



(10) **DE 10 2016 105 501 A1** 2017.09.28

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 105 501.8**

(22) Anmeldetag: **23.03.2016**

(43) Offenlegungstag: **28.09.2017**

(51) Int Cl.: **G01F 1/684** (2006.01)

G01F 1/68 (2006.01)

G01P 5/10 (2006.01)

(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:

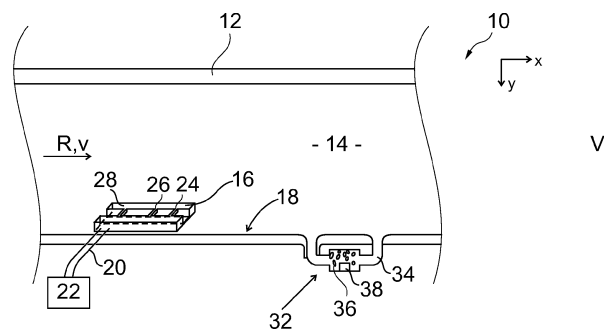
DE	10 2011 010 461	A1
DE	10 2014 008 284	A1
DE	690 11 099	T2
US	2013 / 0 125 643	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Durchflussmessvorrichtung zum Messen eines Durchflussparameters eines Fluids und
Verfahren zur Durchflussmessung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Durchflussmessvorrichtung (10) zum Messen eines Durchflussparameters (v) eines Fluids (14), insbesondere eines Gases, mit einer Durchleitung (12) zum Durchleiten des Fluids (14) in einer Durchflussrichtung (R), einem länglichen Heizelement (24), zumindest einem Thermometer (26) und einer Steuereinheit (22), die mit dem Heizelement (24) zum Abgeben eines Temperaturimpulses verbunden ist und mit dem Thermometer (26) zum Bestimmen einer Maximaltemperatur verbunden ist, und eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflusses aus der Maximaltemperatur. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass das Thermometer (26) bezüglich der Durchflussrichtung (R) stromaufwärts angeordnet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Durchflussmessvorrichtung zum Messen eines Durchflussparameters eines Fluids, insbesondere eines Gases, mit (a) einer Durchleitung zum Durchleiten des Fluids in einer Durchflussrichtung, (b) einem länglichen Heizelement, (c) zumindest einem Thermometer, und (d) einer Steuereinheit, die mit dem Heizelement zum Abgeben eines Temperaturimpulses verbunden ist und mit dem Thermometer zum Bestimmen einer Maximaltemperatur am Thermometer verbunden ist und die eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflusses aus der Maximaltemperatur.

[0002] Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Durchflussmessung mit den Schritten (a) Durchleiten eines Fluids mit einer Temperatur T_g in einer Durchflussrichtung durch eine Durchleitung, (b) Abgeben eines Temperaturimpulses mittels eines länglichen Heizelementes, (c) Messen einer Maximaltemperatur mittels eines Thermometers und (d) automatisches Berechnen eines Durchflussparameters, der den Durchfluss charakterisiert, aus der Maximaltemperatur.

[0003] Derartige Durchflussmessvorrichtungen dienen beispielsweise zur Messung des Gasdurchflusses in Gasleitungen von Haushalten. Da es sich dabei um Messgeräte handelt, soll das Durchflussmessgerät besonders einfach, klein und robust aufgebaut sein. Zudem soll das Durchflussmessgerät eine möglichst hohe Messgenauigkeit aufweisen, um Fehlerberechnungen zu vermeiden.

[0004] Es ist bekannt, die Temperatur zeitabhängig am in Strömungsrichtung stromabwärts gelegenen Thermometer zu bestimmen und aus der Zeitdifferenz zwischen dem Abgeben des Temperaturimpulses und dem Eintreffen des Temperaturimpulses am Thermometer sowie dem Abstand zwischen dem Heizelement und dem Thermometer die Durchflussgeschwindigkeit zu bestimmen.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messung des Durchflussparameters zu verbessern und/oder zu vereinfachen.

[0006] Die Erfindung löst das Problem durch eine gattungsgemäße Durchflussmessvorrichtung, bei der das Thermometer bezüglich der Durchflussrichtung stromaufwärts angeordnet ist. Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein gattungsgemäßes Verfahren, bei dem der Temperaturimpuls bezüglich der Durchflussrichtung stromabwärts des Thermometers abgegeben wird.

[0007] Es hat sich gezeigt, dass die stromaufwärtige Messung der Temperatur zusammen mit der Bestimmung der Maximaltemperatur die Messung des Durchflussparameters mit einer besonders geringen Messunsicherheit erlaubt. Das gilt insbesondere dann, wenn – wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen – ein Abstand zwischen dem länglichen Heizelement und dem Thermometer kleiner ist als 250 Mikrometer, insbesondere 150 Mikrometer. Das gilt besonders für kleine Durchflüsse.

[0008] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Durchflussparameter insbesondere ein Parameter verstanden, der den Durchfluss durch die Durchleitung charakterisiert. Beispielsweise handelt es sich beim Durchflussparameter um die Strömungsgeschwindigkeit v , einen Durchfluss D an strömendem Medium, beispielsweise Liter, Stoffmenge und/oder Masse pro Zeiteinheit Δt , oder eine Menge M , insbesondere ein Volumen, eine Stoffmenge und/oder eine Masse an Medium, das während einer vorgegebenen Zeiteinheit Δt durch die Durchleitung geflossen ist. Selbstverständlich kann auch mehr als eine dieser Größen bestimmt werden.

[0009] Unter einem länglichen Heizelement 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. Insbesondere kann das längliche Heizelement also in guter Näherung als eine linienförmige Wärmequelle betrachtet werden.

[0010] Unter dem Thermometer wird insbesondere eine Vorrichtung verstanden, mittels der die Temperatur und/oder die Temperaturerhöhung gegenüber einer Ausgangstemperatur ermittelbar ist. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass das Thermometer einen Messwert erzeugt, der die Temperatur in einer Temperatureinheit, beispielsweise in Grad Celsius, Fahrenheit oder Kelvin, angibt. Insbesondere ist es ausreichend, dass aus dem Temperatursignal auf eindeutige Weise die absolute Temperatur und/oder die Temperaturerhöhung gegenüber einer Ausgangstemperatur T_g ermittelbar ist.

[0011] Unter Maximaltemperatur wird das zeitliche Maximum der Temperatur oder Temperaturerhöhung über einer Ausgangstemperatur T_g , insbesondere diejenige Temperatur, die am Thermometer anliegt, wenn das Heizelement keine Wärme abgibt, verstanden.

[0012] Unter dem Abgeben eines Temperaturimpulses wird insbesondere eine Erwärmung verstanden, die über eine so kurze Zeitdauer erfolgt, dass eine Näherung als Dirac-Impuls zu einer Messabweichung von höchstens 5% führt. Beispielsweise dauert das Erwärmen weniger als eine Zehntelsekunde, insbesondere weniger als 1 Millisekunde.

[0013] Unter dem Fluid wird insbesondere ein Gas oder Gasgemisch verstanden. Vorzugsweise handelt es sich um flüchtige Kohlenwasserstoffe wie Erdgas und/oder Biogas und/oder Wasserstoff. Alternativ kann das Fluid auch eine Flüssigkeit oder ein Flüssigkeitsgemisch sein.

[0014] Unter dem Merkmal, dass der Durchflussparameter aus der Maximaltemperatur berechnet wird, ist insbesondere zu verstehen, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Maximaltemperatur selbst direkt verwendet wird. Insbesondere ist es auch möglich, dass zur Berechnung digitale Signale verwendet werden, die die entsprechende Größe kodieren.

[0015] Unter dem Merkmal, dass der Durchflussparameter anhand einer Gleichung berechnet wird, wird insbesondere verstanden, dass mathematische Operationen ausgeführt werden, die dieser Gleichung entsprechen. Es ist dabei möglich, nicht aber notwendig, dass die angegebene Gleichung exakt wie aufgeschrieben verwendet wird. Wird beispielsweise ein Faktor gleich 1 gesetzt, so muss bei der Anwendung der Formel selbstverständlich keine Multiplikation mit 1 durchgeführt werden, da eine derartige Multiplikation das Ergebnis nicht ändert. Es ist zudem möglich, dass der Gleichung ein weiterer Term hinzugefügt wird, der das Ergebnis nur unwesentlich verändert. Beispielsweise ist es möglich, einen beliebigen Term hinzuzufügen, in dieser die Messgenauigkeit um weniger als 1% verändert. Es ist zudem möglich, eine mathematisch äquivalente Gleichung zur Berechnung zu verwenden.

[0016] Wenn davon gesprochen wird, dass eine Temperatur, beispielsweise die Maximaltemperatur, bestimmt wird, ist darunter zu verstehen, dass ein Messwert ermittelt wird, der die Temperatur repräsentiert. In der Regel wird die Temperatur durch eine elektrische Messgröße repräsentiert, beispielsweise eine elektrische Spannung.

[0017] Es sei darauf hingewiesen, dass bei einer Durchflussmessvorrichtung die Durchflussrichtung angegeben ist. Unabhängig von einer etwaigen expliziten Kennzeichnung dieser Durchflussrichtung, beispielsweise durch eine grafische Darstellung, die gemäß einer bevorzugten Ausführungsform an der Durchflussmessvorrichtung angebracht ist, kann die Durchflussrichtung auch dadurch eindeutig dem Durchflussmessgerät zugeordnet werden, dass die Steuereinheit so ausgebildet ist, dass sie den Durchflussparameter anhand einer Gleichung berechnet, die dann ein korrektes Ergebnis liefert, wenn das Fluid in Durchflussrichtung durch die Durchflussmessvorrichtung strömt.

[0018] Selbstverständlich ist es möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass die Durchflussmessvorrichtung so ausgebildet ist, dass sie in zwei Richtungen durchströmt werden kann. In diesem Fall besitzt die Durchflussmessvorrichtung zumindest zwei Thermometer, wobei das Heizelement zwischen den beiden Thermometern angeordnet ist. Da der Temperaturimpuls bei von null verschiedenen Durchströmgeschwindigkeit stets schneller stromabwärts wandert als stromaufwärts, kann die Steuereinheit bevorzugt so ausgebildet sein, dass sie aus den Messergebnissen der beiden Thermometer automatisch ermittelt, in welche Richtung das Fluid strömt und den Durchfluss anhand der Messung des stromaufwärtigen Thermometers ermittelt.

[0019] Im Folgenden wird eine Herleitung der zur Auswertung verwendbaren Formeln gegeben.

[0020] Mathematische Modelle zur Wärmebilanz der thermischen Anemometrie betrachten üblicherweise technische Anordnungen von Heizelement(en) und Thermometer(n), die stromabwärts funktionieren. Für die Ausbreitung der vom Heizelement erzeugten Wärme ergibt sich hierbei zwangsläufig, dass sich Wärmeleitung und Advektion (kollektive Strömung erwärmter Fluidteilchen) additiv zu erzwungener Konvektion überlagern. Bei der Ableitung von Arbeitsgleichungen für diesen kombinierten Transport entsteht ein kompliziertes Differentialgleichungssystem, das sich bisher nur näherungsweise lösen lässt.

[0021] Die skizzierte „Stromab-Situation“ lässt sich formal entscheidend vereinfachen, wenn man stattdessen die stromaufwärts gerichtete Wärmeausbreitung im ansonsten strömenden Fluid betrachtet. Das Thermometer ist also stromaufwärts des Heizelements in einem nicht zu großen gegenseitigen Abstand angeordnet. Hier überlagern sich Wärmeleitung und Advektion nicht konstruktiv, sondern vielmehr destruktiv. Folglich dürfen die genannten Transportmechanismen gesondert betrachtet werden. Die Bilanz dieser „Stromauf-Situation“ kann sich, zumindest in der mathematischen Näherung, immer dann besonders einfach gestalten, wenn deren technische Realisierung in Mikrotechnik vorliegt. Für beide Funktionselemente lassen sich dann sehr kleine Volumina und entsprechend geringe Wärmekapazitäten mathematisch ansetzen. Auch der gegenseitige Abstand von Heizelement und Thermometer darf sehr klein gewählt werden (z. B. höchstens 150 μm , beispielsweise).

[0022] Zum Zeitpunkt $t = 0$ setzt das linienförmige Heizelement der Länge L am Ort $x = 0$ augenblicklich, d. h. δ -funktionsartig (beispielsweise $\tau = 100 \mu\text{m}$), die Enthalpie H_0 frei. Diese breitet sich in dem umgebenden, ruhenden Fluid, insbesondere Gas, („G“) der Temperatur $T = T_G$ und der Wärmeleitfähigkeit λ_G sowie der Temperaturleitfähigkeit a_G isotrop und homogen durch Leitung aus. Das resultierende orts- und zeitabhängige Temperaturfeld lautet

$$\Delta T(x, t) = T(x, t) - T_G = \frac{H_0}{4\pi L \lambda_G t} \exp\left(\frac{-x^2}{4a_G t}\right). \quad (1)$$

[0023] Das Maximum der Temperatur ist:

$$\Delta T_{\max}(x, t_{\max}) = \frac{H_0}{\pi x^2 L (\rho c_p)_G} e \quad (2)$$

[0024] Es tritt am Ort $\pm x$ zum Zeitpunkt $t_{\max} = x^2/4a_G$ auf. Beispielsweise ist $t_{\max} = 5 \text{ ms}$. In (2) bezeichnet $(\rho c_p)_G = \lambda_G/a_G$ die volumetrische spezifische Wärme für die Dichte ρ des Fluids. e ist die Eulersche Zahl 2,71828....

[0025] Der Heizer soll nun von einem Fluid mit der Durchflussgeschwindigkeit v in (positiver) x -Richtung überströmt werden. Hierbei entzieht ihm das Fluid durch erzwungene Konvektion die Enthalpie

$$H_K = \alpha A_H t_{\max} (T_H - T_G) = \alpha A_H t_{\max} \frac{H_0}{(\rho c_p)_H V_H} \quad \text{mit} \quad (T_H - T_G) = \frac{H_0}{(\rho c_p)_H V_H} \quad (3)$$

[0026] Es bezeichnen α den Wärmeübergangskoeffizienten, A_H die vom Fluid überströmte Oberfläche des Heizelements und t_{\max} die wirksame Überströmzeit, also die Zeit, die zwischen dem Temperaturimpuls und dem Eintreffen des Temperaturmaximums am Thermometer verstreicht. Das Temperaturmaximum eines stromaufwärts ($x \leq 0$) gelegenen Thermometers T_1 , $\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, t_{\max}, v)$, erhält man aus den Gleichungen (2) und (3) zu:

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, t_{\max}, v) = \frac{H_0 - H_K}{\pi x^2 L (\rho c_p)_G e} = \frac{H_0}{\pi x^2 L (\rho c_p)_G e} \left(1 - \frac{\alpha t_{\max} A_H}{(\rho c_p)_H V_H}\right) = \frac{H_0}{\pi x^2 L (\rho c_p)_G e} \left(1 - \frac{\alpha t_{\max}}{(\rho c_p)_H d}\right)$$

(4)

wobei $A_H d = V_H$ ist. Dieses Ergebnis gilt nur noch für Orte $x \leq 0$ (z. B. $x = -50 \mu\text{m}$). Für ein bekanntes Fluid lässt sich (4) vereinfachen zu

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, t_{\max}, v) = \Delta T_{\max}^{(1)}(-x, t_{\max}, v = 0) \left(1 - \frac{\alpha t_{\max}}{(\rho c_p)_H d}\right). \quad (5)$$

[0027] Wenn der betrachtete Sensor in der Nähe der Wand des Strömungskanals liegt, dann lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient mit zumeist guter Näherung vereinfacht als

$$\alpha \approx bv^\epsilon \quad \text{mit} \quad \epsilon \approx 0,5 \quad \text{darstellen.} \quad (6)$$

[0028] Mit der weiteren Näherung

$$\alpha \approx b\sqrt{v} \quad (7)$$

wird aus (5) schließlich:

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, t_{\max}, v) = \Delta T_{\max}^{(1)}(-x, t_{\max}, v=0) \left(1 - \frac{t_{\max} b \sqrt{v}}{(\rho c_p)_H d} \right). \quad (8)$$

[0029] Hieraus erhält man die Strömungsgeschwindigkeit zu:

$$v = d^2 (\rho c_p)_H^2 \frac{[T_{\max}^{(1)}(v=0) - T_{\max}^{(1)}(v)]^2}{b^2 t_{\max}^2 [\Delta T_{\max}^{(1)}(v=0)]^2} \quad (9)$$

[0030] Während der Parameter b generell vom Fluid und den Strömungsrandbedingungen abhängt, können $(\rho c_p)_H$ und d als Sensorkonstanten betrachtet werden. Trägt man die jeweiligen Temperaturmaxima über der Wurzel aus der Strömungsgeschwindigkeit auf, so ergibt sich eine Gerade mit negativer Steigung.

[0031] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Steuereinheit daher eingerichtet zum automatischen Berechnen des Durchflusses anhand einer Gleichung, die die Maximaltemperatur, eine Ruhe-Maximaltemperatur und einen Faktor, der von der Durchflussgeschwindigkeit abhängt, berechnet, wobei die Ruhe-Maximaltemperatur diejenige Maximaltemperatur ist, die am Thermometer anliegt, wenn die Durchflussgeschwindigkeit des Fluids null ist und das Heizelement auf die gleiche Weise bestromt wird wie bei der Bestimmung der Maximaltemperatur. In diesem Fall ist es lediglich notwendig, den Faktor, der von der Durchflussgeschwindigkeit abhängt, zu kalibrieren und die Ruhe-Maximaltemperatur zu messen. Danach kann allein aus der jeweiligen Maximaltemperatur der Durchflussparameter, insbesondere die Durchflussgeschwindigkeit, bestimmt werden.

[0032] Vorzugsweise ist die Steuereinheit daher eingerichtet zum automatischen Berechnen des Durchflusses oder der Durchflussgeschwindigkeit anhand der Formel

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v) = \Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v=0) \left(1 - \frac{t_{\max} b v^s}{(\rho c_p)_H d} \right). \quad (10)$$

[0033] Darin ist

$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v)$	die Maximaltemperatur,
$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v=0)$	die Ruhe-Maximaltemperatur,
$-x$	der (positive) Abstand des Thermometers vom Heizelement,
t_{\max}	die wirksame Überströmzeit,
b	ein Proportionalitätsfaktor,
v	die (unbekannte) Durchflussgeschwindigkeit,
ρ	die Dichte des Fluids,
$(\rho c_p)_H$	die volumetrische spezifische Wärme des Heizelements
d	eine Sensorkonstante.

[0034] Die Sensorkonstante d ist in der Regel berechenbar als das Volumen des Heizers dividiert durch die überströmte Querschnittsfläche des Heizers.

[0035] Unter dem Merkmal, dass der Durchflussparameter anhand der angegebenen Formel berechnet wird, wird insbesondere verstanden, dass eine mathematische Operation durchgeführt wird, die dieser Formel entspricht. Selbstverständlich ist es möglich, aus dem so erhaltenen Messwert weitere Messwerte zu errechnen, beispielsweise den Gesamt-Durchfluss durch Integration über die Zeit unter den Massendurchfluss durch Multiplikation mit der Dichte des Fluids.

[0036] Besonders günstig ist es, wenn die Steuereinheit eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters anhand der Formel (9). Diese Formel ergibt sich auf Basis der Näherung, dass die Strömungsgeschwindigkeit in Nähe des Heizelements und des Thermometers der Wurzel der gesamten quasi integralen Durchflussgeschwindigkeit entspricht.

[0037] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind das Heizelement und das Thermometer in einem Abstand von höchstens 3 mm, insbesondere höchstens 1 mm, von einer Innenwandung der Durchleitung angeordnet.

[0038] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

[0039] Fig. 1 einen schematischen Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Durchflussmessvorrichtung und

[0040] Fig. 2 eine schematisch perspektivische Ansicht eines Mess-Chips, auf dem ein Heizelement und das zumindest eine Thermometer integriert sind.

[0041] Fig. 1 zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Durchflussmessvorrichtung **10**, die eine Durchleitung **12** zum Durchleiten eines Fluids **14** besitzt. Die Durchflussmessvorrichtung **10** weist zudem einen Mess-Chip **16** auf, der beispielsweise auf einer Innenwand **18** der Durchleitung **12** befestigt ist. Über Kabel **20** steht der Mess-Chip **16** in Verbindung mit einer Steuereinheit **22**.

[0042] Auf dem Mess-Chip **16** sind ein Heizelement **24** sowie ein erstes Thermometer **26** (oben als T1 bezeichnet) und ein zweites Thermometer **28** ausgebildet. Im vorliegenden Fall sind das Heizelement **24** sowie die Thermometer **26**, **28** aus einem Substrat **30** herausgeätzt. Es ist zu erkennen, dass die Thermometer **26**, **28** bezüglich einer Durchflussrichtung R stromaufwärts angeordnet sind.

[0043] Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass die Durchflussmessvorrichtung **10** eine Transportgrößenbestimmungsvorrichtung **32** aufweist, die beispielsweise in einem Abzweig **34** der Durchleitung **12** angeordnet ist. Der Abzweig **34** enthält das gleiche Fluid wie Durchleitung **12** selbst, eine Durchflussgeschwindigkeit v ist jedoch in guter Näherung null, da das Fluid **14**, beispielsweise mittels einer Fritte **36**, stark abgebremst wird. Mittels eines weiteren Chips **38** wird die thermische Transportgröße, beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit λ_G und/oder die Temperaturleitfähigkeit a_G des Fluids **14** bestimmt. Derartige Verfahren gehören zum Stand der Technik und werden hier nicht weiter beschrieben.

[0044] Fig. 2 zeigt den Mess-Chip **16** in einer vergrößerten schematischen Ansicht. Es ist zu erkennen, dass aus dem Substrat **30** ein Kanal **40** herausgearbeitet wurde, den die Thermometer **26**, **28** überspannen. Ein Abstand x_{26} zwischen dem Heizelement **24** und dem ersten Thermometer **26** beträgt im vorliegenden Fall gemäß $x_{26} = 50 \mu\text{m}$. Ein zweiter Abstand x_{28} zwischen dem zweiten Thermometer **28** und dem Heizelement beträgt im vorliegenden Fall $x_{28} = 400 \mu\text{m}$.

[0045] Die Steuereinheit **22** ist eingerichtet zum automatischen Anlegen eines Temperaturimpulses mit der Dauer τ . Zudem wird kontinuierlich die Temperatur $T_{26} = T^{(1)}$ des ersten Thermometers **26** gemessen. Nach Abgeben des Temperaturimpulses steigt die Temperatur T_{26} an und durchläuft ein zeitliches Maximum $T^{(1)}_{\text{max}}$. Aus der oben angegebenen Formel kann dann die Durchflussgeschwindigkeit v bestimmt werden, wenn die übrigen Parameter der Gleichung bekannt sind.

[0046] Die Durchflussgeschwindigkeit v wird zudem anhand der Maximaltemperatur berechnet, die das zweite Thermometer **28** misst. Als Messergebnis wird dann beispielsweise der arithmetische Mittelwert der beiden so ermittelten Messwerte ausgegeben. Alternativ kann das zweite Thermometer **28** zum Messen der Gastemperatur T_g verwendet werden, um die Temperaturerhöhung und damit die Maximaltemperatur zu bestimmen.

[0047] Trägt man die Gl.(5)

$$(5) \Delta T_{\text{max}}^{(1)}(-x, v) = \Delta T_{\text{max}}^{(1)}(-x, v = 0) \left(1 - \frac{t_{\text{max}} \alpha}{(\rho c_p)_H d} \right)$$

über v^ϵ auf, erhält man wegen $\alpha \approx bv^\epsilon$ eine Gerade. Beispielsweise mit $\epsilon = 0,5$ entsteht die Gerade $\Delta T_{\text{max}}^{(1)}(-x, v) = m\sqrt{v} + n$. Diese hat den Achsenabschnitt

$$n = \Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v = 0). \quad (11)$$

und die Steigung

$$m = -n t_{\max} \frac{b}{(\rho c_p)_H d}. \quad (12)$$

[0048] Zur Kalibrierung von m und n geht man wie folgt vor: In einer vorgegebenen Messsituation (Enthalpie des Heizers $H_0 = UI$, Gasart, Temperatur) legt man jeweils eine konstante Strömungsgeschwindigkeit zwischen $v = 0$ und $v = v_{\max}$ an die Durchflussmessvorrichtung an und misst das zugehörige Temperaturmaximum $\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v)$ zur Zeit $t = t_{\max}$. Die Größe v_{\max} bezeichnet die maximale Geschwindigkeit. (Die elektrische Verlustleistung des Heizers, $P = UI$, sollte bei gegebener Impulsdauer (z. B. $\tau = 100 \mu\text{s}$) vorzugsweise so eingestellt sein, dass auch noch bei v_{\max} ein hinreichend deutliches Temperaturmaximum

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v = v_{\max})$$

zu messen ist.) Die erhaltenen diskreten Temperaturmaxima $\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v)$ trägt man (gewöhnlich) gegen \sqrt{v} auf. Mit Hilfe einer Geradenanpassung findet man die gesuchten Werte für m und n .

Bezugszeichenliste

10	Durchflussmessvorrichtung
12	Durchleitung
14	Fluid
16	Mess-Chip
18	Innenwand
20	Kabel
22	Steuereinheit
24	Heizelement
26	erstes Thermometer
28	zweites Thermometer
30	Substrat
32	Transportgrößen-Bestimmungsvorrichtung
34	Abzweig
36	Fritte
38	Chips
40	Kanal
Δt	Zeiteinheit
a_G	Temperaturleitfähigkeit
A_H	überströmte Oberfläche des Heizelements
b	Parameter
d_H	effektive Dicke des Heizelements (Sensorkonstante)
E	Exponent
H_0	Enthalpie
L	Länge des Heizelements
R	Durchflussrichtung
T	Temperatur
v	Durchflussgeschwindigkeit
V_H	Volumen des Heizelements
x	Abstand, Raumkoordinate
α	Wärmeübergangskoeffizienten
τ	Dauer des Temperaturimpulses
λ_G	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte
t	Zeit

Patentansprüche

1. Durchflussmessvorrichtung (10) zum Messen eines Durchflussparameters (v) eines Fluids (14), insbesondere eines Gases, mit

- (a) einer Durchleitung (12) zum Durchleiten des Fluids (14) in einer Durchflussrichtung (R),
- (b) einem länglichen Heizelement (24),
- (c) zumindest einem Thermometer (26) und
- (d) einer Steuereinheit (22), die
 - mit dem Heizelement (24) zum Abgeben eines Temperaturimpulses verbunden ist und
 - mit dem Thermometer (26) zum Bestimmen einer Maximaltemperatur verbunden ist, und
 - eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflusses aus der Maximaltemperatur, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- (e) das Thermometer (26) bezüglich der Durchflussrichtung (R) stromaufwärts angeordnet ist.

2. Durchflussmessvorrichtung (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (22) eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflusses anhand einer Gleichung, die

- die Maximaltemperatur $\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v)$,
- eine Ruhe-Maximaltemperatur $\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v = 0)$, die die maximale Temperatur ist, die am Thermometer (26) anliegt, wenn eine Durchflussgeschwindigkeit (v) des Fluids null ist, und
- einen Faktor, der von der Durchflussgeschwindigkeit (v) abhängt, aufweist.

3. Durchflussmessvorrichtung (10) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (22) eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters, insbesondere des Durchflusses und/oder der Durchflussgeschwindigkeit (v), anhand der Formel

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v) = \Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v = 0) \left(1 - \frac{t_{\max} b v^\varepsilon}{(\rho c_p)_H d} \right),$$

dabei ist:

$\Delta T_{\max}^{(1)}$ die Maximaltemperatur,

–x der Abstand des Thermometers (26) vom Heizelement (24),

$(\rho c_p)_H$ die volumetrische spezifische Wärme des Heizelements (24) für die Dichte ρ ,

d eine Sensorkonstante,

t_{\max} die wirksame Überströmzeit,

b eine Konstante, die vom Gas und den Strömungsbedingungen abhängt,

v die Durchflussgeschwindigkeit und

ε ein Exponent, der die Strömungsgeschwindigkeit in Randnähe im Vergleich zur Durchflussgeschwindigkeit (v) angibt.

4. Durchflussmessvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (22) eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters anhand der Formel

$$v = d^2 (\rho c_p)_H \frac{[T_{\max}^{(1)}(v = 0) - T_{\max}^{(1)}(v)]^2}{b^2 t_{\max}^2 [\Delta T_{\max}^{(1)}(v = 0)]^2}.$$

5. Durchflussmessvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Thermometer-Abstand des Thermometers (26) vom Heizelement (24) kleiner ist als 300 Mikrometer, insbesondere kleiner als 200 Mikrometer.

6. Verfahren zur Durchflussmessung mit den Schritten:

(a) Durchleiten eines Fluids in einer Durchflussrichtung (R) durch eine Durchleitung (12),

(b) Abgeben eines Temperaturimpulses mittels eines länglichen Heizelements (24),

(c) Messen einer Maximaltemperatur mittels eines Thermometers (26) und

(d) automatisches Berechnen eines Durchflussparameters, der den Durchfluss charakterisiert, aus der Maximaltemperatur,

dadurch gekennzeichnet, dass

(e) der Temperaturimpuls bezüglich der Durchflussrichtung (R) stromabwärts des Thermometers **(26)** abgegeben wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Durchfluss berechnet wird aus

- der Maximaltemperatur,
- einer Ruhe-Maximaltemperatur, die die maximale Temperatur ist, die am Thermometer **(26)** anliegt, wenn eine Durchflussgeschwindigkeit (v) des Fluids null ist und
- einem Faktor, der von der Durchflussgeschwindigkeit (v) abhängt.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Durchfluss und/oder die Durchflussgeschwindigkeit (v) anhand der Formel

$$\Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v) = \Delta T_{\max}^{(1)}(-x, v = 0) \left(1 - \frac{t_{\max} b v^\varepsilon}{(\rho c_p)_H d} \right)$$

berechnet wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Durchfluss und/oder die Durchflussgeschwindigkeit (v) anhand der Formel

$$v = d^2 (\rho c_p)_H \frac{[T_{\max}^{(1)}(v=0) - T_{\max}^{(1)}(v)]^2}{b^2 t_{\max}^2 [\Delta T_{\max}^{(1)}(v=0)]^2}$$

berechnet wird.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

