



(10) **DE 10 2017 100 433 A1** 2018.07.05

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 100 433.5**

(22) Anmeldetag: **11.01.2017**

(43) Offenlegungstag: **05.07.2018**

(51) Int Cl.: **G01N 25/18 (2006.01)**  
**G01K 7/16 (2006.01)**

(66) Innere Priorität:  
**10 2017 100 106.9 04.01.2017**

(71) Anmelder:  
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten 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 PartGmbB, 38122 Braunschweig,  
DE**

(72) Erfinder:  
**Hammerschmidt, Ulf, Dr., 38112 Braunschweig,  
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

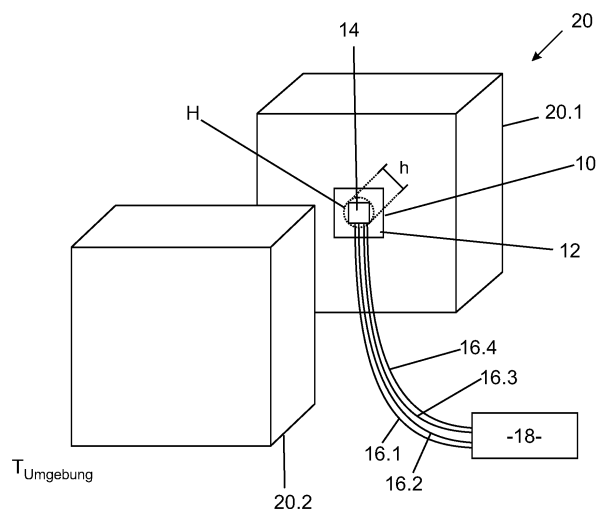
<b>DE</b>	<b>101 46 321</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2010 018 968</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2011 / 0 249 701</b>	<b>A1</b>

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Thermosensor zur Messung einer thermischen Transportgröße und Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Thermosensor (10) zur Messung einer thermischen Transportgröße ( $a, \lambda$ ), mit einem Substrat (12) und einem ohmschen Widerstandselement (14), das eine Ausdehnung ( $h$ ) von maximal 4,5 Millimeter hat. Erfindungsgemäß ist ein Thermosensorelement vorgesehen, insbesondere ein Thermoelement (32), das vom Widerstandselement (14) von zumindest zwei Seiten umgeben ist.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen Thermosensor zur Messung einer thermischen Transportgröße, mit (a) einem Substrat und (b) einem ohmschen Widerstandselement, das eine Ausdehnung von maximal 4,5 mm hat. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße.

**[0002]** Ein gattungsgemäßer Thermosensor ist aus der DE 10 2010 018 968 A1 bekannt. Ein derartiger Thermosensor hat den Vorteil, dass eine thermische Transportgröße, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit und/oder die Temperaturleitfähigkeit, mit einer geringen Messunsicherheit gemessen werden kann, auch wenn der Prüfling vergleichsweise klein ist. Bei der Berechnung der thermischen Transportgröße wird der sogenannte effektive Radius verwendet. Der effektive Radius ist der Abstand, den ein ideal punktförmiger Sensor von einer ideal punktförmigen Wärmequelle hätte. Es hat sich herausgestellt, dass der effektive Radius nicht für alle zu vermessenden Materialien eine Sensorkonstante ist. Vielmehr ist der effektive Radius bei der Messung an Prüflingen mit einer großen Wärmeleitfähigkeit kleiner als bei Messungen an Prüflingen mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit. Das ist unerwünscht.

**[0003]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messung einer thermischen Transportgröße, insbesondere bei Verwendung eines kleinen Sensors, zu verbessern.

**[0004]** Die Erfindung löst das Problem durch einen gattungsgemäßen Thermosensor, der ein Thermosensorelement, insbesondere ein Thermoelement, aufweist, das vom Widerstandselement von zumindest zwei Seiten umgeben ist. Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße, mit den Schritten eines Anordnens eines derartigen Thermosensors in thermischem Kontakt mit einem Prüfling, eines Bestromens des Widerstandselements, sodass dieses einen, insbesondere konstanten, Wärmestrom abgibt, eines Aufnehmens zumindest eines Messwerts, der die Temperatur charakterisiert mittels des Thermoelements und eines Berechnens der thermischen Transportgröße aus dem zumindest einen Messwert.

**[0005]** Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass der effektive Radius eine reine Sensorkonstante ist. In anderen Worten hängt der effektive Radius zumindest in sehr guter Näherung nicht von dem Material ab, dessen thermische Transportgröße gemessen werden soll. Dadurch wird eine geringere Messunsicherheit erreicht.

**[0006]** Vorteilhaft ist zudem, dass der erfindungsgemäße Thermosensor einfach herstellbar ist. So kann dieser beispielsweise in Form einer gedruckten Schaltung auf ein Substrat, beispielsweise ein Keramik- oder Kunststoff-Substrat aufgebracht werden. Dies ist in einem kostengünstigen Massenverfahren möglich.

**[0007]** Vorteilhaft ist zudem, dass die thermische Transportgröße von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen bestimmt werden kann. Der Thermosensor ist daher universell einsetzbar.

**[0008]** Vorteilhaft ist auch, dass das Widerstandselement - wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen - aus einem Material aufgebaut sein kann, dessen elektrischer Widerstand sich mit der Temperatur ändert. In diesem Fall kann die Temperatur sowohl mittels des Thermoelements als auch mittels des Widerstandselements gemessen werden. Es werden so zwei Messwerte für die Temperatur erhalten. Beispielsweise kann das Widerstandselement dazu verwendet werden, um die absolute Temperatur des Prüflings zu messen, wohingegen das Thermoelement dazu verwendet wird, eine Temperaturerhöhung auf Grund des Wärmestroms zu erfassen.

**[0009]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Substrat dasjenige Objekt verstanden, auf dem das ohmsche Widerstandselement aufgebracht ist. Vorzugsweise ist das Substrat dünn, das heißt, dass eine Ausdehnung in der Dickenrichtung höchstens  $1/5$ , insbesondere höchstens  $1/10$  der Ausdehnung in die beiden senkrecht dazu verlaufenden Richtungen beträgt. Vorzugsweise hat das Substrat eine Dicke von höchstens 1 mm und/oder mindestens 10  $\mu\text{m}$ .

**[0010]** Das ohmsche Widerstandselement ist vorzugsweise eine Struktur, insbesondere eine metallische Struktur, deren ohmscher Widerstand höchstens 100 Kiloohm, vorzugsweise höchstens 10 Kiloohm und besonders bevorzugt höchstens 1 Kiloohm beträgt. Als geeigneter Widerstand haben sich 100 Ohm herausgestellt. Vorzugsweise beträgt der ohmsche Widerstand zumindest 1 Ohm, insbesondere zumindest 10 Ohm.

**[0011]** Die Ausdehnung des Widerstandselements wird ohne Zuleitung bestimmt. Insbesondere wird die Ausdehnung anhand des Hüllkugeldurchmessers bestimmt. Die Hüllkugel ist diejenige gedachte Kugel minimalen Durchmessers, die das Widerstandselement vollständig umgibt.

**[0012]** Alternativ die Ausdehnung des Widerstandselements der Durchmesser der Wärmequellkugel, also derjenigen gedachten Kugel minimalen Durchmessers, in dem 90% des Wärmestroms abgege-

ben werden, wenn das Widerstandselement bestromt wird.

**[0013]** Es ist möglich und vorteilhaft, nicht aber notwendig, dass das Widerstandselement so ausgebildet ist, dass es sich beim Bestromen so erwärmt, dass die Isothermen in der Ebene des Substrats zumindest im Wesentlichen kreisförmig sind. Unter dem Merkmal, dass die Isothermen im Wesentlichen kreisförmig sind, wird insbesondere verstanden, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Isothermen im streng mathematischen Sinne kreisförmig sind. Insbesondere ist es möglich, dass die Isotherme, die zu denjenigen Temperaturen gehört, die nur die Hälfte der Differenz zwischen der Maximaltemperatur und der Umgebungstemperatur bedeutet, eine Abweichung von ihrem Ausgleichskreis hat, die höchstens 15% des Radius des Ausgleichskreises beträgt.

**[0014]** Unter dem Thermosensorelement wird jedes Element verstanden, mittels dem die Temperatur, absolut oder relativ zu einer Bezugstemperatur, messbar ist. Das Thermosensorelement ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ein Thermoelement. Alternativ kann das Thermosensorelement auch ein Widerstandsthermometerelement sein, dessen elektrischer Widerstand sich mit der Temperatur ändert. Vorzugsweise ist ein solches Widerstandsthermometerelement mit einer Auswerteeinheit verbunden, die den Widerstand stromfrei misst, beispielsweise mittels einer Wheatstone-Brückenschaltung.

**[0015]** Unter dem Merkmal, dass das Thermosensorelement, insbesondere das Thermoelement, vom Widerstandselement von zumindest zwei Seiten umgeben ist, wird verstanden, dass ein gedachter Strahl vom Mittelpunkt des Thermoelements, der in der Ebene verläuft, in der sich das ohmsche Widerstandselement erstreckt, über einen Winkelbereich von zumindest  $300^\circ$ , vorzugsweise von zumindest  $340^\circ$ , auf das Widerstandselement trifft. Ideal ist, wenn das Thermoelement von allen Seiten vom Widerstandselement umgeben ist, da dann die entstehenden Isothermen in besonders guter Näherung durch Kreise zu beschreiben sind. Das wiederum bedeutet, dass die in Näherung des Widerstandselements als punktförmig eine gute Näherung darstellt und sich so eine geringe Messunsicherheit ergibt.

**[0016]** Das Substrat ist vorzugsweise elektrisch nicht leitend. Das ohmsche Widerstandselement ist vorzugsweise als gedruckte Schaltung als das Substrat aufgebracht. Beispielsweise kann das Widerstandselement in Dünnschichttechnik oder in Dick-schichttechnik auf das Substrat aufgebracht sein. Günstig ist es, wenn das Substrat eine Folie ist. Beispielsweise kann die Folie aus Polyimid aufgebaut sein.

**[0017]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Widerstandselement gekrümmt berandet. Hierunter ist zu verstehen, dass der äußere Rand des Widerstandselements in guter Näherung als nicht-gradlinig beschrieben werden kann. Selbstverständlich ist der Übergang zwischen einem gekrümmten Rand und einem geraden Rand dahingehend fließend, dass beispielsweise ein Kreis als aus unendlich vielen geraden Abschnitten bestehend aufgefasst werden kann. Maßgeblich ist daher nicht die Mikrostruktur des Randes, sondern dessen Makrostruktur. Der äußere Rand des Widerstandselements ist gebildet durch all diejenigen Punkte des Widerstandselements, die vom Thermoelement aus gesehen bei vorgegebenem Azimutalwinkel radial den größten Abstand haben. Nur der Klarstellung halber sei darauf hingewiesen, dass unter dem Thermoelement in diesem Sinne der Bereich verstanden wird, in dem die beiden unterschiedlichen Metalle miteinander in Kontakt stehen, und nicht der gesamte Aufbau inklusive Zuleitung.

**[0018]** Vorzugsweise ist das Widerstandselement zumindest im Wesentlichen ellipsenbogenförmig, insbesondere kreisbogenförmig, berandet. Hierunter ist zu verstehen, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass das Widerstandselement im streng mathematischen Sinne ellipsenbogenförmig berandet ist. Vielmehr ist es auch möglich, dass der äußere Rand des Widerstandselements von einer idealen Ellipsenbogenform abweicht. Vorzugsweise ist die Abweichung so gering, dass durch die Annahme einer punktförmigen Wärmequelle eine Messunsicherheit bedingt wird, die höchstens 5% beträgt.

**[0019]** Vorzugsweise ist das Thermoelement in einem Zentrum eines Ausgleichskreises durch einen äußeren Rand des Widerstandselements angeordnet. Unter dem Merkmal, dass das Thermoelement im Zentrum angeordnet ist, ist zu verstehen, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass das Thermoelement im Mittelpunkt des Ausgleichskreises angeordnet ist. Es ist vielmehr auch möglich, dass das Thermoelement azentrisch angeordnet ist, wobei ein Abstand des Thermoelements in Form des geometrischen Schwerpunkts des Thermoelements vom Mittelpunkt des Ausgleichskreises höchstens das 0,15-fache des Radius des Ausgleichskreises beträgt.

**[0020]** Vorzugsweise umgibt das Widerstandselement das Thermoelement zu zumindest  $300^\circ$ . So wird eine geringe Messunsicherheit erreicht.

**[0021]** Günstig ist es, wenn das Widerstandselement zumindest einen doppelsträngigen Leiter aufweist. Durch doppelsträngige Leiter lassen sich homogene Heizleistungen erzielen, was zu einer geringen Messunsicherheit beiträgt.

**[0022]** Günstig ist es, wenn das Widerstandselement zumindest zwei elektrisch getrennte Leiter aufweist. Es hat sich herausgestellt, dass dies die Kontaktierung des Thermoelements erleichtert.

**[0023]** Um das Widerstandselement zur Temperaturmessung verwenden zu können, ist es günstig, wenn ein Temperaturkoeffizient bei 20°C zumindest  $3,8 \times 10^{-3}$  pro Kelvin beträgt, beträgt, vorzugsweise  $3,9 \times 10^{-3}$  Kelvin. Als besonders geeignet haben sich Nickel, Rhodium, Platin oder eine Legierung herausgestellt, die zumindest eines dieser Metalle zu zumindest 20 Gewichtsprozent enthält.

**[0024]** Das Substrat kann ein Keramiksubstrat sein. Das hat den Vorteil, dass der Temperatursensor bei hohen Temperaturen eingesetzt werden kann.

**[0025]** Vorzugsweise hat der Prüfling in zumindest einer Dimension eine Dicke hat, die größer ist als

$2\sqrt{6at_m}$ , wobei  $t_m$  eine Eindringzeit ist, die durch Anlegen eines deltaimpulsförmigen Wärmepulses an den Prüfling und durch Messen der Zeit ermittelt wird, die dieser Wärmepuls bis an den Rand des Prüfling braucht.

**[0026]** Erfindungsgemäß ist zudem eine Transportgrößen-Messvorrichtung zum Messen einer thermischen Transportgröße mit (a) einem erfindungsgemäßen Temperatursensor und (b) einer elektrischen Auswerteeinheit, die mit dem Widerstandselement und dem Thermoelement elektrisch kontaktiert ist, wobei die Auswerteeinheit ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten (i) Bestromen des Widerstandselements, sodass dieses einen, insbesondere konstanten, Wärmestrom abgibt, und (ii) Errechnen der thermischen Transportgröße anhand zumindest eines Messwerts des Thermoelements. Vorzugsweise ist die Auswerteeinheit zudem ausgebildet zum automatischen Berechnen der Temperatur auch aus dem elektrischen Widerstand des Widerstandselements.

**[0027]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Verfahren die Schritte eines Berechnens des Wärmestroms  $\Phi$  als das Produkt aus elektrischem Strom und elektrischer Leistung zu

$$\Phi = P = ui = R^2i \quad \text{Formel 1,}$$

wobei P die abgegebene elektrische Leistung ist, u die elektrische Spannung und i der elektrische Strom. R bezeichnet den ohmschen Widerstand des Widerstandselements. Besonders günstig ist es, wenn die elektrische Leistung P auch bei sich änderndem ohmschen Widerstand R konstant gehalten wird.

**[0028]** Vorzugsweise umfasst das Verfahren ein Berechnen der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und/oder einer Temperaturleitfähigkeit  $a$  anhand einer analytischen Lösung der Wärmeleitfähigkeitsgleichung für eine Punktquelle. Die erfinderische Idee ist insbesondere, dass es möglich ist, bei Verwendung einer kleinen Wärmequelle diese als Punktquelle anzunähern, ohne dass dadurch große Messfehler entstehen.

**[0029]** Besonders bevorzugt wird die Wärmeleitfähigkeit anhand der Formel  $\lambda = \frac{\Phi}{4\pi r \Delta T}$  berechnet, wobei

$$\Phi = ui \quad \text{Formel 2}$$

gilt. Die Formelgröße r bezeichnet eine Gerätekonstante des Widerstandselements, die auch als effektiver Radius bezeichnet werden kann.  $\Delta T$  wird mittels des Thermosensorelements gemessen.

**[0030]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Errechnen der Transportgröße in Form der Temperaturleitfähigkeit aus der Thermospannung oder dem ohmschen Widerstand des Thermosensorelements ein Bestimmen eines stationären Werts für die Thermospannung oder den ohmschen Widerstand. Aufgrund der Tatsache, dass das Widerstandselement die oben genannten Abmessungen hat, kann es mit hinreichender Näherung als punktförmig angesehen werden. Die Wärmeleitungsgleichung wird dann durch die folgende Funktion gelöst:

$$\Delta T(r,t) = \frac{\Phi}{4\pi r \lambda} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4at}}\right), \quad \text{Formel 3}$$

die für kleine Argumente der komplementären Fehlerfunktion  $\operatorname{erfc}(\dots)$  wie folgt genähert werden kann:

$$\Delta T(r,t) \approx \frac{\Phi}{4\pi r \lambda} \Leftrightarrow \lambda \approx \frac{\Phi}{4\pi r \Delta T_s}. \quad \text{Formel 4}$$

**[0031]** Diese Näherung gilt für

$$\left(\frac{r}{\sqrt{4at}}\right) \rightarrow 0. \quad \text{Formel 5}$$

**[0032]** Es ist zu ersehen, dass dieser Term bei konstantem effektivem Radius r mit zunehmender Zeit t schnell gegen null strebt. Daraus folgt, dass nach einer kurzen Wartezeit  $t_s$  ein mit hinreichender Genauigkeit stationärer Zustand eintritt. Der Index s steht für stationär. Nach einer Wartezeit  $t_{\text{warte}} \geq t_s$  (von beispielsweise maximal 10 Minuten) wird eine stationäre Thermospannung  $U_{\text{th,S}}$  oder ein stationärer ohmscher Widerstand  $R_s$  oder eine stationäre Ther-

mospannung  $U_{th,s}$  zumindest einmal gemessen. Aus dem Wert  $U_{th,s}$  oder  $R_s$  oder  $U_{th,s}$  wird nach Formel 3 die zugehörige Temperatur und daraus und der Umgebungstemperatur  $T_{Umgebung}$  die stationäre Temperaturdifferenz  $\Delta T_s := \Delta T(t \geq t_s)$  berechnet. Daraus folgt mit Formel 4 die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ .

**[0033]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

**Fig. 1** in Teilfigur 1a schematisch eine erfindungsgemäße Transportgrößen-Messvorrichtung mit einem erfindungsgemäßen Thermosensor und in Teilfigur 1b eine Querschnittsansicht durch ein Prüfling mit dem Thermosensor,

**Fig. 2** den Thermosensor gemäß **Fig. 1** in einer schematischen detaillierteren Ansicht,

**Fig. 3** eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Thermosensors und

**Fig. 4** in der Teilfigur **Fig. 4a** eine schematische Messkurve der vom Thermoelement gemessenen Thermospannung sowie in Teilfigur 4b ein Diagramm, in dem die errechnete Temperaturdifferenz zur Umgebung über den Kehrwert der Wurzel der Zeit ausgetragen ist.

**Fig. 5** zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Thermosensors.

**[0034]** **Fig. 1a** zeigt schematisch erfindungsgemäß einen Thermosender **10**, der in Substrat **12**, im vorliegenden Fall in Form einer Polyimid-Folie, und ein darauf aufgebrachtes ohmsches Widerstandselement **14** umfasst. Das Widerstandselement **14** hat eine Ausdehnung  $h$  von im vorliegenden Fall 1,5 mm. Der Thermosensor **10** steht über Kabel 16.1, 16.2, 16.3, 16.4 in elektrischer Verbindung mit einer Auswerteeinheit **18**. Die Ausdehnung  $h$  ist hier der Durchmesser einer Hüllkugel  $H$  um das Widerstandselement **14**. Der Thermosensor **10** ist zwischen einem ersten Probenteil 20.1 und einem zweiten Probenteil 20.2 eines Prüflings **20** angeordnet.

**[0035]** **Fig. 1b** zeigt den Thermosensor **10** zwischen den beiden Probenteilen 20.1 und 20.2. Es ist zu erkennen, dass der Thermosensor **10** mit innigem thermischem Kontakt zu den Probenteilen 20.1, 20.2 zwischen beiden angeordnet ist. Beispielsweise werden die beiden Probeteile aufeinander zu gespannt, um den thermischen Kontakt zu verbessern, das ist aber nicht notwendig.

**[0036]** **Fig. 2** zeigt den Thermosensor **10** gemäß **Fig. 1** in einer detaillierteren Ansicht. Es ist zu erkennen, dass das Widerstandselement **14** aus einem doppelsträngigen Leiter **22** gebildet ist, der über zwei Anschlussstrecken 24.1, 24.2 mit jeweils einem Kontaktpad 26.1 bzw. 26.2 verbunden ist. Der elektrische Strom fließt im Betrieb also vom ersten Kontaktpad 26.1 zum zweiten Kontaktpad 26.2. Die Kontaktpads

26.1 und 26.2 sind aber entbehrlich, insbesondere ist es auch möglich, dass der Leiter **22** direkt über Drähte elektrisch kontaktiert wird.

**[0037]** Der doppelsträngige Leiter **22** besitzt einen ersten Strang 28.1 und einen dazu parallel verlaufenden zweiten Strang 28.2. Beispielsweise haben die beiden Stränge einen Abstand von  $d=0,1\text{mm}$ . Dieser Abstand kann aber auch kleiner oder größer sein.

**[0038]** **Fig. 2** zeigt, dass ein äußerer Rand **30** kreisbogenförmig ist. Ein Thermoensorelement **32**, im vorliegenden Fall ein Thermoelement **32**, ist in einem Mittelpunkt eines Ausgleichskreises **A** durch den äußeren Rand **30** angeordnet. Es sei darauf hingewiesen, dass bei einem kreisbogenförmigen Rand der Ausgleichskreis **A** mit dem Rand selbst zusammenfällt. Der besseren Übersichtlichkeit halber ist der Ausgleichskreis **A** vergrößert gezeichnet.

**[0039]** Das Thermoelement **32** besitzt einen ersten Schenkel 34.1 aus einem ersten Teil oder einer ersten Metalllegierung und einem zweiten Schenkel 34.2 aus einem zweiten Metall oder einer zweiten Metalllegierung. Das Thermoelement **32** bezeichnet die Region, in der die beiden Schenkel 34.1, 34.2 elektrischen Kontakt miteinander haben. Wie oben angegeben, befindet sich dieser Bereich im Zentrum des Ausgleichskreises **A**. Die beiden Schenkel 34.1, 34.2 sind elektrisch durch Kontaktpads 26.3, 26.4 kontaktiert.

**[0040]** **Fig. 2** zeigt, dass das Thermoelement **32** zu annähernd  $360^\circ$  vom Widerstandselement **14** gegeben ist. Lediglich in dem Bereich, in dem die Schenkel 34.1, 34.2 vom Thermoelement **32** radial nach außen wegführen, und auf der diesem Bereich gegenüberliegenden Bereich ist das Thermoelement **32** nicht vom Widerstandselement **14** umgeben. Beim Bestromen des Widerstandselements über die Kontaktpads 36.1, 36.2 ergeben sich so Isothermen, die in sehr guter Näherung als kreisförmig gesehen werden können.

**[0041]** **Fig. 3** zeigt eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Thermosensors **10**, bei dem das Widerstandselement **14** zwei, im vorliegenden Fall doppelsträngige, Leiter 22.1, 22.2 umfasst. Die Leiter 22.1, 22.2 bestehen aus Platin, Nickel, Rhodium oder einer Legierung aus zwei oder drei der genannten Metalle. Selbstverständlich sind auch andere Materialien möglich. Das Substrat **12** ist eine Keramik, beispielsweise Korund. Das Substrat **12** hat beispielsweise eine Dicke von 0,01 mm und 2 mm. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass das Substrat elastisch ist.

**[0042]** Beim Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens bestromt die Auswerteeinheit **18** das Widerstandselement **14** so, dass es einen konstanten

Wärmestrom  $\Phi$  abgibt. Der Wärmestrom  $\Phi$  entspricht der abgegebenen elektrischen Leistung  $P$ . Gleichzeitig dazu misst die Auswerteeinheit **18** kontinuierlich eine Thermospannung  $U_{th}$ , die am Thermoelement **32** auf Grund einer Temperaturerhöhung  $\Delta t$  gegenüber einer Umgebungstemperatur  $T_u$  anliegt.

**[0043]** Fig. 4a zeigt den Verlauf der Thermospannung  $U_{th}$  in beliebigen Einheiten.

**[0044]** Fig. 4b zeigt die daraus berechneten Temperaturerhöhungen  $\Delta t$  im Vergleich zur Umgebungstemperatur, in die über den Kehrwert der Wurzel der Zeit betragen ist. Es ist zu erkennen, dass sich in einem Zeitintervall zwischen der Wartezeit  $t_{warte}$  und einer Endzeit  $t_{end}$  die Temperaturerhöhung einen linearen Verlauf zeigt.

**[0045]** Durch das Auftragen gegen

$$t^* = \frac{1}{\sqrt{t}} \quad \text{Formel 6}$$

gilt bei einer Entwicklung der Arbeitsgleichung

$$\Delta T(r,t) = \frac{\Phi}{4\pi r\lambda} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4at}}\right), \quad (\text{Formel 3})$$

in eine Maclaurin-Reihe:

$$\Delta T(r,t) = \frac{\Phi}{4\pi r\lambda} \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{r}{\sqrt{4at}} + O\left(\frac{r}{\sqrt{4at}}\right)^2 \right] \approx n - m t^* \quad \text{Formel 7}$$

mit einer Steigung  $m$  und einem Achsabschnitt  $n$ . Für diese gilt

$$n = \frac{\Phi}{4\pi r\lambda} \quad \text{Formel 8}$$

und

$$m = \frac{\Phi}{4\pi r\lambda} \frac{2}{\sqrt{\pi}} = \frac{\Phi}{2\pi^{3/2} r\lambda}. \quad \text{Formel 9}$$

**[0046]** Auflösen liefert

$$\lambda = \frac{\Phi}{4\pi rn} \quad \text{Formel 10}$$

und

$$a = \frac{\Phi}{2\pi^{3/2} r m} \Leftrightarrow a = \frac{n^2 r^2}{m^2 \pi} \quad \text{Formel 11}$$

**[0047]** Die Auswerteeinheit **18** ist eingerichtet zum automatischen Berechnen der thermischen Transportgrößen  $a$  und/oder  $\lambda$ .

**[0048]** Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren reicht es aus, wenn das ohmsche Widerstandselement mit einem elektrischen Strom beaufschlagt wird, der zu einem abgegebenen Wärmestrom von höchstens 1 Watt, insbesondere von 100 Milliwatt, führt.

**[0049]** Die Berechnung der Temperatur  $T$  erfolgt auf Basis der Formeln, die in der DE 10 2010 018 968 A1 abgegeben sind. Wie im Folgenden beschrieben wird aus dieser Gleichung die thermische Transportgröße in Form der Temperaturleitfähigkeit  $a$  oder der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  berechnet.

**[0050]** Fig. 5 zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Thermosensors **10**, bei dem das Thermoelement **32** über eine Leitung kontaktiert ist, die sich bezüglich des Substrats **12** auf der Seite befindet, die der Seite mit dem Widerstandselement **14** gegenüberliegt. Die in der Ansicht gemäß Fig. 5 hinter dem Substrat **12** liegenden Leiter sind gestrichelt eingezeichnet. Das Widerstandselement **14** ist als Spirale aus einem doppelsträngigen Leiter ausgebildet.

**[0051]** Alternativ ist es möglich, dass das gesamte Thermoelement **34** auf einer Seite des Substrats **12** angeordnet ist und das Widerstandselement **14** auf der gegenüberliegenden, anderen Seite. In diesem Fall sollte das Substrat **12** möglichst dünn und vorzugsweise höchstens 0,5 Millimeter dick sein.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Thermosensor
<b>12</b>	Substrat
<b>14</b>	Widerstandselement
<b>16</b>	Kabel
<b>18</b>	Auswerteeinheit
<b>20</b>	Probenteil
<b>22</b>	Leiter
<b>24</b>	Anschlussstrecke
<b>26</b>	Kontaktpad
<b>28</b>	Strang
<b>30</b>	äußerer Rand
<b>32</b>	Thermoelement
<b>34</b>	erster Schenkel
<b>h</b>	Ausdehnung
<b>H</b>	Hüllkugel
<b>a</b>	Temperaturleitfähigkeit

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
<b>A</b>	Ausgleichkreis
<b>R</b>	elektrischer Widerstand des Widerstandselements
<b>U<sub>th</sub></b>	Thermospannung
$\Delta t$	Temperaturerhöhung
<b>T<sub>u</sub></b>	Umgebungstemperatur
$t_{\text{warte}}$	Wartezeit
$t_{\text{End}}$	Endzeit

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 102010018968 A1 [0002, 0049]



**Patentansprüche**

1. Thermosensor (10) zur Messung einer thermischen Transportgröße ( $a$ ,  $\lambda$ ), mit

(a) einem Substrat (12) und

(b) einem ohmschen Widerstandselement (14), das eine Ausdehnung ( $h$ ) von maximal 4,5 Millimeter hat **gekennzeichnet durch**

(c) ein Thermosensorelement, insbesondere ein Thermoelement (32), das vom Widerstandselement (14) von zumindest zwei Seiten umgeben ist.

2. Thermosensor (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Widerstandselement (14) gekrümmt berandet, insbesondere ellipsenbogenförmig berandet, ist.

3. Thermosensor (10) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Thermoelement (32) in einem Zentrum eines Ausgleichskreises durch einen äußeren Rand des Widerstandselements (14) angeordnet ist.

4. Thermosensor (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Widerstandselement (14) das Thermoelement (32) zu zumindest  $300^\circ$  umgibt.

5. Thermosensor (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Widerstandselement (14) zumindest einen doppelsträngigen Leiter (22) aufweist.

6. Thermosensor (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Widerstandselement (14) zumindest zwei elektrisch getrennte Leiter (22.1, 22.2) aufweist.

7. Thermosensor (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (12) ein Keramiksubstrat oder eine Kunststoffolie ist.

8. Transportgrößen-Messvorrichtung zum Messen einer thermischen Transportgröße ( $a$ ,  $\lambda$ ) mit

(a) einem Thermosensor (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche und

(b) einer elektrischen Auswerteeinheit (18), die mit dem Widerstandselement (14) und dem Thermoelement (32) elektrisch kontaktiert ist

(c) wobei die Auswerteeinheit (18) ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(i) Bestromen des Widerstandselements (14), sodass dieses einen Wärmestrom ( $\Phi$ ) abgibt, und

(ii) Errechnen der Transportgröße ( $\lambda$ ,  $a$ ) anhand zumindest eines Messwerts ( $U_{th}$ ) des Thermoelements (32).

9. Transportgrößen-Messvorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswerteeinheit (18) ausgebildet ist zum automatischen Berechnen zumindest einer Temperatur ( $\Delta T$ ) aus einem elektrischen Widerstand ( $R$ ) des Widerstandselements (14).

10. Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße ( $\lambda$ ,  $a$ ) mit den Schritten:

(i) Anordnen eines Thermosensors (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 7 in thermischem Kontakt mit einem Prüfling (20),

(ii) Bestromen des Widerstandselements (14), sodass dieses einen Wärmestrom ( $\Phi$ ) abgibt,

(iii) Aufnehmen zumindest eines Messwerts ( $U_{th}(t)$ ), der die Temperatur ( $T$ ) charakterisiert, mittels des Thermoelements (32) und

(iv) Berechnen der thermischen Transportgröße ( $\lambda$ ,  $a$ ) aus dem zumindest einen Messwert ( $U_{th}(t)$ ).

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

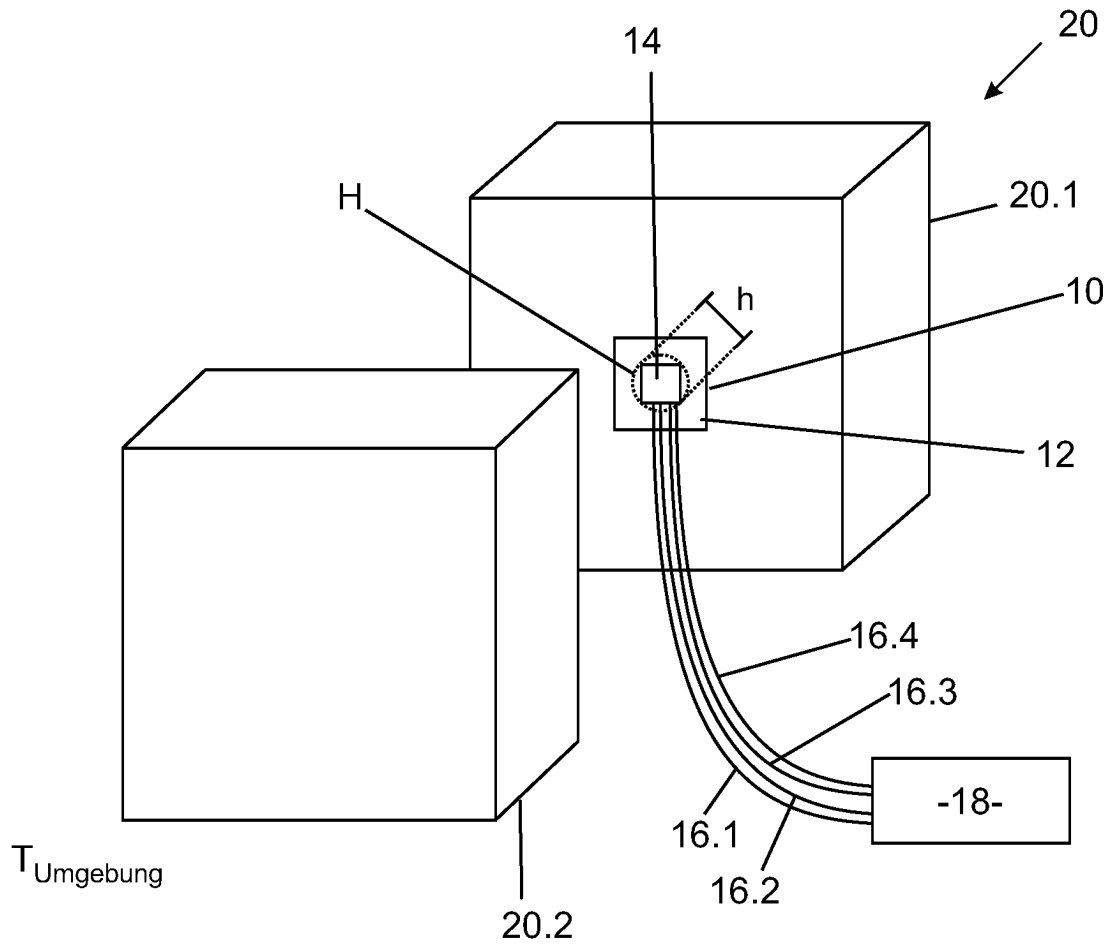


Fig. 1a

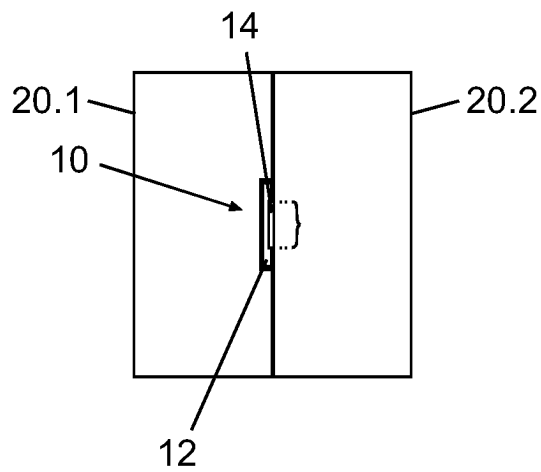


Fig. 1b

Fig. 1

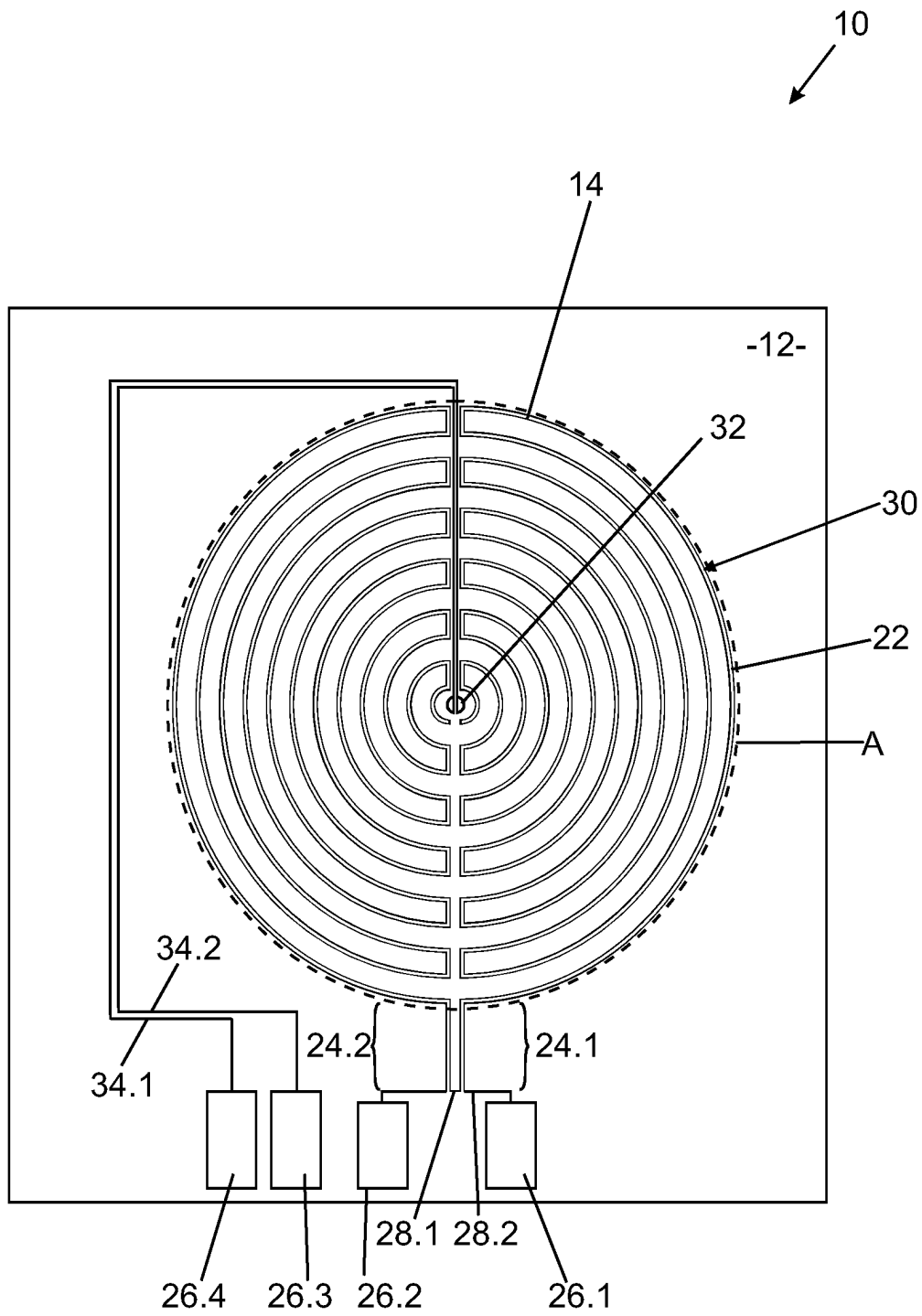


Fig. 2

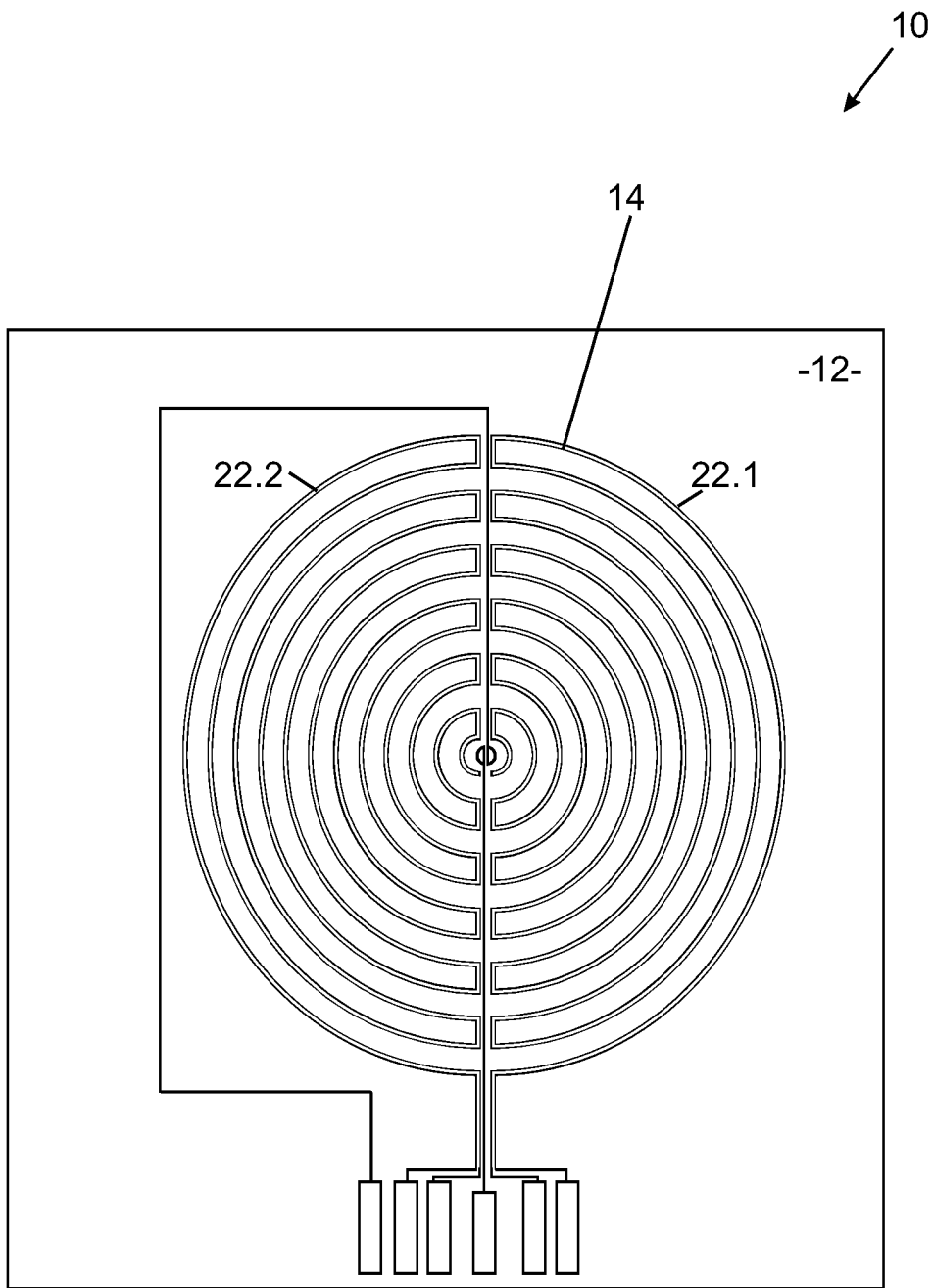


Fig. 3

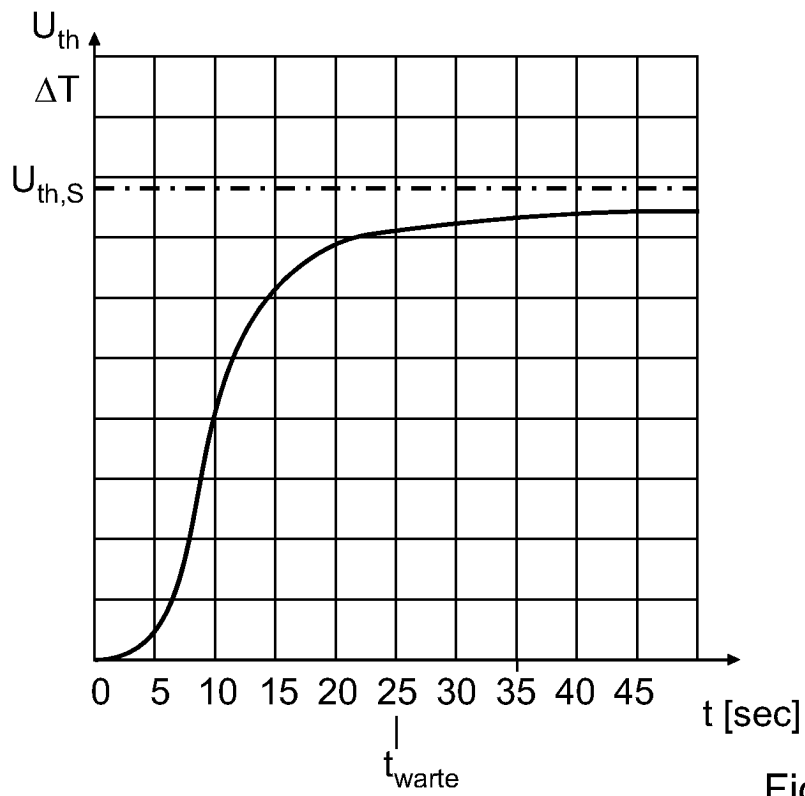


Fig. 4a

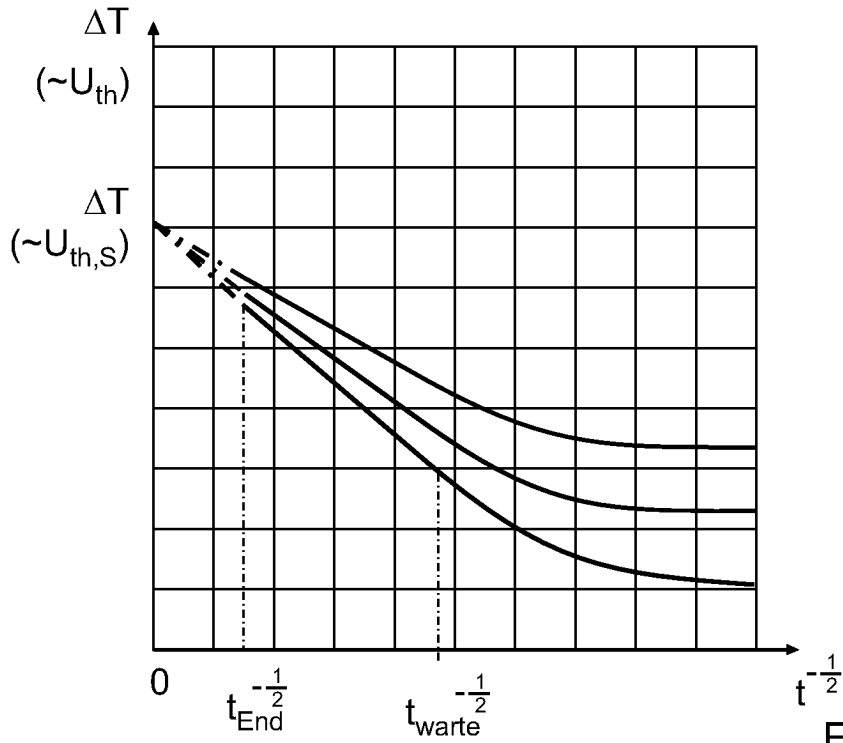


Fig. 4b

Fig. 4

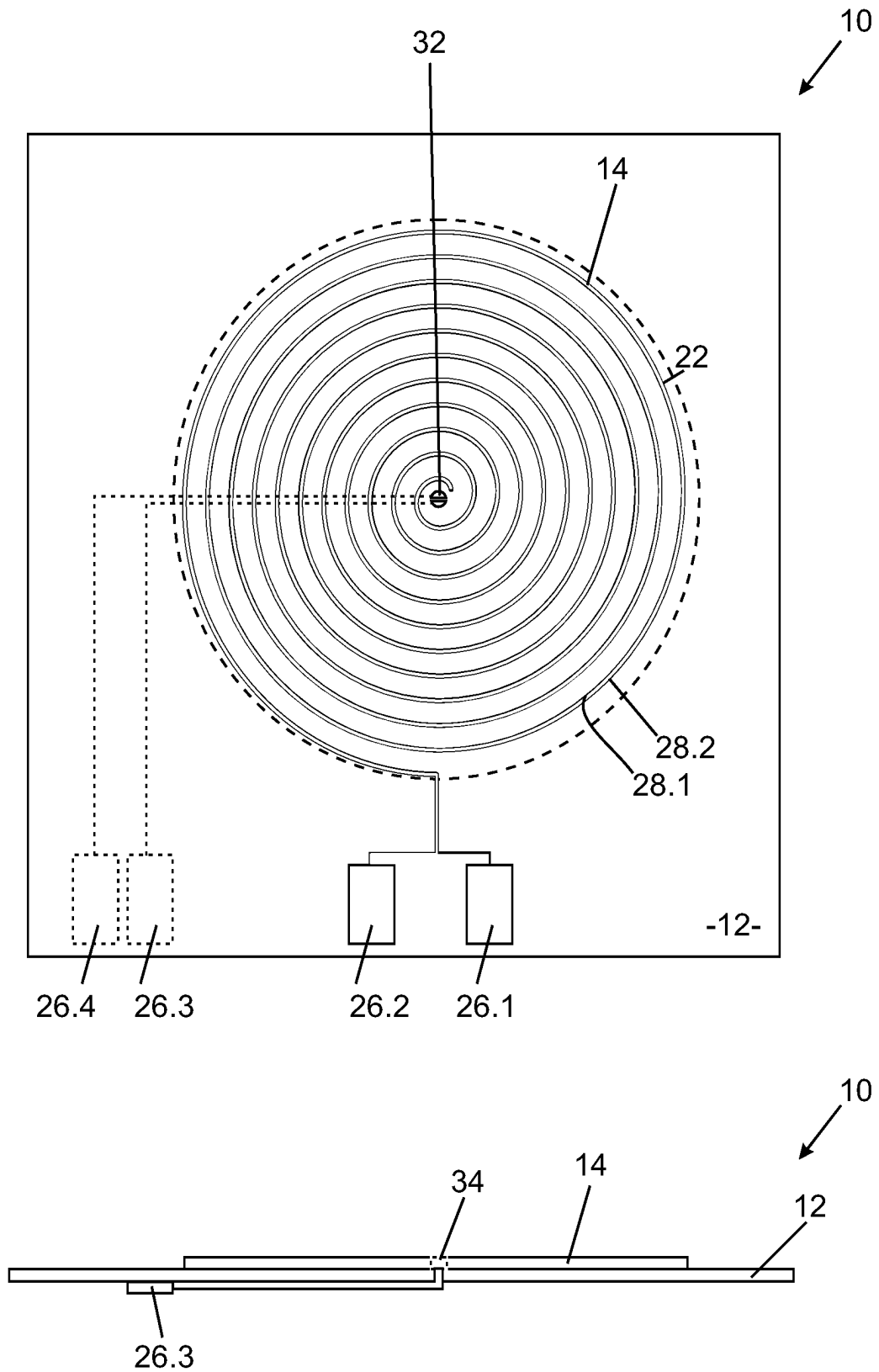


Fig. 5