



(10) **DE 10 2016 118 129 B4** 2019.03.21

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 118 129.3**
(22) Anmeldetag: **26.09.2016**
(43) Offenlegungstag: **29.03.2018**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **21.03.2019**

(51) Int Cl.: **G01N 25/18 (2006.01)**
G01N 25/20 (2006.01)
G01F 1/688 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(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:

DE	102 06 275	B4
DE	10 2012 019 657	B3
DE	10 2012 020 147	B3
DE	10 2014 010 939	B3
WO	2011/ 134 559	A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters und/oder einer thermischen Transportgröße eines durch eine Durchleitung strömenden Fluids**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) und/oder einer thermischen Transportgröße (a , λ) eines durch eine Durchleitung (12) strömenden Fluids (14), mit den Schritten:

(a) Leiten des Fluids (14) durch die Durchleitung (12),
(b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (14) mittels eines länglichen Heizelements (24),

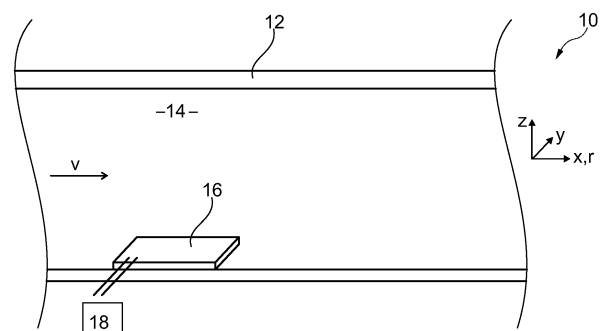
(c) Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$) mittels eines ersten Thermometers (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement (24) angeordnet ist,

(d) Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) mittels eines zweiten Thermometers (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und

(e) Messen einer dritten zeitabhängigen Temperatur ($T_3(t)$) mittels eines dritten Thermometers (30), das in einem dritten Thermometerabstand (r_3) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und

(f) Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a , λ) aus der ersten Temperatur ($T_1(t)$), der zweiten Temperatur ($T_2(t)$) und der dritten Temperatur ($T_3(t)$), dadurch gekennzeichnet, dass

(g) der Durchflussparameter in Form einer Strömungsgeschwindigkeit (v) berechnet ...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters und/oder einer thermischen Transportgröße eines durch eine Durchleitung strömenden Fluids. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung eine Messvorrichtung zum Bestimmen eines Durchflussparameters und/oder einer thermischen Transportgröße eines Fluids.

[0002] Die Bestimmung des Durchflusses und/oder einer thermischen Transportgröße spielt eine große Rolle beispielsweise bei der Ermittlung, welchen Energieinhalt eine gelieferte Erdgasmenge hat. Die Messung der genannten Größen sollte dabei möglichst einfach und dennoch genau erfolgen.

[0003] Es ist bekannt, dass ein kurzer Heizimpuls in das Fluid abgegeben werden kann und dass aus der Erwärmung von benachbart zum entsprechenden Heizelement angeordneten Thermometern auf die Durchflussgeschwindigkeit geschlossen werden kann.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messung der Durchflussgeschwindigkeit und/oder der thermischen Transportgröße zu verbessern.

[0005] Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 oder 2. Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch eine Messvorrichtung mit den Merkmalen von Anspruch 4 oder 5.

[0006] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass aus den Gleichungen, die die Wärmeausbreitung in einem bewegten Fluid beschreiben, die thermischen Transportgrößen und die Durchflussgeschwindigkeit zeitunabhängig direkt berechnet werden können. Wie im Folgenden gezeigt wird, lassen sich auch bei strömendem Fluid Formeln für die Temperaturleitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit angeben, die zeitlich veränderliche Größen enthalten und dennoch ein zeitlich konstantes Ergebnis liefern.

[0007] Es ist dann gemäß einer bevorzugten Ausführungsform möglich, kontinuierlich Messwerte aufzunehmen und aus der Vielzahl der Messwerte, beispielsweise durch Mittelwertbildung, den Wert für die entsprechende Größe zu berechnen. Aufgrund der Vielzahl der einzelnen Messwerte und des Mittels wird die Messunsicherheit durch statistische Fehler so sehr klein.

[0008] Da bekannt ist, dass die jeweilig berechneten Werte zeitlich konstant sein müssen, kann, wie ebenfalls gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, so lange gewartet werden, bis zu erkennen ist, dass keine systematische Messabweichung

vorliegt. Auf diese Weise können auch systematische Messunsicherheiten klein gehalten werden.

[0009] Im Allgemeinen löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters und/oder einer thermischen Transportgröße eines durch eine Durchleitung strömenden Fluids, mit den Schritten (a) Leiten des Fluids durch die Durchleitung, (b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids mittels eines länglichen Heizelements, (c) Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur mittels eines ersten Thermometers, das in einem ersten Thermometerabstand vom Heizelement angeordnet ist, (d) Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur mittels eines zweiten Thermometers, das in einem zweiten Thermometerabstand vom Heizelement angeordnet ist, und optional (e) Messen einer dritten zeitabhängigen Temperatur mittels eines dritten Thermometers, das in einem dritten Thermometerabstand vom Heizelement angeordnet ist, und (f) Berechnen des Durchflussparameters und/oder der thermischen Transportgröße aus der ersten Temperatur, der zweiten Temperatur und gegebenenfalls der dritten Temperatur, wobei (g) der Durchflussparameter von null verschieden ist und der Durchflussparameter und/oder die thermische Transportgröße direkt aus den Temperaturen und den Abständen bestimmt werden.

[0010] Im Rahmen des Verfahrens gemäß Anspruch 2 ist es selbstverständlich möglich, dass eine erste zweite Temperatur und eine weitere zweite (nämlich dritte) Temperatur gemessen wird, wobei die Temperaturleitfähigkeit anhand einer der beiden Temperaturen ermittelt wird und der Durchfluss anhand der jeweils anderen Temperatur. Es ist zudem möglich, dass aus der ersten der beiden zweiten Temperaturen jeweils die Temperaturleitfähigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit berechnet und dann der Mittelwert bestimmt wird.

[0011] Die Thermometer sind vorzugsweise in stromabwärtiger Richtung hinter dem Heizelement angeordnet.

[0012] Unter dem Merkmal, dass die zu bestimmende(n) Größe(n) direkt aus den Temperaturen und den Abständen einer Formel bestimmt werden, wird insbesondere verstanden, dass keine Formel verwendet wird, in der die genannten Größen nach einer anderen Größe abgeleitet sind.

Herleitung der Formeln

[0013] Es werde mittels einer quasi-linienförmigen Jouleschen Wärmequelle der Länge L am Ort $r = 0$ ein elektrischer Impuls abgegeben und mit zwei Thermometern die zeitabhängige Temperatur gemessen. Die Thermometer befinden sich r_1 , beispielsweise $r_1 = 100 \mu\text{m}$, und r_2 stromabwärts von der Wärmequelle,

beispielsweise $r_2 = 150 \mu\text{m}$. Der Wärmeimpuls hat eine sehr geringe Dauer (z. B. $\tau = 100 \mu\text{s}$) und die Wärmequelle gibt die Enthalpie $H_0 = U \text{ l}$ an das strömende Fluid ab. Das resultierende orts- und zeitabhängige Temperaturfeld $\Delta T(r,t)$ breitet sich im Fluid gleichmäßig und mit der Strömungsgeschwindigkeit v aus und erreicht nacheinander die zwei Thermometer in den Formen:

$$T1: \Delta T_1(r_1,t) = \frac{H_0}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-(r_1 - vt)^2}{4at}\right) \quad (1)$$

und

$$T2: \Delta T_2(r_2,t) = \frac{H_0}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-(r_2 - vt)^2}{4at}\right) \quad (2)$$

[0014] Ein drittes Thermometer erfährt die zeitabhängige Temperatur

$$T3: \Delta T_3(r_3,t) = \frac{H_0}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-(r_3 - vt)^2}{4at}\right) \quad (3)$$

[0015] Aus diesen zeitlichen Temperaturanstiegen lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit als jeweils scheinbar zeitabhängige Funktion berechnen:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_1(r_1,t)}{\Delta T_2(r_2,t)} &= \frac{\frac{H_0}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-(r_1 - vt)^2}{4at}\right)}{\frac{H_0}{4\pi L \lambda t} \exp\left(\frac{-(r_2 - vt)^2}{4at}\right)} \exp\left\{\frac{1}{4at}[(r_2 - vt)^2 - (r_1 - vt)^2]\right\} = \\ &= \exp\left\{\frac{1}{4at}[r_2^2 - r_1^2 + 2vt(r_1 - r_2)]\right\} \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{\Delta T_1(r_1,t)}{\Delta T_2(r_2,t)}\right) &= \frac{1}{4at}[r_2^2 - r_1^2 + 2vt(r_1 - r_2)] \\ \Leftrightarrow v &= \frac{4at \ln\left(\frac{\Delta T_1(r_1,t)}{\Delta T_2(r_2,t)}\right) + r_1^2 - r_2^2}{2t(r_1 - r_2)} \\ \Leftrightarrow v &= \frac{1}{2t} \frac{r_2^2 - r_1^2 + 4at \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}{r_2 - r_1} \end{aligned} \quad (4)$$

[0016] Umgeformt ergibt sich aus den Temperaturen T1 und T2:

$$v = \frac{4at \ln\left(\frac{\Delta T_1(r_1,t)}{\Delta T_2(r_2,t)}\right) + r_1^2 - r_2^2}{2t(r_1 - r_2)} \Rightarrow a = \frac{r_2^2 - r_1^2 + 2vt(r_1 - r_2)}{4t \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (5)$$

[0017] Existiert ein drittes Thermometer, ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit zudem zu

$$v = \frac{4at \ln\left(\frac{\Delta T_1(r_1,t)}{\Delta T_3(r_3,t)}\right) + r_1^2 - r_3^2}{2t(r_1 - r_3)} \Rightarrow a = \frac{r_3^2 - r_1^2 + 2vt(r_1 - r_3)}{4t \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_3}\right)} \quad (6)$$

[0018] Es folgt aus den Gleichungen (5) und (6)

$$\frac{r_3^2 - r_1^2 + 2vt(r_1 - r_3)}{4t \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_3}\right)} = \frac{r_2^2 - r_1^2 + 2vt(r_1 - r_2)}{4t \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (7)$$

[0019] Auflösen von Gleichung (7) nach der Strömungsgeschwindigkeit v liefert:

$$v = \frac{1}{2t} \frac{r_1^2 \left(\ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1}\right) - \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) \right) - r_2^2 \ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1}\right) + r_3^2 \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}{r_1 \left(\ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1}\right) - \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) \right) - r_2 \ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1}\right) + r_3 \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (8)$$

[0020] Auf dieselbe Weise lässt sich die Messgröße „Temperaturleitfähigkeit a “ als wiederum scheinbar zeitabhängige Funktion darstellen, und zwar sowohl für eine bekannte Strömungsgeschwindigkeit v als

$$a = \frac{1}{4t} \frac{r_2^2 - r_1^2 - 2vt(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (9)$$

als auch für verschwindende Strömung:

$$a(v=0) = \frac{1}{4t} \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (10)$$

[0021] Für das etwaig vorhandene dritte Thermometer ergibt sich eine entsprechende Formel mit dem Abstand r_3 und der Temperatur T_3 . Durch Gleichsetzen analog zur Herleitung von Gleichung (7) erhält man

$$a = \frac{1}{4t} \frac{r_1(r_3^2 - r_2^2) + r_2(r_1^2 - r_3^2) + r_3(r_2^2 - r_1^2)}{(r_2 - r_1) \ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1}\right) + (r_1 - r_3) \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (11)$$

[0022] Schließlich ist bei bekannter Temperaturleitfähigkeit a und Strömungsgeschwindigkeit v auch die Wärmeleitfähigkeit λ des Fluids ermittelbar gemäß:

$$\lambda = \frac{H_0}{4\pi Lt(T_1 - T_2)} \left[\exp\left(\frac{-(r_1 - vt)^2}{4at}\right) - \exp\left(\frac{-(r_2 - vt)^2}{4at}\right) \right]. \quad (12)$$

[0023] Für $v = 0$ findet man:

$$\lambda(v = 0) = \frac{H_0}{4\pi Lt(T_1 - T_2)} \left[\exp\left(\frac{-r_1^2}{4at}\right) - \exp\left(\frac{-r_2^2}{4at}\right) \right]. \quad (13)$$

[0024] Erfindungsgemäß umfasst das Berechnen des Durchflussparameters und/oder der thermischen Transportgröße ein mehrfaches, insbesondere beständig wiederholtes Messen der Temperaturen zu einer Vielzahl an Zeitpunkten t_i und ein Mitteln der jeweiligen Ergebnisse. Beispielsweise umfasst das Mitteln ein Berechnen einer Ausgleichsgeraden über eine Messdaten-Menge M an Messdaten. Die Messdaten-Menge M wird so gewählt, dass eine Steigung S der Ausgleichsgeraden bezüglich der Zeit t betragsmäßig eine vorgegebene Maximal-Steigung S_{\max} nicht überschreitet.

[0025] In anderen Worten werden für die Berechnung einer Messgröße, beispielsweise der Temperaturleitfähigkeit a , nur solche Messwerte betrachtet, die in einem zeitlichen Intervall zwischen zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 liegen. So gilt

$M = \{a(t_i) \mid \#_1 < t < t_2\}$. Ist die Steigung S der Ausgleichsgeraden durch die Punkte von M betragsmäßig zu groß, wird t_1 vergrößert und/oder t_2 verkleinert oder vergrößert, bis die Steigung S kleiner ist als die vorgegebene Maximal-Steigung S_{\max} . t_2 ist kleiner als der zeitliche Abstand zwischen zwei Messungen.

[0026] Dabei werden die Zeitpunkte t_1 und t_2 vorzugsweise so gewählt, dass die Messdaten-Menge zumindest eine vorgegebene Mindest-Mächtigkeit M_{\min} hat. So wird erreicht, dass systematische Messfehler vermieden werden. Der Beginn des Bestromens des Heizelements sei $t = 0$. In der Regel sind systematische Messabweichungen auf den Beginn und das Ende der Messung beschränkt, also auf die Zeit unmittelbar nach Abgeben des Wärmeimpulses und die Zeit in großem Abstand dazu. Durch das Auswählen von Messdaten im zeitlichen Mittelbereich einer Messung werden systematische Fehler vermieden.

[0027] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung,

Fig. 2 eine Detailansicht eines Detektorelements der Messvorrichtung gemäß **Fig. 1**.

[0028] **Fig. 1** zeigt eine erfindungsgemäße Messvorrichtung **10**, die eine Durchleitung **12** zum Durchleiten eines Fluids **14** aufweist. Bei dem Fluid **14** handelt es sich beispielsweise um ein Gas, um ein Gasgemisch, ein Aerosol, einen Nebel oder eine Flüssigkeit.

[0029] In der Durchleitung **12** ist ein Detektorelement **16** angeordnet. Das Detektorelement **16** ist mit einer Auswerteeinheit **18** verbunden, die gleichzeitig als Ansteuereinheit dient.

[0030] **Fig. 2** zeigt das Detektorelement **16** im Detail. Es ist zu erkennen, dass es einen Grundkörper **20** aufweist, der beispielsweise aus Silizium besteht. In den Grundkörper **20** ist ein Kanal **22** eingätzt, der von einem Heizelement **24** überspannt wird. Das Heizelement **24** umfasst neben einer brückenartigen Struktur in Form eines Stegs, die ebenfalls aus Silizium besteht und einstückig mit dem Grundkörper **20** verbunden ist, eine in **Fig. 2** nicht sichtbare Metallisierung, die als Widerstandsheizelement dient und mittels elektrischer Leiter mit der Auswerteeinheit **18** kontaktiert ist.

[0031] In einem ersten Thermometerabstand t_1 ist ein erstes Thermometer **26** angeordnet, das ebenfalls eine Metallisierung aufweist, die auf einem Steg über den Kanal **22** aufgebracht ist. Auch diese Metallisierung ist über nicht eingezeichnete Leitungen mit der Auswerteeinheit **18** verbunden.

[0032] In einem zweiten Thermometerabstand t_2 ist ein zweites Thermometer **28** angeordnet und in einem dritten Thermometerabstand t_3 ist ein drittes Thermometer **30** angeordnet, das wie das erste Thermometer **26** aufgebaut ist. Alle Thermometer **26**, **28**, **30** sind so mit der Auswerteeinheit **18** verbunden, dass ihr jeweiliger elektrischer Widerstand W_1 , W_2 , W_3 stromfrei messbar ist. Aus den jeweiligen elektrischen Widerstand kann auf eindeutige Weise auf die entsprechende Temperatur T_1 , T_2 , T_3 des jeweiligen Thermometers geschlossen werden.

[0033] Eine Breite B_{22} des Kanals **22** beträgt beispielsweise $2000 \mu\text{m}$. Eine Länge L der Wärmequelle **24** ist hier gleich der Breite B_{22} .

[0034] Eine Breite B_{24} des Heizelements **24** sowie entsprechende Breiten B_{26} , B_{28} , B_{30} der Thermometer **26**, **28**, **30** liegt jeweils vorzugsweise unterhalb von $50 \mu\text{m}$, insbesondere unterhalb von $10 \mu\text{m}$ und beträgt im vorliegenden Fall $B_{24} = B_{26} = B_{28} = B_{30} = 8 \mu\text{m}$.

[0035] Die Auswerteeinheit **18** ist ausgebildet zum Abgeben eines Spannungsimpulses mit einer Impulslänge von beispielsweise $\tau = 100$ Mikrosekunden an das Heizelement **24**. Dieses erwärmt sich daraufhin und es entsteht eine Wärmeverteilung, deren Maximum mit einer Strömungsgeschwindigkeit v in eine stromabwärtige Richtung, im vorliegenden Fall in x- bzw. r-Richtung, fortschreitet. Die Auswerteeinheit **18** ist zudem ausgebildet zum Aufnehmen von Widerstands-Messwerten, aus denen die jeweiligen Temperaturen T_1, T_2, T_3 berechnet werden. Beispielsweise beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei solcher Messungen höchstens 10 ms.

[0036] Aus den so erhaltenen Messwerten wird anhand der Formel (8) für jeden Zeitpunkt t_i ein Messwert $v_i=v(t_i)$ berechnet. Für alle Messdaten für die Durchschnittsgeschwindigkeit v_i für die gilt, dass $t_1 < t_1 < t_2$, für beispielsweise $t_1=3$ ms und $t_2=10$ ms beträgt, wird eine Ausgleichsgerade berechnet. Beträgt deren Steigung S betragsmäßig weniger als eine Maximalsteigung S_{max} , so wird der Mittelwert der vor ihm der so definierten Messwert-Menge M als Messergebnis für die Strömungsgeschwindigkeit v ausgegeben oder gespeichert. Auf die gleiche Weise wird die Temperaturleitfähigkeit a oder die Wärmeleitfähigkeit λ bestimmt.

[0037] Günstig ist es, wenn aus der Temperaturleitfähigkeit und/oder der Wärmeleitfähigkeit λ auf die Gaszusammensetzung des Fluids **14** oder alternativ auf dessen Brennwert oder Heizwert geschlossen wird. Aus der Durchflussgeschwindigkeit v und der bekannt Querschnittsfläche der Durchleitung **14** im Bereich des Detektorelements **16** kann auf den Durchfluss durch die Durchleitung **12** geschlossen werden. Aus diesem Durchfluss und dem Brennwert und unter dem Heizwert kann dann auf den Energieinhalt des Gases geschlossen werden, den in einem vorgegebenen Zeitintervall durch die Durchleitung **12** geflossen ist. Das ist sehr vorteilhaft, wenn es sich bei der Messvorrichtung **10** um einen Gas-Durchflussmesser für Erdgas handelt.

[0038] Vorzugsweise unterscheiden sich die Abstände r_1, r_2 und gegebenenfalls r_3 nur so wenig, dass dann, wenn am zweiten bzw. dritten Thermometer das Temperaturmaximum anliegt, die Temperatur am ersten Thermometer auf höchstens ein Zehntel der Maximaltemperatur abgefallen ist.

Bezugszeichenliste

10	Messvorrichtung
12	Durchleitung
14	Fluid
16	Detektorelement
18	Auswerteeinheit

20	Grundkörper
22	Kanal
24	Heizelement
26	erstes Thermometer
28	zweites Thermometer
30	drittes Thermometer
x_{Th1}	erster Thermometerabstand
x_{Th2}	zweiter Thermometerabstand
x_{Th3}	dritter Thermometerabstand
B₂₂	Breite des Kanals
v	Strömungsgeschwindigkeit
W	Widerstand
L	Länge der Wärmequelle
T	Dauer des Wärmeimpulses

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) und/oder einer thermischen Transportgröße (a, λ) eines durch eine Durchleitung (12) strömenden Fluids (14), mit den Schritten:
 - (a) Leiten des Fluids (14) durch die Durchleitung (12),
 - (b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (14) mittels eines länglichen Heizelements (24),
 - (c) Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$) mittels eines ersten Thermometers (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement (24) angeordnet ist,
 - (d) Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) mittels eines zweiten Thermometers (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und
 - (e) Messen einer dritten zeitabhängigen Temperatur ($T_3(t)$) mittels eines dritten Thermometers (30), das in einem dritten Thermometerabstand (r_3) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und
 - (f) Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a, λ) aus der ersten Temperatur ($T_1(t)$), der zweiten Temperatur ($T_2(t)$) und der dritten Temperatur ($T_3(t)$), **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - (g) der Durchflussparameter in Form einer Strömungsgeschwindigkeit (v) berechnet wird anhand der Formel

$$v = \frac{1}{2t} \frac{r_1^2 \left(\ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) - \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) \right) - r_2^2 \ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) + r_3^2 \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}{r_1 \left(\ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) - \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) \right) - r_2 \ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) + r_3 \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

und/oder die Temperaturleitfähigkeit (a) berechnet wird anhand der Formel

$$a = \frac{1}{4t} \frac{r_1(r_3^2 - r_2^2) + r_2(r_1^2 - r_3^2) + r_3(r_2^2 - r_1^2)}{(r_2 - r_1) \ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1}\right) + (r_2 - r_3) \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)},$$

und

(h) das Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a , λ) ein mehrfaches Messen der Temperaturen ($T_1(t)$, $T_2(t)$, $T_3(t)$) zu einer Vielzahl an Zeitpunkten (t) und ein Mitteln der jeweiligen Ergebnisse umfasst, wobei

- das Mitteln ein Berechnen einer Ausgleichsgeraden über eine Messdaten-Menge an Messdaten umfasst und

- die Messdaten-Menge so gewählt wird, dass eine Steigung der Ausgleichsgeraden nach der Zeit (t) betragsmäßig eine vorgegebene Maximal-Steigung nicht überschreitet.

2. Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) und/oder einer thermischen Transportgröße (a , λ) eines durch eine Durchleitung (12) strömenden Fluids (14), mit den Schritten:

(a) Leiten des Fluids (14) durch die Durchleitung (12),
 (b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (14) mittels eines länglichen Heizelements (24),

(c) Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$) mittels eines ersten Thermometers (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement angeordnet ist,

(d) Messen zumindest einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) mittels zumindest eines zweiten Thermometers (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und

(e) Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a , λ) aus der ersten Temperatur ($T_1(t)$) und der zweiten Temperatur ($T_2(t)$), **dadurch gekennzeichnet**, dass

(f) der Durchflussparameter in Form einer Strömungsgeschwindigkeit (v) berechnet wird anhand

der Formel
$$v = \frac{1}{2t} \frac{r_2^2 - r_1^2 + 4at \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}{r_2 - r_1}$$
 oder

(g) die Temperaturleitfähigkeit (a) berechnet wird anhand der Formel

$$a = \frac{1}{4t} \frac{r_2^2 - r_1^2 - 2vt(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)},$$

und

(h) das Berechnen des Durchflussparameters (v) oder der thermischen Transportgröße (a , λ) ein mehrfaches Messen der Temperaturen ($T_1(t)$, $T_2(t)$) zu einer Vielzahl an Zeitpunkten (t) und ein Mitteln der jeweiligen Ergebnisse umfasst, wobei

- das Mitteln ein Berechnen einer Ausgleichsgeraden über eine Messdaten-Menge an Messdaten umfasst und

- die Messdaten-Menge so gewählt wird, dass eine Steigung der Ausgleichsgeraden nach der Zeit (t) betragsmäßig eine vorgegebene Maximal-Steigung nicht überschreitet.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wärmeleitfähigkeit (λ) berechnet wird anhand der Formel

$$\lambda = \frac{H_0}{4\pi Lt(T_1 - T_2)} \left[\exp\left(\frac{-(r_1 - vt)^2}{4at}\right) - \exp\left(\frac{-(r_2 - vt)^2}{4at}\right) \right],$$

wobei L die Länge der Wärmequelle ist und H_0 die an das strömende Fluid abgegebene Enthalpie ist.

4. Messvorrichtung (10) zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) und/oder einer thermischen Transportgröße (a , λ) eines Fluids (14), mit:

(i) einer Durchleitung (12) zum Durchleiten des strömenden Fluids (14),

(ii) einer Heizvorrichtung, die ein Heizelement (24) zum impulsförmigen Erwärmen des Fluids (14) aufweist,

(iii) einem ersten Thermometer (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement (24) angeordnet ist, zum Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$),

(iv) einem zweiten Thermometer (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, zum Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) und

(v) einem dritten Thermometer (30), das in einem dritten Thermometerabstand (r_3) vom Heizelement angeordnet ist, zum Messen einer dritten zeitabhängigen Temperatur ($T_3(t)$),

(vi) einer Auswerteeinheit (18), die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(a) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (14) mittels eines Heizelements (24),

(b) Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$) mittels eines ersten Thermometers (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement (24) angeordnet ist,

(c) Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) mittels eines zweiten Thermometers (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und

(d) Messen einer dritten zeitabhängigen Temperatur ($T_3(t)$) mittels eines dritten Thermometers (30), das in einem dritten Thermometerabstand (r_3) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und

(e) Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a , λ) aus der ersten Temperatur ($T_1(t)$), der zweiten Temperatur

($T_2(t)$) und der dritten Temperatur ($T_3(t)$), **dadurch gekennzeichnet**, dass

(f) das Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a, λ) ein mehrfaches Messen der Temperaturen ($T_1(t), T_2(t), T_3(t)$) zu einer Vielzahl an Zeitpunkten (t) und ein Mitteln der jeweiligen Ergebnisse umfasst, wobei

- das Mitteln ein Berechnen einer Ausgleichsgeraden über eine Messdaten-Menge an Messdaten umfasst und

- die Messdaten-Menge so gewählt wird, dass eine Steigung der Ausgleichsgeraden nach der Zeit (t) betragsmäßig eine vorgegebene Maximal-Steigung nicht überschreitet, und

(g) die Auswerteeinheit (18) ausgebildet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters in Form einer Strömungsgeschwindigkeit (v) anhand der Formel

$$v = \frac{1}{2t} \frac{r_1^2 \left(\ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) - \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) \right) - r_2^2 \ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) + r_3^2 \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}{r_1 \left(\ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) - \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) \right) - r_2 \ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) + r_3 \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

und/oder zum automatischen Berechnen der Temperaturleitfähigkeit (a) anhand der Formel

$$a = \frac{1}{4t} \frac{r_1 (r_3^2 - r_2^2) + r_2 (r_1^2 - r_3^2) + r_3 (r_2^2 - r_1^2)}{(r_2 - r_1) \ln \left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \right) + (r_1 - r_3) \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

5. Messvorrichtung (10) zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) und/oder einer thermischen Transportgröße (a, λ) eines Fluids (14), mit:

(i) einer Durchleitung (12) zum Durchleiten des strömenden Fluids (14),

(ii) einer Heizvorrichtung, die ein Heizelement (24) zum impulsförmigen Erwärmen des Fluids (14) aufweist,

(iii) einem ersten Thermometer (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement (24) angeordnet ist, zum Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$),

(iv) einem zweiten Thermometer (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, zum Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) und

(v) einer Auswerteeinheit (18), die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(a) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (14) mittels eines Heizelements (24),

(b) Messen einer ersten zeitabhängigen Temperatur ($T_1(t)$) mittels eines ersten Thermometers (26), das in einem ersten Thermometerabstand (r_1) vom Heizelement angeordnet ist, Messen zumindest einer zweiten zeitabhängigen Temperatur ($T_2(t)$) mittels eines

zweiten Thermometers (28), das in einem zweiten Thermometerabstand (r_2) vom Heizelement (24) angeordnet ist, und

(c) Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a, λ) aus der ersten Temperatur ($T_1(t)$) und der zweiten Temperatur ($T_2(t)$), **dadurch gekennzeichnet**, dass

(d) das Berechnen des Durchflussparameters (v) und/oder der thermischen Transportgröße (a, λ) ein mehrfaches Messen der Temperaturen ($T_1(t), T_2(t)$) zu einer Vielzahl an Zeitpunkten (t) und ein Mitteln der jeweiligen Ergebnisse umfasst, wobei

- das Mitteln ein Berechnen einer Ausgleichsgeraden über eine Messdaten-Menge an Messdaten umfasst und

- die Messdaten-Menge so gewählt wird, dass eine Steigung der Ausgleichsgeraden nach der Zeit (t) betragsmäßig eine vorgegebene Maximal-Steigung nicht überschreitet, und

(e) die Auswerteeinheit (18) ausgebildet ist zum automatischen Berechnen

- des Durchflussparameters in Form einer Strömungsgeschwindigkeit (v) anhand der Formel

$$v = \frac{1}{2t} \frac{r_2^2 - r_1^2 + 4at \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}{r_2 - r_1}$$

und/oder

- der Temperaturleitfähigkeit (a) anhand der Formel

$$a = \frac{1}{4t} \frac{r_2^2 - r_1^2 - 2vt (r_2 - r_1)}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

6. Messvorrichtung (10) nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auswerteeinheit (18) ausgebildet ist zum automatischen Berechnen der Wärmeleitfähigkeit (λ) anhand der Formel

$$\lambda = \frac{H_0}{4\pi Lt (T_1 - T_2)} \left[\exp \left(\frac{-(r_1 - vt)^2}{4at} \right) - \exp \left(\frac{-(r_2 - vt)^2}{4at} \right) \right]$$

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

