilt für jedes Widerstandselement, dass eine gedachte Hülle um das Widerstandselement einen Höhenkugel-Durchmesser hat, der höchstens 10 mm beträgt. In diesem Fall kann das Widerstandselement in guter Näherung als punktförmig angesehen werden.

[0029] Vorzugsweise liegen allen vier Widerstandselementen innerhalb einer gedachten Kugel mit einem Umkugel-Durchmesser von höchstens 30 mm.

[0030] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der Sensor ein, insbesondere flexibles, Substrat, auf das die Widerstandselemente aufgebracht sind. Besonders günstig ist es, wenn die Widerstandselemente durch flexible Leiterbahnen, die auf das Substrat aufgebracht sind, verbunden sind. Besonders günstig ist es, wenn der Sensor ein Foliensensor ist, das heißt, dass die Widerstandselemente und die Leiterbahnen, die die Widerstandselemente kontaktieren, so wie das Substrat flexibel ausgebildet sind. Vorzugsweise hat das Substrat eine Dicke von höchstens 0,1 mm, insbesondere höchstens 0,05 mm. Umfasst der Foliensensor mehr als eine Lage Folien, so wird unter der Dicke des Substrats die Summe aller Dicken aller Folien verstanden. In diesem Fall spielt die Wärmeleitfähigkeit des Substrats für einen etwaigen systematischen Messfehler keine signifikante Rolle.

[0031] Erfindungsgemäß ist zudem ein Sensor, der ein erstes elektrisches Widerstandselement, ein zweites elektrisches Widerstandselement, ein drittes elektrisches Widerstandselement und ein viertes elektrisches Widerstandselement aufweist, wobei die Widerstandselemente so zu einer Brückenschaltung verschaltet und angeordnet sind, dass beim Bestromen der Brückenschaltung im stationären Zustand eine konstante Brückenspannung entsteht.

[0032] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Transportgrößen-Messvorrichtung gemäß einer ersten Ausführungsform,

Fig. 2 eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Transportgrößen-Messvorrichtung gemäß einer zweiten Ausführungsform,

Fig. 3 ein Schaltplan eines erfindungsgemäßen Sensors für eine erfindungsgemäße Transportgrößen-Messvorrichtung und

Fig. 4 ein Schaltbild für die Schaltung gemäß **Fig. 3**.

[0033] **Fig. 1** zeigt schematisch einen erfindungsgemäßen Sensor **10**, der ein Substrat **12** umfasst, auf dem ein erstes elektrisches Widerstandselement **14**, ein zweites elektrisches Widerstandselement **16**, ein drittes elektrisches Widerstandselement **18** und ein viertes elektrisches Widerstandselement **20** angeordnet sind. Die Widerstandselemente **14**, **16**, **18**, **20** sind als Metallisierungen ausgebildet, das heißt als dünne Metallschichten.

[0034] Das Substrat **12** ist durch eine 30 µm dicke Folie aus Polyimid gebildet. Die Widerstandselemente **14**, **16**, **18**, **20** sind mittels Leiterbahnen **22.1**, **22.2**, **22.3**, **22.4** paarweise miteinander verbunden, sodass eine Brückenschaltung **24** entsteht. Die Brückenschaltung **24** umfasst zudem Leiterbahnen **22.5**, **22.6**, **22.7**, **22.8**, die zu den jeweiligen Anschlüssen **26.1**, **26.2**, **26.3**, **26.4** führen.

[0035] Über die Anschlüsse **26** ist der Sensor **10** mit einer elektrischen Steuerung **28** verbunden, mittels der die Widerstandselemente **14**, **16**, **18**, **20** mit einem elektrischen Strom einer vorgebaren elektrischen Stromstärke **I** bestromt werden können.

[0036] **Fig. 2** zeigt die Widerstandselemente zu Vereinfachung in Alleinstellung. Es ist zu erkennen, dass ein erster Abstand r_{13} zwischen dem ersten Widerstandselement **14** und dem dritten Widerstandselement **18** einem zweiten Abstand r_{14} zwischen dem ersten Widerstandselement **14** und dem vierten Widerstandselement **20** entspricht. Ein dritter Abstand r_{24} zwischen dem zweiten Widerstandselement **16** und dem vierten Widerstandselement **20** entspricht dem ersten Abstand r_{13} und in der vorliegenden Ausführungsform zweiten Abstand r_{14} .

[0037] **Fig. 1** zeigt, dass eine gedachte Ebene **E** existiert und die senkrecht zu einer Verbindungslinie **v** zwischen dem ersten Widerstandselement **14** und den zweiten Widerstandselement **16** verläuft. Das erste Widerstandselement **14** und das zweite Widerstandselement **16** haben jeweils den gleichen Abstand von dieser Ebene **E** und das dritte Widerstandselement **18** und das vierte Widerstandselement **20** haben ebenfalls den gleichen Abstand von dieser Ebene. Im vorliegenden Fall beträgt dieser Abstand für das dritte und das vierte Widerstandselement null.

[0038] Es ist zudem zu erkennen, dass die Anordnung der Widerstandselemente **14**, **16**, **18**, **20** eine 180°-Drehsymmetrie aufweist. Diese Drehsymmetrie bezieht sich auf die geometrischen Schwerpunkte der Widerstandselemente und ist im technischen Sinne zu verstehen. Das heißt, dass Abweichungen von dieser Drehsymmetrie möglich sind, sofern der daraus resultierende Auswertefehler zu einer zusätzlichen Messunsicherheit führt, die kleiner ist als die Messunsicherheit bei symmetrischer Anordnung.

[0039] Die Steuerung **28** ist eingerichtet zum Anlegen des elektrischen Stroms **I** an die Anschlüsse **26.4** und **26.2** und zum Messen einer Brückenspannung U_{BC} zwischen den Anschlüssen **26.1** und **26.3**. Im Folgenden wird die Arbeitsgleichung hergeleitet, anhand der aus dem elektrischen Strom **I** und der über die Brückenspannung U_{BC} gemessenen Temperaturerhöhungen die Wärmeleitfähigkeit λ hergeleitet werden kann. Auf Basis der bekannten Beziehung zwischen der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der Temperaturleitfähigkeit kann anhand dieser Messung in Kenntnis der Dichte die Temperaturleitfähigkeit a errechnet werden.

[0040] **Fig. 3** zeigt das Ersatzschaltbild der Brückenschaltung **24**.

[0041] Die Arbeitsgleichung des nun „Point Bridge“ genannten erfindungsgemäßen Verfahrens ergibt sich wie folgt. Die elektrischen Widerstände der zwei inneren Widerstandselemente **14**, **16** (mit ohmschen Widerständen **R1** und **R2**) und der zwei äußeren Widerstandselemente **18**, **20** (mit ohmschen Widerständen **R3** und **R4**) wirken in der mit einem konstanten Erregerstrom **I** betriebenen Brückenschaltung **24** gegeneinander. Somit ist deren Brückenspannung U_{BC} , und damit das Ausgangssignal des Sensors,

$$U_{BC} \propto R1 \cdot R2 - R3 \cdot R4, \quad (1)$$

während der Aufheizphase proportional zur Temperaturdifferenz

$$\Delta T = T_i - T_a \quad (2)$$

der inneren (Index „i“) und der äußeren (Index „a“) Widerstände. Die beiden Einzeltemperaturen

$$T_i = T(r_{11}) + T(r_{12}) + T(r_{13}) + T(r_{14}) \quad (3)$$

und

$$T_a = T(r_{33}) + T(r_{31}) + T(r_{32}) + T(r_{34}) \quad (4)$$

setzen sich additiv zusammen aus den Temperaturen infolge der jeweiligen Eigenerwärmungen, $T(r_{11}) = T(r_{33})$, sowie den sich zwanglos überlagernden Beiträgen aller anderen Bauelemente in den Abständen r_{12} , $r_{13} = r_{14} = r_{31} = r_{32}$ beziehungsweise r_{34} . Setzt man die Gleichungen (3) und (4) in (2) ein, dann verbleibt lediglich

$$\Delta T = T(r_{12}) - T(r_{34}). \quad (5)$$

[0042] Die Abstände zwischen den beiden inneren Bauelementen einerseits und den beiden äußeren Elementen andererseits sind somit ein direktes Maß für die gesuchte Temperaturdifferenz.

[0043] Zur Berechnung der Temperaturfelder in Gl. (5) werden die Einzelwiderstände des Sensors als punktförmige Wärmequellen betrachtet. Diese Annahme ist durch entsprechende Experimente gerechtfertigt. Für das orts- und zeitabhängige Temperaturfeld einer kontinuierlich betriebenen, punktförmigen Quelle in einem homogenen Medium gilt

$$\Delta T = \frac{\Phi}{4\pi r \lambda} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4at}}\right). \quad (6)$$

[0044] Hierin bezeichnet Φ den abgegebenen Wärmestrom. Er ist gleich der von der Quelle aufgenommenen elektrischen Verlustleistung $\Phi = P = RI^2$. Die obige Gleichung enthält neben der Messgröße λ noch zusätzlich im Argument der komplementären Fehlerfunktion, $\operatorname{erfc}(x)$, die unbekannte Temperaturleitfähigkeit a der Probe. Letztere gilt es noch zu eliminieren. Hierzu entwickelt man zunächst die Fehlerfunktion in eine McLaurin-Reihe um $\tau = r/\sqrt{4at}$:

$$\operatorname{erfc}(\tau) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \frac{2\tau^3}{3\sqrt{\pi}} - \dots \quad (7)$$

[0045] Dieser Ausdruck wird nach dem zweiten Glied abgebrochen und in (6) eingesetzt. Für Gl. (5) erhält man schließlich:

$$\Delta T(t) \approx \frac{\Phi}{4\pi r_{12} \lambda} \left(1 - \frac{r_{12}}{\sqrt{\pi} \sqrt{at}}\right) - \frac{\Phi}{4\pi r_{34} \lambda} \left(1 - \frac{r_{34}}{\sqrt{\pi} \sqrt{at}}\right) = \frac{\Phi}{4\pi \lambda} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{34}}\right). \quad (8)$$

[0046] Das gesuchte globale Temperaturfeld des Sensors ist in guter Näherung zeitunabhängig und umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit der Probe. Der Abstandsfaktor auf der rechten Seite von Gl. (8) lässt sich zu einer Sensorkonstante

$$s = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{34}}\right) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{n \cdot r_{12}}\right) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{n-1}{n \cdot r_{12}}\right) \quad \text{mit } n \in \mathfrak{R}, n > 1 \quad (9)$$

erweitern.

[0047] Die Arbeitsgleichung des Point-Bridge Verfahrens lautet schließlich

$$\Delta T \approx s \frac{\Phi}{\lambda}. \quad (10)$$

[0048] Mit $\Phi = RI^2$ und $\Delta T \approx \frac{2U_{BC,stat}}{\alpha RI}$ folgt

$$\lambda \approx s \frac{R^2 I^3 \alpha}{2U_{BC,stat}}, \quad (11)$$

wobei R der elektrische Widerstand der Widerstandselemente **14, 16, 18, 20** ist, $U_{BC,stat}$ die Brückenspannung im stationären Zustand, I der durch die Brückenschaltung fließende elektrische Strom und α ein Temperaturkoeffizient, der die Abhängigkeit der Brückenspannung U_{BC} von der Temperatur T beschreibt.

[0049] Für die Praxis bedeutet dieses Ergebnis, dass nach einer gewissen Anlaufzeit des Sensors dessen Ausgangssignal stationär wird. Generell gilt, je kleiner der Maßstabsfaktor n gewählt wird, desto kürzer gestaltet sich die Anlaufzeit, desto kleiner ist indes das Ausgangssignal des Sensors. Die Dauer des transienten Messbeginns hängt noch wesentlich von der Temperaturleitfähigkeit a der Probe ab. Es erscheint daher angebracht, Sensoren in unterschiedlichen Größen (s) für Messungen vorzuhalten.

[0050] Fig. 4 zeigt eine alternative Ausführungsform für einen erfindungsgemäßen Sensor **10**.

[0051] In allen Ausführungsformen sind die Widerstandselemente **14, 16, 18, 20** so klein ausgebildet, dass eine gedachte Hüllkugel **30** einen Hüllkugel-Durchmesser h von höchstens 10 mm hat. Die Hüllkugel **30** ist diejenige gedachte Kugel minimalen Durchmessers, die das jeweilige Widerstandselement umgibt, ohne es zu berühren. Eine Umkugel **32**, die die kleinste gedachte Kugel ist, die alle Widerstandselemente **14, 16, 18, 20** umgibt, ohne sie zu berühren, hat einen Kugel-Durchmesser w von höchstens $w=30$ mm.

Bezugszeichenliste

10	Sensor
12	Substrat
14	erstes Widerstandselement
16	zweites Widerstandselement
18	drittes Widerstandselement
20	viertes Widerstandselement
22	Leiterbahn
24	Brückenschaltung
26	Anschluss
28	Steuerung
30	Hüllkugel
32	Umkugel
I	elektrischer Strom
r₁₃	erster Abstand
r₁₄	zweiter Abstand
r₂₄	dritter Abstand
r₃₄	vierter Abstand
U_{BC}	Brückenspannung
E	Ebene

v	Verbindungsline
h	Hüllkugeldurchmesser
w	Umkugeldurchmesser

Patentansprüche

1. Transportgrößen-Messvorrichtung zur Messung einer thermischen Transportgröße, mit
 - (a) einem Sensor (10), der
 - ein erstes Widerstandselement (14),
 - ein zweites Widerstandselement (16),
 - ein drittes Widerstandselement (18) und
 - ein viertes Widerstandselement (20) aufweist, und
 - (b) einer elektrischen Steuerung (28), die mit den Widerstandselementen (14, 16, 18, 20) zum automatischen Bestromen verbunden ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - (c) die Widerstandselemente (14, 16, 18, 20) zu einer Brückenschaltung (24) verschaltet und so angeordnet sind, dass beim Bestromen der Brückenschaltung (24) die von den Widerstandselementen (14, 16, 18, 20) kollektiv abgegebene Wärmemenge konstant ist und im stationären Zustand eine konstante Brückenspannung (U_{BC}) entsteht.

2. Transportgrößen-Messvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - ein erster Abstand (r_{13}) zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem dritten Widerstandselement (18) einem zweiten Abstand (r_{14}) zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem vierten Widerstandselement (20) entspricht und
 - ein dritter Abstand (r_{24}) zwischen dem zweiten Widerstandselement (16) und dem vierten Widerstandselement (20) dem ersten Abstand (r_{13}) entspricht.

3. Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Ebene (E) existiert, die senkrecht zu einer Verbindungsline zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem zweiten Widerstandselement (16) verläuft, wobei ein erster Ebenen-Abstand des ersten Widerstandselements (14) zur Ebene (E) einem zweiten Ebenen-Abstand des zweiten Widerstandselements (16) zur Ebene (E) entspricht und wobei ein dritter Ebenen-Abstand des dritten Widerstandselements (18) zur Ebene (E) einem vierten Ebenen-Abstand des vierten Widerstandselements (20) zur Ebene (E) entspricht.

4. Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Widerstandselemente (14, 16, 18, 20) so verschaltet sind, dass die Brückenspannung (U_{BC}) im stationären Zustand in einem linearen Zusammenhang steht mit dem Quotienten aus einem Wärmestrom (Φ) als Zähler und einer Wärmeleitfähigkeit (λ) als Nenner.

5. Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein vierter Abstand (r_{34}) zwischen dem dritten Widerstandselement (18) und dem vierten Widerstandselement (20) um einen Abstandsfaktor größer ist als ein fünfter Abstand zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem zweiten Widerstandselement (16), wobei der Abstandsfaktor zumindest 1,5 beträgt.

6. Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Widerstandselemente (14, 16, 18, 20) mit einer 180°-Drehsymmetrie angeordnet sind.

7. Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - die Widerstandselemente (14, 16, 18, 20) gemeinsam einen geometrischen Schwerpunkt haben und
 - das erste Widerstandselement (14) den gleichen Abstand vom Schwerpunkt hat wie das zweite Widerstandselement (16) und/oder das dritte Widerstandselement (18) den gleichen Abstand vom Schwerpunkt hat wie das vierte Widerstandselement (20).

8. Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jedes Widerstandselement (14, 16, 18, 20) gilt, dass eine gedachte Hüllkugel (30) um das Widerstandselement einen Hüllkugel-Durchmesser (h) hat, der höchstens 10 Millimeter beträgt.

9. Sensor (10) für eine Transportgrößen-Messvorrichtung zur Messung einer thermischen Transportgröße, der

- ein erstes Widerstandselement (14),
- ein zweites Widerstandselement (16),
- ein drittes Widerstandselement (18) und
- ein viertes Widerstandselement (20) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Widerstandselemente (14, 16, 18, 20) so angeordnet sind, dass
- ein erster Abstand (r_{13}) zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem dritten Widerstandselement (18) einem zweiten Abstand (r_{14}) zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem vierten Widerstandselement (20) entspricht,
- ein dritter Abstand (r_{24}) zwischen dem zweiten Widerstandselement (16) und dem vierten Widerstandselement (20) dem ersten Abstand (r_{13}) entspricht und
- eine Ebene (E) existiert, die senkrecht zu einer Verbindungslinie zwischen dem ersten Widerstandselement (14) und dem zweiten Widerstandselement (16) verläuft, wobei ein erster Ebenen-Abstand des ersten Widerstandselements (14) zur Ebene (E) einem zweiten Ebenen-Abstand des zweiten Widerstandselements (16) zur Ebene (E) entspricht.

10. Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße, mit den Schritten:

- (i) Bestromen einer Transportgrößen-Messvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche 1 bis 8,
- (ii) Messen der Brückenspannung (U_{BC}) und
- (iii) Berechnen der thermischen Transportgröße aus der Brückenspannung (U_{BC}).

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

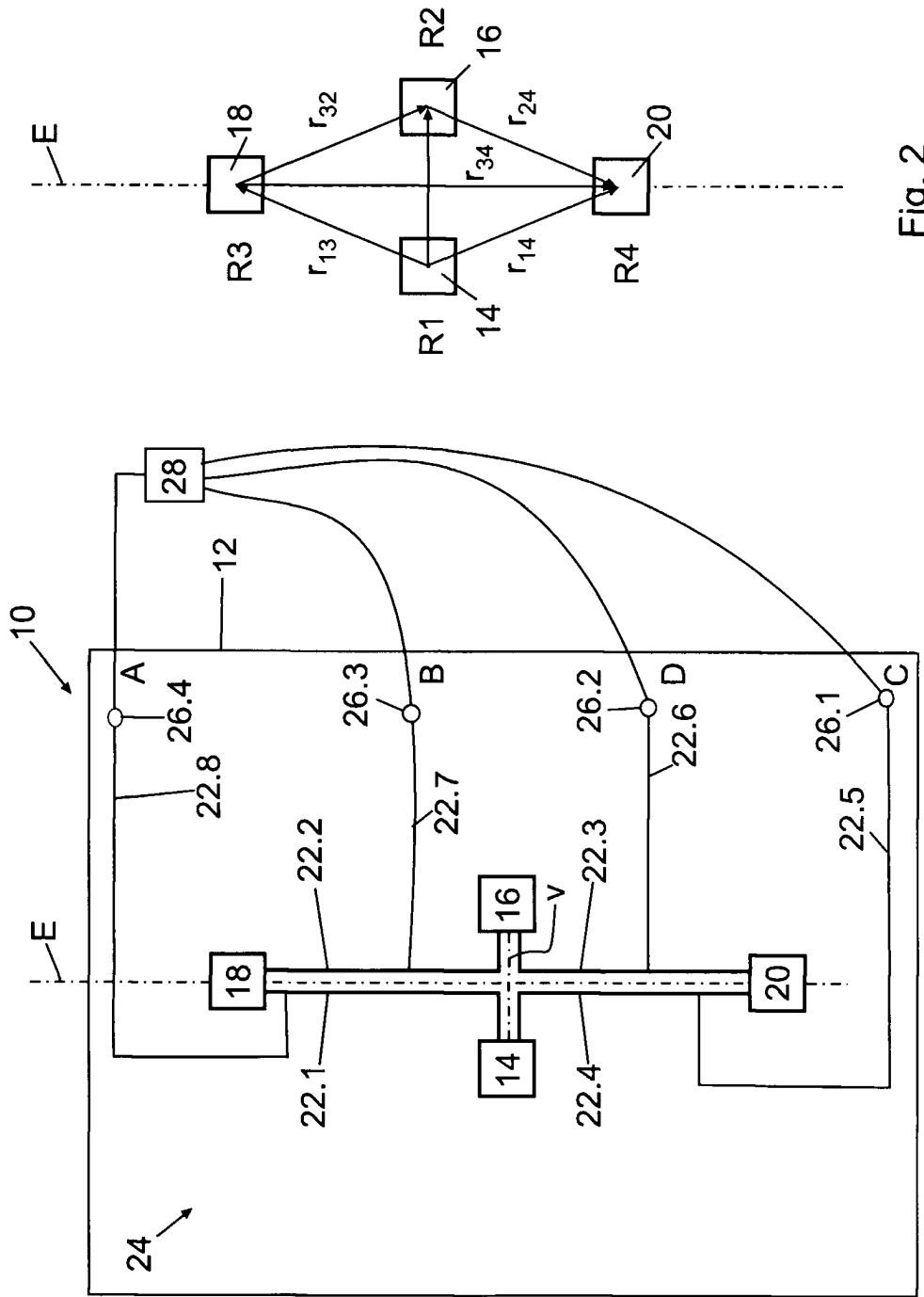


Fig. 1

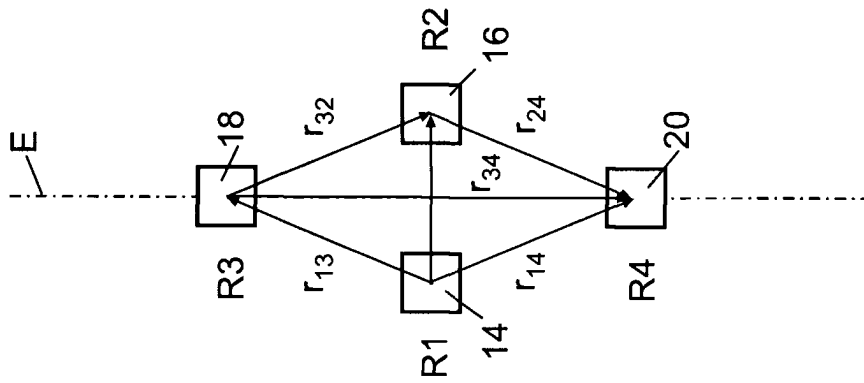


Fig. 2

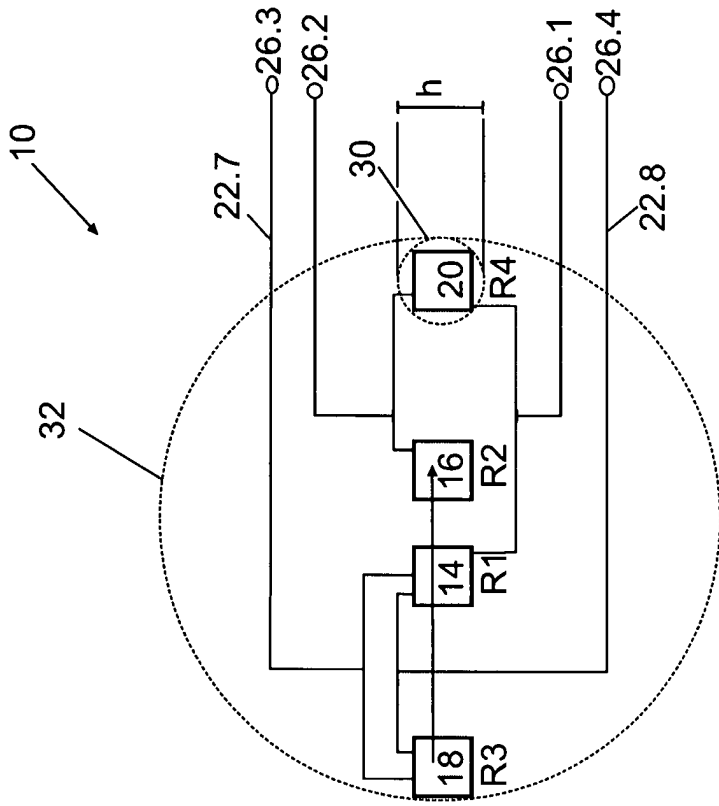


Fig. 4

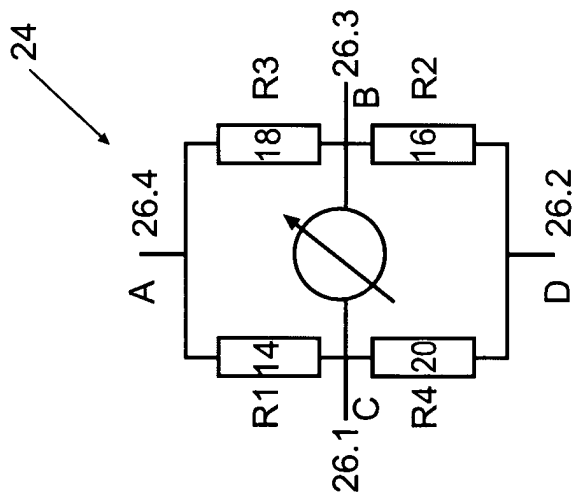


Fig. 3