



(10) **DE 10 2012 019 657 B3** 2013.10.31

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 019 657.1**

(22) Anmeldetag: **08.10.2012**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **31.10.2013**

(51) Int Cl.: **G01N 25/20** (2012.01)

G01P 5/10 (2012.01)

G01N 27/18 (2012.01)

Innerhalb von drei 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, endvertreten durch
die Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
38116, Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:

**GRAMM, LINS & PARTNER GbR, 38122,
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:

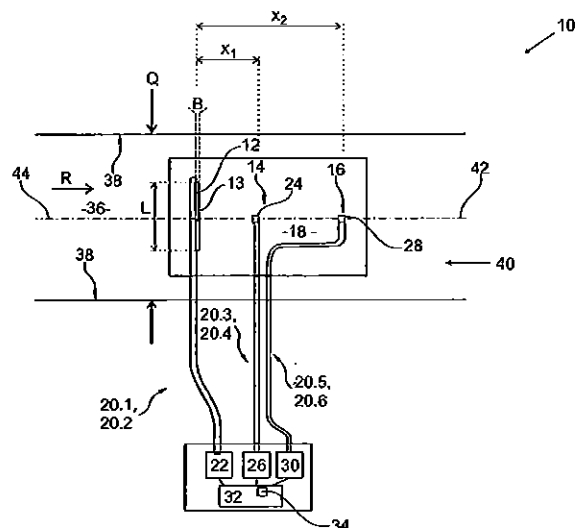
**Hammerschmidt, Ulf, Dr., 38112, Braunschweig,
DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	698 37 946	T2
EP	1 995 571	A1
WO	94/ 20 825	A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ermitteln einer thermischen Transportgröße und einer Strömungsgeschwindigkeit in einem strömenden Medium und Thermotransportgrößen-Messanordnung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer thermischen Transportgröße (a) und einer Strömungsgeschwindigkeit (v) in einem strömenden Medium (36), mit den Schritten: impulsförmiges Erwärmen des zu vermessenden Mediums (36) mittels einer Wärmequelle (12), Messen einer ersten Temperatur (T_1), die einem ersten Abstand (x_1) von der Wärmequelle (12) zuordenbar ist, in Abhängigkeit von der Zeit (t), Messen zumindest einer zweiten Temperatur (T_2) in einem zweiten Abstand (x_2) von der Wärmequelle in Abhängigkeit von der Zeit (t), Ermitteln der thermischen Transportgröße aus einem Ersttemperatur-Maximalwert ($T_{\max(1)}$), der die maximal erreichte erste Temperatur kodiert, und einem Zweittemperatur-Maximalwert ($T_{\max(2)}$), der die maximal erreichte zweite Temperatur kodiert, und Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit (v) anhand eines ersten Maximaltemperatur-Zeitpunkts ($t_{\max(1)}$), zu dem die erste Temperatur (T_1) den Ersttemperatur-Maximalwert ($T_{\max(1)}$) durchläuft, und eines zweiten Maximaltemperatur-Zeitpunkts ($t_{\max(2)}$), zu dem die zweite Temperatur (T_2) den Zweittemperatur-Maximalwert ($T_{\max(2)}$) durchläuft.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer thermischen Transportgröße und einer Strömungsgeschwindigkeit und Transportgrößen-Messanordnung.

[0002] Thermische Transportgrößen, nämlich die Wärmeleitfähigkeit und/oder die Temperaturleitfähigkeit, werden beispielsweise bei Gasen gemessen, um daraus deren Zusammensetzung ableiten zu können. Insbesondere ist die Messung der thermischen Transportgröße relevant bei der Ermittlung der Zusammensetzung von Erdgas. Die thermische Transportgröße hängt nämlich von dem Gehalt des Brenngases an Methan und anderen Gasen ab. Insbesondere ändert sich die Transportgröße in Abhängigkeit von der Kohlendioxid-Konzentration, die ein Kriterium für die Beurteilung der Qualität des Gases ist.

[0003] Bei bekannten Verfahren zur Bestimmung der thermischen Transportgröße wird eine definierte Wärmemenge in das Gas eingebracht und die daraus resultierende Erwärmung des Gases erfasst. Bekannte Verfahren beruhen dabei auf der stationären Wärmeleitungsgleichung, das heißt, dass sie ein ruhendes, konvektionsfreies Gas voraussetzen. Es wird ein Anteil aus dem strömenden Gas entnommen, zur Ruhe gebracht und dann vermessen.

[0004] Aus der DE 101 44 873 A1 ist bekannt, eine poröse Kappe an dem Messsensor anzuordnen. Die poröse Kappe verringert die Strömungsgeschwindigkeit des Gases so weit, dass in guter Näherung von einem ruhenden Gas ausgegangen werden kann. Ändert sich die Zusammensetzung des Gases jedoch schnell, so kann diese Änderung nicht ebenso schnell erfasst werden, da sich zunächst die Konzentration in dem Raum, der von der porösen Kappe abgedeckt wird, den äußeren Umgebungen anpassen muss.

[0005] Aus der DE 698 37 946 T2 ist eine Vorrichtung zur Bestimmung einer thermischen Eigenschaft eines Fluids bekannt, bei der eine Heizvorrichtung mit einem periodisch schwankenden Heizstrom beaufschlagt wird. In abwärtiger Richtung ist ein Messaufnehmer angeordnet, der die Temperaturschwankungen des Fluids aufzeichnet, die von der schwankenden Heizleistung hervorgerufen werden. Aus der Phasenverzögerung zwischen der periodisch schwankenden Heizleistung und dem periodisch schwankenden Temperaturmessaufnehmer kann eine thermische Transportgröße, beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit, bestimmt werden.

[0006] Aus der EP 1 995 571 A1 ist eine Vorrichtung bekannt, bei der ein Wärmesignal zum Messen einer Flussgeschwindigkeit verwendet wird. Die Strömungsgeschwindigkeit wird – anders als bei der oben beschriebenen Vorrichtung – nicht aus der Phasenverschiebung zwischen der Heizleistung und der Temperaturkurve ermittelt, sondern aus zwei Temperaturkurven, die durch räumlich beabstandete Sensoren aufgenommen werden. Auf diese Weise wird die Ansprechzeit des Temperatursensors, die ansonsten eine Fehlerquelle darstellt, eliminiert.

[0007] Aus der WO 94/20825 ist ein Verfahren zum Bestimmen einer Flussgeschwindigkeit eines Fluids, insbesondere eines giftigen und/oder explosiven Gases in einer korrosiven Atmosphäre, bekannt, bei dem der Gasstrom impulsartig erwärmt wird. Stromabwärts sind Thermometer angeordnet, die die Zeitpunkte bestimmen, zu denen die Temperaturmaxima die Position passieren. Eine Lehre zur Bestimmung einer thermischen Transportgröße wird hier nicht gegeben.

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

[0009] Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren zum Ermitteln einer thermischen Transportgröße und einer Strömungsgeschwindigkeit in einem strömenden Medium, mit den Schritten: (i) impulsförmiges Erwärmen des zu vermessenden Mediums mittels einer Wärmequelle, (ii) Messen einer ersten Temperatur, die einem ersten Abstand von der Wärmequelle zuordenbar ist, in Abhängigkeit von der Zeit, (iii) Messen zumindest einer zweiten Temperatur in einem zweiten Abstand von der Wärmequelle in Abhängigkeit von der Zeit, (iv) Ermitteln der thermischen Transportgröße aus einem Ersttemperatur-Maximalwert, der die maximal erreichte erste Temperatur kodiert, und einem Zweittemperatur-Maximalwert der die maximal erreichte zweite Temperatur kodiert, und (v) simultan Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit (v) anhand eines ersten Maximaltemperatur-Zeitpunkts, zu dem die erste Temperatur den Ersttemperatur-Maximalwert durchläuft, und eines zweiten Maximaltemperatur-Zeitpunkts, zu dem die zweite Temperatur den Zweittemperatur-Maximalwert durchläuft.

[0010] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch eine Thermotransportgrößen-Messanordnung mit (i) einer Wärmequelle, die eingerichtet ist zum Abgeben eines impulsförmigen Wärme-

stroms in ein strömendes Medium, (ii) einer ersten Temperaturmessvorrichtung, die angeordnet ist zum laminaren Überströmtwerden mit dem Medium und zum Messen einer ersten Temperatur, die einem ersten Abstand von der Wärmequelle zuordenbar ist, in Abhängigkeit von der Zeit, (iii) zumindest einer zweiten Temperaturmessvorrichtung, die angeordnet ist zum laminaren Überströmtwerden mit dem Medium und zum Messen zumindest einer zweiten Temperatur in einem zweiten Abstand von der Wärmequelle in Abhängigkeit von der Zeit, und (iv) einer elektrischen Auswerteeinheit, die eingerichtet ist zum automatischen durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0011] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass sich ändernde Zusammensetzungen des Gases schnell ermittelt werden können. Soll beispielsweise die Gesamtmenge an Methan ermittelt werden, das in einem Gasgemisch mit schwankender Strömungsgeschwindigkeit und sich ändernder Konzentration durch eine Gasleitung geströmt ist, so müssen sowohl die momentane Konzentration als auch die momentane Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein. Ein Zeitversatz zwischen der Messung der beiden Größen ist vermeidbar, so dass eine höhere Messgenauigkeit erreichbar ist.

[0012] Vorteilhaft ist zudem, dass die Messung der thermischen Transportgröße und der Strömungsgeschwindigkeit mit einer kleinen Messanordnung messbar ist. Es ist ein weiterer Vorteil, dass die Messung sehr einfach ist, insbesondere werden keine beweglichen Teile benötigt. Das führt zudem zu einer großen Robustheit der Messanordnung und zu einer langen Lebensdauer.

[0013] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem impulsförmigen Erwärmen eine Erwärmung verstanden, die über eine so kurze Zeitdauer erfolgt, dass eine Näherung als Dirac-Impuls zu einem Fehler von höchstens 5% führt, beispielsweise über weniger als eine Sekunde, insbesondere über weniger als eine Zehntelsekunde.

[0014] Unter dem Medium wird insbesondere ein Fluid verstanden, beispielsweise ein Gas oder Gasgemisch. Es kann sich aber zum Beispiel auch um eine Flüssigkeit oder eine Paste handeln.

[0015] Günstig ist es, wenn die Wärmequelle linienförmig oder punktförmig ist. Unter einer linienförmigen Wärmequelle wird insbesondere eine Wärmequelle verstanden, die in einer Raumdimension eine Ausdehnung hat, die zumindest zehnfach größer ist als die Ausdehnungen in die beiden anderen Raumrichtungen.

[0016] Unter einer punktförmigen Wärmequelle wird insbesondere eine Wärmequelle verstanden, deren Hüllkugel einen Durchmesser von höchstens 4,5 Millimeter, insbesondere höchstens 1 Millimeter, hat. Die Hüllkugel ist diejenige gedachte Kugel minimalen Durchmessers, in der die Wärmequelle vollständig Platz findet.

[0017] Unter dem Merkmal, dass die erste Temperatur einem ersten Abstand von der Wärmequelle zuordenbar ist, wird insbesondere verstanden, dass es möglich ist, dass zum Bestimmen der Temperatur ein Thermometer verwendet wird, das in einem von Null verschiedenen Abstand von der Wärmequelle angeordnet ist.

[0018] Unter dem Merkmal, dass die thermische Transportgröße anhand der angegebenen Größen berechnet wird, ist insbesondere zu verstehen, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Größen selbst direkt verwendet werden. Insbesondere ist es auch möglich, dass zur Berechnung digitale Signale verwendet werden, die die entsprechende Größe kodieren.

[0019] Die in Anspruch 1 angegebenen Schritte können, müssen aber nicht in der angegebenen Reihenfolge durchgeführt werden. Beispielsweise kann das Ermitteln der thermischen Transportgröße und das Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit nacheinander oder gleichzeitig durchgeführt werden. Besonders günstig ist es, wenn das Ermitteln der thermischen Transportgröße und das Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit in unmittelbarem zeitlichem Zusammenhang erfolgt, insbesondere einem zeitlichen Abstand von weniger als 5 Sekunden, insbesondere in einem Abstand von weniger als 1 Sekunde.

[0020] Vorzugsweise erfolgt das Ermitteln der thermischen Transportgröße und der Strömungsgeschwindigkeit anhand von Daten, die mit ein und demselben Sensorelement aufgenommen wurden. Unter dem Sensorelement wird dabei die Komponente der Temperaturmessvorrichtung verstanden, die auf die Temperaturänderung reagiert, also beispielsweise eine Metallisierung.

[0021] Es ist vorteilhaft, nicht aber notwendig, dass die thermische Transportgröße einerseits und die Strömungsgeschwindigkeit andererseits aus dem gleichen Datensatz ermittelt werden. Da das zu vermessende Substrat impulsförmig erwärmt wird, und die Temperaturmaxima im geringen Abstand von der Wärmequel-

le ermittelt werden können, kann das Verfahren im Rahmen einer bevorzugten Ausführungsform in kurzen Zeitabständen hintereinander ausgeführt werden. Insbesondere ist es möglich, dass das Verfahren häufiger als sechsmal pro Minute durchgeführt wird, insbesondere zumindest einmal pro Sekunde. Eine so hohe Wiederholungsgeschwindigkeit führt zu einer Vielzahl an Messwerten für die thermische Transportgröße und die Strömungsgeschwindigkeit, so dass sich durch Mittelung ein robuster Messwert erhalten lässt.

[0022] Da das impulsförmige Erwärmen des Substrats bei einer hinreichend hohen Strömungsgeschwindigkeit in kurzen zeitlichen Abständen erfolgen kann, ist es möglich, die Strömungsgeschwindigkeit aus einem Datensatz einer ersten Erwärmung zu errechnen und die thermische Transportgröße aus einem zweiten Datensatz, der zu einer impulsförmigen Erwärmung zu einem anderen Zeitpunkt gehört. Besonders günstig ist es jedoch, wenn die Strömungsgeschwindigkeit und die thermische Transportgröße aus einem Datensatz berechnet werden, die zu ein und derselben impulsförmigen Erwärmung des Substrats gehört.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird die Strömungsgeschwindigkeit anhand der Formel

$$\Delta t_{\max} = \frac{\sqrt{9a^2 - v^2 x_2^2}}{v^2} - \frac{\sqrt{9a^2 - v^2 x_1^2}}{v^2} \quad \text{Formel 1}$$

berechnet. In dieser Formel ist a die Temperaturleitfähigkeit, v die Strömungsgeschwindigkeit, x_1 der erste Abstand, x_2 der zweite Abstand und Δt_{\max} die Differenz zwischen erstem Maximaltemperatur-Zeitpunkt $t_{\max(1)}$ und zweitem Maximaltemperatur-Zeitpunkt $t_{\max(2)}$.

[0024] Beispielsweise wird die Strömungsgeschwindigkeit iterativ bestimmt. In der numerischen Mathematik ist eine Vielzahl an Verfahren bekannt, wie eine Größe, im vorliegenden Fall die Strömungsgeschwindigkeit v , anhand einer Gleichung berechnet werden kann, in der sie lediglich implizit vorhanden ist, so dass sie nicht explizit darstellbar ist. Stets zum Ziel führt eine Intervallschachtelung.

[0025] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Verfahren bei einer Strömungsgeschwindigkeit des Mediums betrieben, so dass gilt, dass ein Produkt aus einer Abstandsdifferenz zwischen dem ersten Abstand und dem zweiten Abstand und der Strömungsgeschwindigkeit zumindest das Fünffache der Temperaturleitfähigkeit des Mediums beträgt.

[0026] In diesem Fall gilt in guter Näherung

$$v \approx \frac{1}{\Delta t_{\max}} \frac{1}{v} (x_2 - x_1). \quad \text{Formel 2}$$

[0027] Besonders günstig ist es, wenn die Temperaturleitfähigkeit anhand der folgenden Formel berechnet wird:

$$a = \frac{t_{\max(1)} t_{\max(2)}}{6(t_{\max(1)} - t_{\max(2)})} \left[\left(\frac{x_2}{t_{\max(2)}} \right)^2 - \left(\frac{x_1}{t_{\max(1)}} \right)^2 \right]. \quad \text{Formel 3}$$

[0028] Dafür ist es besonders günstig, wenn die Wärmequelle so klein ist, dass eine Näherung der Wärmequelle als punktförmig bei der Verwendung der gegebenen Formel zu einem Fehler von weniger als 10% führt. Insbesondere ist ein Hüllkugeldurchmesser der Wärmequelle kleiner als 4,5 mm, insbesondere kleiner als 1 mm. Der Hüllkugeldurchmesser ist der Durchmesser einer gedachten Kugel minimalen Durchmessers, die die Wärmequelle vollständig umgibt.

[0029] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst eine erfindungsgemäße Transportgrößen-Messanordnung einen Kanal, in dem die Wärmequelle und die Temperaturmessvorrichtung angeordnet sind und der so ausgebildet ist, dass er vom Medium laminar durchströmbar ist. Vorzugsweise sind die Wärmequelle und die Temperaturmessvorrichtungen in eine Oberfläche eines Substrats, beispielsweise einer Platine oder einer Folie, eingelassen und schließen mit dieser bündig ab. Dadurch werden Erhöhungen vermieden, an denen sich Luftwirbel ausbilden können. Als Substrat ist eine Kunststoffolie besonders gut geeignet.

[0030] Besonders günstig ist, wenn die Wärmequelle und die Temperaturmessvorrichtungen Teil eines Dünnschichtsensor oder eines Foliensensors sind. Insbesondere sind die Wärmequelle und die Temperaturmessvorrichtungen durch Metallisierungen auf einem nicht leitenden Substrat gebildet. Auf diese Weise werden Turbulenzen im zu vermessenden Medium vermieden.

[0031] Im Folgenden wird eine Herleitung für die oben angegebenen Formeln gegeben.

Herleitung

[0032] Die Wärmequelle ist eine joulesche Wärmequelle, die Idealerweise punkt- oder linienförmig ist, und mindestens zwei Temperaturmessvorrichtungen für die Temperaturen T_1 und T_2 , die stromabwärts in den Abständen x_1 und $x_2 > x_1$ zur Wärmequelle die ortsabhängige Fluidtemperatur bestimmen.

[0033] Zur Messung gibt die Wärmequelle instantan, idealerweise in Form einer Dirac-Anregung, ihre Enthalpie $H = U/t$ an das mit der Geschwindigkeit v überströmende Fluid ab. Das Fluid erreicht nacheinander die beiden Thermometer, welche zu den Zeiten $t_{\max(1)}$ bzw. $t_{\max(2)}$ den jeweiligen Maximalwert der Temperatur erfassen. Bei bekannten Abständen x_1 und x_2 (Sensorkonstanten) ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit aus den beiden Laufzeiten des Maximums gemäß Formel 13 oder, mit gewissen Einschränkungen, nach Formel 16.

[0034] Das Temperaturfeld um eine instantan angeregte punktförmige bzw. linienförmige Wärmequelle innerhalb eines Fluids der Wärmeleitfähigkeit λ , der Temperaturleitfähigkeit a und der volumetrischen spezifischen Wärmekapazität ρc_p lautet:

$$\Delta T \approx \frac{H}{(4\pi at)^{3/2} \rho c_p} \exp\left(\frac{-r^2}{4at}\right) \quad \text{Formel 4}$$

im Fall einer Punktquelle und

$$\Delta T = \frac{H}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-r^2}{4at}\right) \quad \text{Formel 5}$$

im Fall einer Linienquelle. Dabei ist H/L , die längenspezifische Enthalpie.

[0035] Die Wärmequelle wird mit konstanter Geschwindigkeit v von einem Fluid in Richtung der x-Achse ideal überströmt, so dass mit

$$r^2 = (x - vt)^2 + y^2 + z^2 \quad \text{Formel 6}$$

für das jeweilige Temperaturfeld gilt:

$$\Delta T = \frac{H}{(4\pi at)^{3/2} \rho c_p} \exp\left(\frac{-(x - vt)^2 + y^2 + z^2}{4at}\right) \quad \text{Formel 7}$$

im Fall einer Punktquelle und

$$\Delta T = \frac{H}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-(x - vt)^2 + y^2 + z^2}{4at}\right) \quad \text{Formel 8}$$

im Fall einer Linienquelle.

[0036] Das Maximum der Temperatur, ΔT_{\max} , erscheint stromabwärts weiterhin in x-Richtung am Ort $r = (x, 0, 0)$ zur Zeit

$$t_{\max} = \frac{1}{v^2} \left(-3a + \sqrt{9a^2 + v^2 x^2} \right)$$

Formel 9

im Fall einer Punktquelle und

$$t_{\max} = \frac{1}{v^2} \left(-2a + \sqrt{4a^2 + v^2 x^2} \right)$$

Formel 10

im Fall einer Linienquelle.

Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit

[0037] Aufgelöst nach der Strömungsgeschwindigkeit folgt:

$$v = \frac{1}{t_{\max}} \sqrt{x^2 - 6at_{\max}}$$

Formel 11

im Fall einer Punktquelle und

$$v = \frac{1}{t_{\max}} \sqrt{x^2 - 4at_{\max}}$$

Formel 12

im Fall einer Linienquelle.

[0038] Dieses Ergebnis ist noch insbesondere von der Temperaturleitfähigkeit a des Fluids abhängig. Die Kompensation dieses Transportparameters gelingt, wenn zur Auswertung mindestens zwei Maxima, $T_{\max(1)}(x_1, t_{\max(1)})$ und $T_{\max(2)}(x_2, t_{\max(2)})$, verwendet werden. Man erhält dann einheitlich für beide Quellentypen:

$$v = \sqrt{\frac{1}{t_{\max(2)} - t_{\max(1)}} \left(\frac{x_2^2}{t_{\max(2)}} - \frac{x_1^2}{t_{\max(1)}} \right)}$$

Formel 13

[0039] In der Praxis sind hierbei indes noch systematische Messabweichungen zu berücksichtigen. Sie entstehen aus den jeweiligen zeitlichen Verzögerungen bei der Freisetzung der Enthalpie durch die Wärmequelle und in den Temperaturmessungen wegen der nichtverschwindenden eigenen Wärmekapazitäten von Wärmequelle und Thermometern. Um auch diese Einschränkungen zu beseitigen, bildet man zunächst mit Formel 9 die Differenz der Laufzeiten des Maximums von der Wärmequelle zu den beiden Thermometern.

$$\Delta t_{\max} = t_{\max(2)} - t_{\max(1)} = \frac{1}{v^2} \left(-3a + \sqrt{9a^2 - v^2 x_2^2} \right) - \frac{1}{v^2} \left(-3a + \sqrt{9a^2 - v^2 x_1^2} \right)$$

Formel 14

[0040] Für hinreichend große Strömungsgeschwindigkeiten und/oder Abstände zwischen Quelle und Thermometern bei gegebener Temperaturleitfähigkeit, $a \ll vx$, bleibt lediglich die Differenz

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{v} (x_2 - x_1)$$

Formel 15

übrig. Schließlich erhält man den Ausdruck

$$v = \frac{1}{\Delta t_{\max}} (x_2 - x_1)$$

Formel 16

[0041] Für eine vorgegebene Thermotransportgrößen-Messanordnung mit den festen Abständen x_1 und x_2 folgt die Strömungsgeschwindigkeit v aus der Differenz der individuellen Laufzeiten des Impulses zu den beiden

Thermometern. Der Messwert ist insbesondere unabhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Fluids. Formel 15 und Formel 16 gelten gleichlautend auch für eine lineare Wärmequelle.

Bestimmung der thermischen Transportgröße

[0042] Aus Formel 9 und Formel 10 bleibt durch Auflösen nach der Temperaturleitfähigkeit a :

$$a = \frac{1}{6t_{\max}} (x^2 - v^2 t_{\max}^2) \quad \text{Formel 17}$$

im Fall einer Punktquelle und

$$a = \frac{1}{4t_{\max}} (x^2 - v^2 t_{\max}^2) \quad \text{Formel 18}$$

im Fall einer Linienquelle.

[0043] Durch Einzelmessungen der beiden Maxima $T_{\max(1)}(x_1, t_{\max(1)})$ und $T_{\max(2)}(x_2, t_{\max(2)})$ lässt sich die unbekannte Strömungsgeschwindigkeit kompensieren gemäß:

$$a = \frac{t_{\max(1)} t_{\max(2)}}{6(t_{\max(1)} - t_{\max(2)})} \left[\left(\frac{x_2}{t_{\max(2)}} \right)^2 - \left(\frac{x_1}{t_{\max(1)}} \right)^2 \right] \quad \text{Formel 19}$$

im Fall einer Punktquelle und

$$a = \frac{t_{\max(1)}^{(1)} t_{\max(2)}^{(2)}}{4(t_{\max(1)}^{(1)} - t_{\max(2)}^{(2)})} \left[\left(\frac{x_2}{t_{\max(2)}^{(2)}} \right)^2 - \left(\frac{x_1}{t_{\max(1)}^{(1)}} \right)^2 \right] \quad \text{Formel 20}$$

im Fall einer Linienquelle.

[0044] Für eine Thermotransportgrößen-Messanordnung mit den beiden Konstanten x_1 und x_2 ist der genannte Transportparameter somit im strömenden Fluid aus den beiden Laufzeiten des Maximums zu bestimmen.

[0045] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

[0046] **Fig. 1** eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Temperaturmessanordnung und

[0047] **Fig. 2** eine schematische Schnittansicht bezüglich eines Schnitts senkrecht zur Papierebene von **Fig. 1**.

[0048] **Fig. 1** zeigt eine Transportgrößen-Messanordnung **10**, eine Wärmequelle **12**, eine erste Temperaturmessvorrichtung **14** und eine zweite Temperaturmessvorrichtung **16**. Die Wärmequelle **12** umfasst ein Heizelement **13**, das durch eine Metallisierung gebildet ist, die auf einem Substrat **18** aufgebracht ist. Bei dem Substrat **18** kann es sich beispielsweise um eine Platine oder eine Folie handeln.

[0049] Das Heizelement **13** ist so schlank ausgebildet, dass es in guter Näherung als zweidimensional betrachtet werden kann. Insbesondere ist eine Länge L der Wärmequelle **12** zumindest zehnmal so groß wie eine Breite B . Eine Höhe H , die sich senkrecht zur Papierebene erstreckt, betragt beispielsweise weniger als 200 μm , beispielsweise 7 μm . Die Wärmequelle **12** umfasst zudem Kabel **20.1**, **20.2**, über die das Heizelement **13** mit einer Stromquelle **22**, die ebenfalls Teil der Wärmequelle **12** ist, verbunden ist.

[0050] Die erste Temperaturmessvorrichtung **14** umfasst eine zweite Metallisierung **24**, beispielsweise aus Nickel. Nickel hat einen elektrischen spezifischen Widerstand, der stark von der Temperatur T abhängig ist. Die zweite Metallisierung **24** ist über Kabel **20.3**, **20.4** mit einer Brückenschaltung **26** verbunden, mittels derer der elektrische Widerstand R_{24} der zweiten Metallisierung **24** ermittelbar und daraus eine Temperatur T_1 bestimmbar ist.

[0051] Die zweite Temperaturmessvorrichtung 16 umfasst eine dritte Metallisierung 28, die wie die zweite Metallisierung 24 aufgebaut ist. (aber Kabel 20.5, 20.6 ist die dritte Metallisierung 28 mit einer zweiten Brückenschaltung 30 verbunden, mittels der deren elektrischer Widerstand R_{28} messbar und damit die Temperatur T_2 der dritten Metallisierung 28 bestimmbar ist.

[0052] Die Transportgrößen-Messanordnung 10 umfasst zudem eine elektrische Auswerteeinheit 32, die mit der Stromquelle 22, der ersten Brückenschaltung 26 sowie der zweiten Brückenschaltung 30 verbunden ist. Die Auswerteeinheit 32 umfasst einen digitalen Speicher 34, in dem ein Programm abgelegt ist, so dass die Auswerteeinheit 32 automatisch ein beschriebenes erfindungsgemäßes Verfahren durchführt.

[0053] Auf Basis dieses Programms steuert die Auswerteeinheit 32 zunächst die Stromquelle 32 so an, dass diese die Metallisierung 13 impulsartig bestromt. Beispielsweise dauert die Bestromung weniger als 0,1 sec. Die Auswerteeinheit 32 ist zudem eingerichtet zum kontinuierlichen Messen der Temperatur T_1 an der zweiten Metallisierung 24 und der Temperatur T_2 an der dritten Metallisierung 28. Dadurch werden die Temperaturverläufe $T_1(t)$ und $T_2(t)$ erhalten.

[0054] Der Temperaturmessvorrichtung 14 kann ein erster Abstand x_1 von der Wärmequelle 12 zugeordnet werden, nämlich der Abstand zwischen der zweiten Metallisierung 24 und der ersten Metallisierung 13. Der zweiten Temperaturmessvorrichtung 16 kann der Abstand x_2 zugeordnet werden, nämlich der Abstand zwischen der ersten Metallisierung 13 und der dritten Metallisierung 28.

[0055] Die Auswerteeinheit 32 ist eingerichtet zum automatischen Bestimmen eines Ersttemperatur-Maximalwerts $T_{\max}(t)$ aus dem ersten Temperaturverlauf $T_1(t)$, beispielsweise durch Anpassen mit einer geeigneten Anpassungsfunktion, beispielsweise einer Gauß-Funktion. Aus dem Stand der Technik sind eine Vielzahl an Verfahren bekannt, mittels derer numerisch ein Maximum berechnet werden kann, beispielsweise durch ein Interpolieren mit Tschebyscheff-Polynomen, weshalb hier nicht weiter auf die numerischen Möglichkeiten eingegangen wird.

[0056] Die Auswerteeinheit 32 ist ausgebildet zum numerischen Interpolieren von Formel 1, so dass aus der Differenz der Zeitpunkte $t_{\max(1)}$, zu dem die erste Temperatur T_1 den Ersttemperatur-Maximalwert $T_{\max(1)}$ durchläuft, und einem zweiten Maximaltemperatur-Zeitpunkt $t_{\max(2)}$, zu dem die Zweittemperatur T_2 den Zweittemperatur-Maximalwert $T_{\max(2)}$ durchläuft, eine Strömungsgeschwindigkeit v berechnet wird. Diese Strömungsgeschwindigkeit v gehört zu einem Medium 36, das die Wärmequelle 12 sowie die Temperaturmessvorrichtungen 14, 16 in einer Strömungsrichtung x laminar überströmt. Die Thermotransportgrößen-Messanordnung 10 umfasst eine Leitvorrichtung 38, die einen Kanal 40 bildet, in dem das Medium 36 strömt. Beispielsweise ist die Leitvorrichtung 38 durch ein Rohr gebildet.

[0057] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung liegen die erste Temperaturmessvorrichtung 14 und die zweite Temperaturmessvorrichtung 16 auf einer Linie 42, die die Metallisierung 13 der Wärmequelle 12 zentrisch schneidet und die in unmittelbarer Nähe einer Längsachse 44 der Leitvorrichtung 38 angeordnet ist. Besonders günstig ist es, wenn die Linie 42 auf der Längsachse 44 liegt. Besonders günstig ist es, wenn ein Durchmesser Q des Kanals 40, der durch die erste Metallisierung 13 verläuft, zumindest doppelt so groß ist wie die Länge L der ersten Metallisierung 13.

[0058] Fig. 2 zeigt einen Querschnitt durch die Thermotransportgrößen-Messanordnung 10, der senkrecht zu dem Schnitt gemäß Fig. 1 verläuft. Es ist zu erkennen, dass das Substrat 18 mittig im Kanal 40 angeordnet ist, so dass das Medium 36 das Substrat 18 allseitig umströmen kann.

Bezugszeichenliste

10	Thermotransportgrößen-Messanordnung
12	Wärmequelle
13	Heizelement
14	erste Temperaturmessvorrichtung
16	zweite Temperaturmessvorrichtung
18	Substrat
20	Kabel
22	Stromquelle
24	zweite Metallisierung
26	Brückenschaltung

28	dritte Metallisierung
30	Brückenschaltung
32	Auswerteeinheit
34	digitaler Speicher
36	Medium
38	Leitvorrichtung
40	Kanal
42	Linie
44	Längsachse
T	Temperatur
v	Strömungsgeschwindigkeit
x	Strömungsrichtung
Q	Durchmesser

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln einer thermischen Transportgröße (a) und einer Strömungsgeschwindigkeit (v) in einem strömenden Medium (36), mit den Schritten:

- (i) impulsförmiges Erwärmen des zu vermessenden Mediums (36) mittels einer Wärmequelle (12),
- (ii) Messen einer ersten Temperatur (T₁), die einem ersten Abstand (x₁) von der Wärmequelle (12) zuordenbar ist, in Abhängigkeit von der Zeit (t),
- (iii) Messen zumindest einer zweiten Temperatur (T₂) in einem zweiten Abstand (x₂) von der Wärmequelle in Abhängigkeit von der Zeit (t),
- (iv) Ermitteln der thermischen Transportgröße aus
 - einem Ersttemperatur-Maximalwert (T_{max(1)}), der die maximal erreichte erste Temperatur kodiert, und
 - einem Zweittemperatur-Maximalwert (T_{max(2)}), der die maximal erreichte zweite Temperatur kodiert, und
- (v) Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit (v) anhand
 - eines ersten Maximaltemperatur-Zeitpunkts (t_{max(1)}), zu dem die erste Temperatur (T₁) den Ersttemperatur-Maximalwert (T_{max(1)}) durchläuft, und
 - eines zweiten Maximaltemperatur-Zeitpunkts (t_{max(2)}), zu dem die zweite Temperatur (T₂) den Zweittemperatur-Maximalwert (T_{max(2)}) durchläuft.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Strömungsgeschwindigkeit (v) anhand der Formel

$$\Delta t_{\max} = \frac{\sqrt{9a^2 - v^2 x_2^2}}{v^2} - \frac{\sqrt{9a^2 - v^2 x_1^2}}{v^2}$$

berechnet wird, wobei a die Temperaturleitfähigkeit, v die Strömungsgeschwindigkeit, x₁ den ersten Abstand, x₂ den zweiten Abstand und Δt_{max} die Differenz zwischen erstem Maximaltemperatur-Zeitpunkt (t_{max(1)}) und zweitem Maximaltemperatur-Zeitpunkt (t_{max(2)}) bezeichnet.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Produkt aus

- einer Abstandsdifferenz (Δx) zwischen dem ersten Abstand (x₁) und dem zweiten Abstand (x₂) und
- der Strömungsgeschwindigkeit (v)

 zumindest das Fünffache einer Temperaturleitfähigkeit (a) des Mediums beträgt.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

- die Wärmequelle (12) so klein ist, dass eine Näherung als punktförmig zu einem Fehler von weniger als 10% führt und/oder
- die Temperaturleitfähigkeit (a) anhand der folgenden Formel berechnet wird:

$$a = \frac{t_{\max(1)} t_{\max(2)}}{6(t_{\max(1)} - t_{\max(2)})} \left[\left(\frac{x_2}{t_{\max(2)}} \right)^2 - \left(\frac{x_1}{t_{\max(1)}} \right)^2 \right]$$

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

- die Wärmequelle (12) so schmal ist, dass eine Näherung als linienförmig zu einem Fehler von weniger als 10% führt und/oder
- die Temperaturleitfähigkeit (a) anhand der folgenden Formel berechnet wird:

$$a = \frac{t_{\max(1)} t_{\max(2)}}{4(t_{\max(1)} - t_{\max(2)})} \left[\left(\frac{x_2}{t_{\max(2)}} \right)^2 - \left(\frac{x_1}{t_{\max(1)}} \right)^2 \right]$$

6. Thermotransportgrößen-Messanordnung zum Ermitteln einer thermischen Transportgröße (a) und einer Strömungsgeschwindigkeit (v) in einem strömenden Medium (36), mit

(i) einer Wärmequelle (12), die eingerichtet ist zum Abgeben eines impulsförmigen Wärmestroms in ein strömendes Medium (36),

(ii) einer ersten Temperaturmessvorrichtung (14), die angeordnet ist zum

- laminaren Überströmtwerden mit dem Medium (36) und zum

- Messen einer ersten Temperatur (T₁), die einem ersten Abstand (x₁) von der Wärmequelle (12) zuordenbar ist, in Abhängigkeit von der Zeit (t),

(iii) zumindest einer zweiten Temperaturmessvorrichtung (16), die angeordnet ist zum

- laminaren Überströmtwerden mit dem Medium (36) und zum

- Messen zumindest einer zweiten Temperatur (T₂) in einem zweiten Abstand (x₂) von der Wärmequelle (36) in Abhängigkeit von der Zeit (t), und

(iv) einer elektrischen Auswerteeinheit (32), die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche.

7. Thermotransportgrößen-Messanordnung nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch einen Kanal (40), in dem die Wärmequelle (12) und die Temperaturmessvorrichtungen (14, 16) angeordnet sind und der so ausgebildet ist, dass er von dem Medium (36) laminar durchströmbar ist.

8. Thermotransportgrößen-Messanordnung nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch ein Medium (36), das durch den Kanal (40) strömt.

9. Thermotransportgrößen-Messanordnung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmequelle (12) und die Temperaturmessvorrichtungen (14, 16) Teil eines Dünnschichtensors oder Foliensensors sind.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

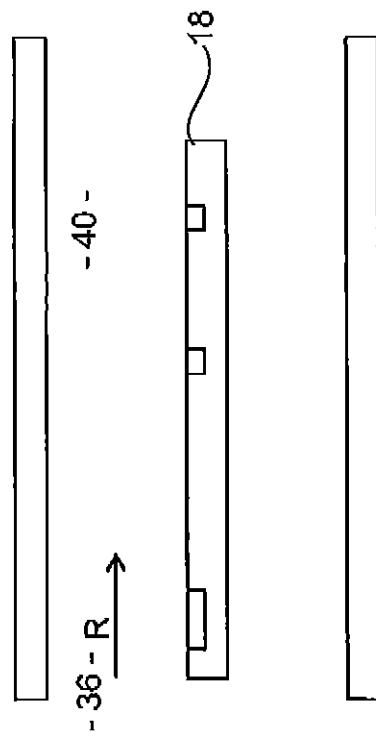


Fig. 2