

(10) **DE 10 2016 108 688 B3** 2017.07.06

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 108 688.6**
(22) Anmeldetag: **11.05.2016**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **06.07.2017**

(51) Int Cl.: **G01F 1/68 (2006.01)**
G01P 5/10 (2006.01)
G01N 25/18 (2006.01)

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

(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 PartGmbH, 38122 Braunschweig,
DE**

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

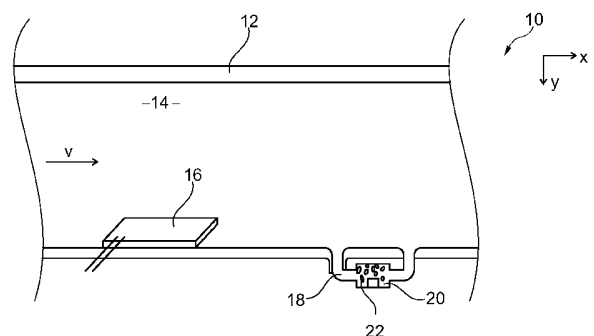
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2014 010 939	B3
DE	10 2012 106 657	A1
DE	690 11 099	T2

**Ihle, S.: Experimentelle Bestimmung des
Recoveryfaktors einer Temperatursonde.
Bachelorarbeit. Technische Universität Wien,
2009**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen einer Durchflussgeschwindigkeit eines Fluids und
Durchflussmessgerät**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) eines Fluids (14), mit den Schritten: (a) Leiten des Fluids (14) durch eine Durchleitung (12), (b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (14) mittels eines Heizelements (24), (c) Messen einer zeitabhängigen Temperatur (T) mittels eines Thermometers (34), das in einem Thermometerabstand (x_{Th}) vom Heizelement (24) angeordnet ist, (d) Ermitteln einer Maximaltemperatur-Zeit (t_{max}) in Form der Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt des impulsförmigen Erwärmens und dem Zeitpunkt des Temperaturmaximums im Thermometerabstand (x_{Th}), und (e) Berechnen der Durchflussparameters (v) aus der Maximaltemperatur-Zeit (t_{max}). Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass das Berechnen des Durchflussparameters (v) anhand einer Gleichung erfolgt, die eine Verringerung der Durchflussgeschwindigkeit in einer Umgebung des Thermometers (34, 36) einbezieht.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters eines Fluids mit den Schritten (a) Leiten des Fluids durch eine Durchleitung, (b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids mittels eines Heizelements, (c) Messen einer zeitabhängigen Temperatur mittels eines Thermometers, das in einem Thermometerabstand vom Heizelement angeordnet ist, (d) Ermitteln einer Maximaltemperatur-Zeit in Form der Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt des impulsförmigen Erwärmens und dem Zeitpunkt des Temperaturmaximums im Thermometerabstand und (e) Berechnen des Durchflussparameters, insbesondere der Durchflussgeschwindigkeit, aus der Maximaltemperatur-Zeit.

[0002] Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Durchflussmessgerät zum Messen eines Durchflussparameters eines Fluids, mit (i) einer Durchleitung zum Durchleiten des Fluids, (ii) einem Heizelement zum impulsförmigen Erwärmen des Fluids, (iii) einem Thermometer, das an einem Messort angeordnet ist, zum Messen einer zeitabhängigen Temperatur des Fluids und (iv) einer elektrischen Auswerteeinheit.

[0003] Es ist beispielsweise aus der DE 10 2014 010 939 B3 bekannt, die Laufzeit, die ein Temperaturmaximum vom Heizelement bis zum Thermometer benötigt, zu verwenden, um die Durchflussgeschwindigkeit gegebenenfalls aus dem Durchfluss oder einem sonstigen Durchflussparameter zu berechnen. Die Herausforderung dabei besteht darin, die Messunsicherheit bei der Messung des Durchflussparameters für einen weiten Bereich an Durchflussgeschwindigkeiten möglichst klein zu halten, um beispielsweise einen Einsatz für die Gas-Durchflussmessung von Erdgas bei Haushaltsgeräten zu ermöglichen.

[0004] Aus der DE 10 2012 106 657 A1 und der Bachelorarbeit an der TU Wien „Experimentelle Bestimmung des Recoveryfaktors einer Temperatursonde“ von S. Ihle ist bekannt, dass das Stoppen des Gasstroms an der Fühleroberfläche zu Messfehlern aufgrund des sogenannten Recovery-Effekts führt.

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

[0006] Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Verfahren, bei dem der Durchflussparameter aus der Maximaltemperatur-Zeit berechnet wird anhand der Gleichung

$$\frac{x_{Th}}{t_{\max}} = \frac{\sqrt{(kv)^c + \left(\frac{F}{2} \frac{a}{x_{Th}}\right)^2} + \left(\frac{F}{2} \frac{a}{x_{Th}}\right)}{\frac{x_{Th} kv}{Fap} + n}$$

[0007] Eine Erläuterung der Formelzeichen findet sich weiter unten.

[0008] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein gattungsgemäßes Durchflussmessgerät, das ausgebildet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters anhand dieser Gleichung.

[0009] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Durchflussparameter insbesondere ein Parameter verstanden, der den Durchfluss durch die Durchleitung charakterisiert. Beispielsweise handelt es sich bei dem Durchflussparameter um die Strömungsgeschwindigkeit v , einen Durchfluss D an strömendem Medium, beispielsweise in 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.

[0010] Unter dem Heizelement wird beispielsweise ein längliches Heizelement verstanden. 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.

[0011] 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 ermittelbar ist.

[0012] Unter Maximaltemperatur wird das zeitliche Maximum der Temperatur oder der Temperaturerhöhung über eine Ausgangstemperatur, insbesondere diejenige Temperatur, die am Thermometer anliegt, wenn das Heizelement keine Wärme abgibt, verstanden.

[0013] Unter dem impulsförmigen Erwärmen wird insbesondere ein Erwärmen verstanden, das 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 Hundertstelsekunde, insbesondere weniger als 1 Millisekunde.

[0014] 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 eine Flüssigkeit oder ein Flüssigkeitsgemisch sein.

[0015] Unter dem Merkmal, dass der Durchflussparameter aus der Maximaltemperatur-Zeit berechnet wird, ist insbesondere zu verstehen, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Maximaltemperatur-Zeit selbst direkt verwendet wird. Insbesondere ist es auch möglich, dass zur Berechnung digitale Signale verwendet werden, die die entsprechende Größe kodieren.

[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 einem Durchflussmessgerät die Durchflussrichtung in der Regel 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 Durchflussgeschwindigkeiten 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 stromabwärtigen Thermometers ermittelt.

[0019] 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, solange dieser die Messunsicherheit um weniger als 1% verändert. Es ist zudem möglich, eine mathematisch äquivalente Gleichung zur Berechnung zu verwenden.

[0020] Unter dem Berechnen des Durchflussparameters anhand der Gleichung wird insbesondere auch ein Berechnen anhand einer Rechenvorschrift verstanden, die durch eine Näherung dieser Gleichung erhalten wird. Eine derartige Näherung ist weiter unten beschrieben.

[0021] Unter dem Merkmal, dass die Auswerteeinheit ausgebildet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters wird insbesondere verstanden, dass die Auswerteeinheit unabhängig von einem etwai-

gen Eingriff von außen selbsttätig den Durchflussparameter berechnet. Es ist möglich und stellt die bevorzugte Ausführungsform dar, dass der so berechnete Durchflussparameter ausgegeben wird, beispielsweise in Form eines elektrischen oder optischen Signals.

[0022] Um den Rechenaufwand zu verringern kann $n = 1$ und $c = 2$ verwendet werden. Diese Näherung führt für die relevanten Durchflussparameter zu in der Regel nicht signifikanten Fehlern.

[0023] Vorzugsweise wird der Durchflussparameter ermittelt anhand dieser Gleichung:

$$v = \frac{p \frac{Fa}{x_{Th}}}{2k \left(\left(\frac{x_{Th}}{t_{\max}} \right)^2 - \left(p \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2 \right)} \left[\frac{x_{Th}}{t_{\max}} \frac{Fa}{x_{Th}} - 2 \left(\frac{x_{Th}}{t_{\max}} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{x_{Th}}{t_{\max}} \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2 - 4 \left(p \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2 \frac{x_{Th}}{t_{\max}} \frac{Fa}{x_{Th}} + 4 \left(\frac{x_{Th}}{t_{\max}} \right)^2 \left(p \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2} \right]$$

[0024] In dieser Gleichung sind weniger zu kalibrierende Parameter enthalten, weshalb der Kalibrierungsaufwand geringer ist. Das Berechnen des Durchflussparameters anhand dieser Gleichung ist ein unabhängiger Gegenstand der Erfindung. Erfindungsgemäß ist damit auch ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1, bei dem der Durchflussparameter anhand dieser Gleichung ermittelt wird.

[0025] Vorzugsweise umfasst das Verfahren die Schritte eines Messens des Produkts Fa aus der Temperaturleitfähigkeit a des Fluids und dem Formfaktor F und eines Berechnens der Durchflussgeschwindigkeit anhand des so gemessenen Produkts Fa . Bei der oben angegebenen Formel treten die Temperaturleitfähigkeit a und der Formfaktor F stets als Produkt auf, sodass beide gemeinsam kalibriert werden können. Eine derartige Kalibrierung kann beispielsweise in regelmäßigen Abständen automatisch durchgeführt werden. Das hat den Vorteil, dass die Messunsicherheit niedrig bleibt, auch wenn sich die Temperaturleitfähigkeit des Fluids ändern sollte.

[0026] Vorzugsweise umfasst das erfindungsgemäße Verfahren die Schritte eines Messens der Temperaturleitfähigkeit und/oder der Wärmeleitfähigkeit des Fluids und eines Auslesens von Kalibrierdaten, die der Temperaturleitfähigkeit und/oder der Wärmeleitfähigkeit zugeordnet sind, aus einem digitalen Speicher und des Berechnens der Durchflussgeschwindigkeit anhand dieser Kalibrierdaten. Die Kalibrierparameter, das heißt diejenigen Parameter in den angegebenen Formeln, die zumindest in linearer Näherung nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängen, hängen möglicherweise von der Art des Fluids ab. In den meisten Anwendungsfällen, beispielsweise bei der Durchflussmessung von Erdgasen, können sich die Eigenschaften des Fluids ändern. Diese Änderung lässt sich meist in guter Näherung auf eindeutige Weise anhand der thermischen Transportgröße, nämlich der Temperaturleitfähigkeit und/oder der Wärmeleitfähigkeit, charakterisieren.

[0027] In anderen Worten kann aus der Wärmeleitfähigkeit und/oder der Temperaturleitfähigkeit auf die zu verbindenden Kalibrierparameter geschlossen werden. Die Zuordnung zwischen der Temperaturleitfähigkeit und/oder der Wärmeleitfähigkeit einerseits und dem Kalibrierparameter andererseits kann beispielsweise in einem Kennfeld abgelegt sein. Ein Kennfeld ist ein Datensatz, der beispielsweise jeder Kombination aus Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit eindeutig einen Satz an Kalibrierparametern zuweist. Ein derartiges Kennfeld kann beispielsweise in einem digitalen Speicher der Auswerteeinheit gespeichert sein.

[0028] Besonders günstig ist es, wenn die Maximaltemperatur-Zeit zusätzlich an zumindest einem zweiten Messort ermittelt wird, wobei der Durchflussparameter aus den so erhaltenen mindestens zwei Maximaltemperatur-Zeiten berechnet wird. Beispielsweise wird die oben angegebene Formel auf beide Maximaltemperatur-Zeiten angewandt und aus den so erhaltenen zwei Ergebnissen der Mittelwert bestimmt. Bei dem Mittelwert kann es sich beispielsweise um den, gegebenenfalls gewichteten, arithmetischen Mittelwert handeln.

[0029] Vorzugsweise wird die Temperatur in einem Abstand von einer Wand der Durchleitung gemessen, der kleiner als 1 mm ist. In diesem Fall wird der Strom des Fluids durch die Durchleitung besonders wenig beeinflusst, insbesondere kommt es nicht zu signifikanten zusätzlichen Verwirbelungen.

Stand der Technik

[0030] Das Patent 10 2012 019 657 beschreibt noch wesentlich das diesem Verfahren zugrundeliegende mathematische Modell. So werden für die Laufzeiten t_{\max} des Maximums eines Temperatur-Impulses $\Delta T(x, t)$ in

einem mit der Geschwindigkeit v strömenden Fluid der Temperaturleitfähigkeit a entsprechend der Geometrie der Wärmequelle die folgenden Gleichungen angeführt:

$$\text{Punktquelle: } t_{max} = \frac{1}{v^2} \left(-3a + \sqrt{9a^2 + v^2 x^2} \right) \quad (\text{Formel 9}). \quad 1.$$

$$\text{Linienquelle: } t_{max} = \frac{1}{v^2} \left(-2a + \sqrt{4a^2 + v^2 x^2} \right) \quad (\text{Formel 10}). \quad 2.$$

[0031] Mit Hilfe des Formfaktors F , ($4 \leq F \leq 6$), lassen sich diese beiden Ausdrücke in eine einheitliche, allgemeine Form bringen:

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

[0032] Der Formfaktor berücksichtigt die geometrische Figur (Punkt: $F = 6$, Strecke: $4 < F < 6$, Gerade: $F = 4$), als die ein Thermometer im Abstand x die Wärmequelle bei $x = 0$ ($x \neq 0$) „sieht“. Eine Herleitung des Formfaktors findet sich in der DE 10 2014 010 939.

[0033] Praktische Ausführungen von Strömungssensoren verfügen oft über einen Kanal, in dem das Fluid den thermischen Teil des Sensors (Wärmequelle und vorzugsweise mehrere Thermometer in unterschiedlichen Abständen) überströmt. Letztere sind dann zumeist an Orten nahe der Kanalwand angebracht. Für diesen Fall gilt die Gl. (3) nicht mehr uneingeschränkt, da sie nicht die besonderen physikalischen Bedingungen der dort vorherrschenden Grenzschicht berücksichtigt.

Herleitung der Arbeitsgleichung

[0034] Man bestimmt aus (3) die vom Sensor am Ort x des Thermometers gemessene (mittlere) Ausbreitungsgeschwindigkeit $u = x/t_{max}$ des Temperatur-Impulses:

$$u(v, a, x) = \frac{\sqrt{x^2 v^2 + \left(\frac{Fa}{2}\right)^2} + \frac{F}{2} a}{x} = \sqrt{v^2 + \left(\frac{Fa}{2x}\right)^2} + \left(\frac{Fa}{2x}\right) \quad 4.$$

[0035] Hier lassen sich zwei Grenzfälle und ein Sonderfall (S) unterscheiden:

(1) Für sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten, $v \ll Fa/(2x)$, bleibt mit

$$u = Fa/x = \sqrt{Fa/t_{max}} \equiv w(a, x) \quad 5.$$

die mittlere Geschwindigkeit des Temperatur-Impulses übrig. Diese wird hier als thermische Geschwindigkeit w bezeichnet. (S) Sollte hingegen w in (4) verschwinden, so bliebe mit $u(v) = v$ eine Speziallösung, die in der Praxis so nicht realisierbar ist.

(2) Für hinreichend große Strömungsgeschwindigkeiten, $v \gg Fa/(2x)$, erhält man:

$$u(v) = v \quad 6.$$

[0036] Für die Strömungsmessung in oder in der Nähe der Kanalwand muss das dort herrschende Strömungsprofil berücksichtigt werden. Beispielsweise für einen zylindrischen Kanal mit dem Durchmesser $2R$ gilt am Ort r .

$$v(r) = v \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] = k(r, x)v \quad \text{mit } 0 \leq k \leq 1 \quad 7.$$

[0037] Eingesetzt in (4) erhält man:

$$u(v, a, x, r) = \sqrt{(kv)^2 + \left(\frac{Fa}{2x}\right)^2} + \left(\frac{Fa}{2x}\right). \quad 8.$$

[0038] Aufgrund von Grenzschichteffekten nahe der Kanalwand kann die Strömung dort vom (linearen) Verhalten (6) bzw. (7) abweichen. Deshalb werden in (8) empirisch, erstens, ein variabler Exponent $c \geq 2$ für das Produkt (kv) und, zweitens, eine Korrekturfunktion ω angesetzt:

$$u(v, a, x, r) = \frac{1}{\omega} \sqrt{(kv)^c + \left(\frac{Fa}{2x}\right)^2} + \left(\frac{Fa}{2x}\right) \quad 9.$$

wobei

$$\omega(v, w, r, x) = \frac{k(x)v}{p(x)w} + n \quad 10.$$

[0039] Der ortsabhängige Koeffizient $p \geq 0$ beschreibt die Wechselwirkung zwischen der thermischen Ausbreitung und der sie mitführenden Fluidströmung. Diese Wirkung verschwindet für $p \rightarrow 0$. Aus (9) wird zusammen mit (5) und (10) zunächst:

$$u(v, a, x, r) = \left[\sqrt{(kv)^c + \left(\frac{Fa}{2x}\right)^2} + \left(\frac{Fa}{2x}\right) \right] \cdot \omega^{-1} = \frac{\sqrt{(kv)^c + \left(\frac{Fa}{2x}\right)^2} + \left(\frac{Fa}{2x}\right)}{\frac{xkv}{Fap} + n} = \frac{\sqrt{(kv)^c + \left(\frac{w}{2}\right)^2} + \frac{w}{2}}{\frac{kv}{pw} + n} \quad 11.$$

[0040] Darin ist $n \approx 1$, was insbesondere bedeutet, dass $0,9 \leq n \leq 1,1$ gilt. Es gilt zudem $1 \leq p \leq 100$, insbesondere $1 \leq p \leq 10$.

[0041] Vorzugsweise soll der Achsenabschnitt von (10) $n = 1$ sein, und für den Exponent von (9) gelte $c = 2$. Derart vereinfacht bleibt schließlich:

$$u(v, a, x, r) = \frac{\sqrt{(kv)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} + \frac{w}{2}}{\frac{kv}{pw} + 1}. \quad 12.$$

[0042] Das Verhalten der inversen Kennlinie des Sensors in der allgemeinen Form (11) wird wiederum für die oben betrachteten zwei Grenzfälle untersucht. Man findet die folgenden Situationen:

(1) Für hinreichend geringe örtliche Strömungsgeschwindigkeit, $kv \rightarrow 0$, geht u , wie erwartet, auf die rein thermische Ausbreitungsgeschwindigkeit zurück:

$$u(a, x) = \frac{x}{t_{max}} = w \equiv \frac{Fa}{x}. \quad 13.$$

(2) Für sehr große Geschwindigkeiten, $kv \rightarrow \infty$, folgt:

$$u = (kv)^{\left(\frac{c}{2} - 1\right)}. \quad 14.$$

[0043] Für den Fall $c = 2$ in (14) gilt entsprechend mit (11) $u = \text{const}$. Das bedeutet, dass die Fluidströmung an der Wand des Sensorkanals mit zunehmender Geschwindigkeit einem Sättigungswert zustrebt.

(3) Ein weiterer Sonderfall liegt mit $w \rightarrow 0$ vor, wenn also die thermische Ausbreitung verschwindet. Dann erhält man mit:

$$u = 0. \quad 15.$$

[0044] Technisch bedeutet diese Lösung, dass z. B. der Sensor nicht aktiviert ist, oder der Strömungskanal evakuiert wurde.

[0045] Für einen geeignet vorgegebenen Exponenten c , lässt sich die Gleichung (11) explizit nach der Messgröße des Sensors, der Geschwindigkeit v , auflösen. Für den einfachen Fall $c = 2$ erhält man als Arbeitsgleichung:

$$v = \frac{pw}{2k(u^2 - (pw)^2)} \left[uw - 2u^2 + \sqrt{(uw)^2 - 4(pw)^2 uw + 4u^2(pw)^2} \right]. \quad 16.$$

[0046] Dieses Ergebnis enthält noch die Koeffizienten k , p , F und a . Das Produkt $Fa(x)$ für das Thermometer am Ort x ist gemäß (5), $Fa = x^2/t_{\max}$, bei ruhendem Fluid zu messen. Zur zusätzlichen individuellen Bestimmung von F verwendet man hierbei Fluide mit unterschiedlichen, bekannten Temperaturleitfähigkeiten a_i . $F = x^2/(a_i \cdot t_{\max(i)})$. Die beiden anderen Parameter werden für das jeweilige Fluid aus der inversen Kennlinie, $u = u(v, w)$, des Sensors ermittelt. Hierbei kann man beispielsweise entsprechende Kurvenanpassungen (z. B. nach dem Levenberg-Marquard-Algorithmus) vornehmen oder die Parameter analytisch bestimmen gemäß:

$$p = \frac{2u \cdot kv}{w(w - 2u + \sqrt{4(kv)^2 + w^2})} \quad 17.$$

$$k = \frac{pw}{2v(u^2 - (pw)^2)} \left(uw - 2u^2 + \sqrt{(uw)^2 - 4(pw)^2 uw + 4u^2(pw)^2} \right) \quad 18.$$

[0047] In der Praxis lässt sich die Gleichung (12) auch noch in einer weiter vereinfachten Form als Arbeitsgleichung verwenden: Für kleine Werte von k (Messung in der Nähe der Kanalwand: $k < 0,3$) wird (12) zunächst in eine Taylor-Reihe entwickelt:

$$u = w - kv \frac{1}{p} + \frac{(kv)^2}{w} \left(1 + \frac{1}{p^2} \right) - \frac{(kv)^3}{w^2} \frac{1}{p} \left(1 + \frac{1}{p^2} \right) \pm \dots \quad 19.$$

[0048] Dieser Ausdruck kann dann mit hinreichender Genauigkeit (Unsicherheit $< 1\%$) stückweise durch die beiden Funktionen:

$$u_1 = w = kv \quad \text{für } 0 \leq v \leq v_s \quad \text{und} \quad 20.$$

$$u_2 = -kv \frac{1}{p} + \frac{(kv)^2}{w} \left(1 + \frac{1}{p^2} \right) - \frac{(kv)^3}{w^2} \frac{1}{p} \left(1 + \frac{1}{p^2} \right) \pm \dots \approx kv^b + N \quad \text{für } v_s \leq v \leq v_L.$$

ersetzt werden. Hierin sind

$$v_s = \left(\frac{w - N}{k} \right)^{1/b} \quad \text{und} \quad v_L \leq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad 21.$$

[0049] Für den Exponenten gilt:

$$0 < b \leq 1 \quad 22.$$

[0050] Die Zahlenwerte von b und k sind praktischerweise durch eine doppeltlogarithmische Auftragung der Sensor-Kennlinie aus dem zugehörigen (quasi-)linearen Fit zu ermitteln:

$$\log(u_2) = b(\log(v) + \log(k)) \quad 23.$$

[0051] Vorzugsweise wird ein Gas-Sensor für die oben beschriebenen Messverfahren mit mehreren Thermometern in unterschiedlichen Abständen (z. B. 100 μm , 150 μm , 200 μm , 300 μm , 500 μm) von der Wärmequelle ausgerüstet sein. Auf diese Weise erhält man bei jeder Messung statt eines Einzelwertes gleich einen Satz zusammenhängender Daten, mit dessen Hilfe die Messunsicherheit verringert werden kann.

[0052] Die Parameter von (11), c, k, p, F und a sind im Allgemeinen abhängig von der Art des strömenden Fluids. Das Produkt Fa lässt sich, wie bereits erwähnt, im jeweils ruhenden Fluid (z. B. mit Hilfe einer Fritte) bestimmen. Die anderen drei Parameter müssen kalibriert werden.

[0053] Wenn der Sensor die Strömungsgeschwindigkeit verschiedener Gase und Gasgemische unterbrechungsfrei messen soll, dann muss er zunächst für diese Fluide jeweils individuell kalibriert werden. Die hierbei anfallenden Parameter werden für jedes Fluid gesondert zusammen mit dessen Werten für die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit gruppenweise gespeichert, um so für die Auswertung einer Strömungsmessung zur Verfügung zu stehen. Im Betrieb wird der Sensor in regelmäßigen Zeitabständen (z. B. vor jeder Strömungsmessung) eine Gasanalyse durchführen. Hierzu misst er die Wärmeleitfähigkeit (Patent DE 10 2012 020 147 B3) und die Temperaturleitfähigkeit (s. o. und/oder Patent: DE 10 2012 020 147 B3) des aktuellen Mediums. Nach Maßgabe dieser beiden charakteristischen Daten werden vom Auswerteprogramm die jeweils benötigten Kalibrierdaten ausgewählt und aus dem Speicher geladen.

[0054] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

[0055] Fig. 1 einen schematischen Querschnitt durch ein erfindungsgemäßes Durchflussmessgerät zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens und

[0056] Fig. 2 ein Messelement, auf dem das Thermometer und das Heizsegment angeordnet sind.

[0057] Fig. 1 zeigt ein schematisch ein Durchflussmessgerät **10**, das eine Durchleitung **12** zum Durchleiten eines Fluids **14**, im vorliegenden Fall in Form eines Gases, aufweist. In der Durchleitung **12** ist ein Messelement **16** angeordnet, mittels dem eine Durchflussgeschwindigkeit v gemessen werden kann, mit dem das Fluid **14** durch die Durchleitung **12** strömt.

[0058] In der vorliegenden Ausführungsform weist das Durchflussmessgerät **10** eine Abzweigableitung **18** auf, die jedoch nur eine bevorzugte Ausführungsform darstellt und nicht notwendig ist. Durch die Abzweigleitung **18** wird ein Teilstrom des Fluids **14** zu einem Sensor **20** geleitet, mittels dem die Temperaturleitfähigkeit a und/oder die Wärmeleitfähigkeit λ gemessen werden kann. Beispielsweise umfasst der Sensor **20** eine Fritte **22**, mittels der die Geschwindigkeit des Fluids **14** so weit verringert wird, dass sie als in guter Näherung null angesehen werden kann. Alternativ und gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Messelement **30** wie in Fig. 2 gezeigt aufgebaut. Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit a und/oder die Wärmeleitfähigkeit λ bei Verwendung einer Fritte ist in der DE 10 2011 121 213 beschrieben.

[0059] Fig. 2 zeigt eine schematische dreidimensionale Ansicht des Messelements **16**. Zu erkennen ist ein Heizelement **24**, das über eine nicht eingezeichnete Kontaktierung elektrisch mit einer Auswerteeinheit **26** verbunden ist. Die Auswerteeinheit **26**, die auch als Ansteuer- und Auswerteeinheit bezeichnet werden könnte, ist ausgebildet zum automatischen Bestromen des Heizelements **24**, sodass dieses einen Wärmeimpuls abgibt. Das Heizelement **24** überspannt einen Kanal **28**, der in ein Substrat **30** des Messelements **16** eingezt ist.

[0060] Das Heizelement **24** hat einen Abstand d von einer Wand **32** der Durchleitung **12**, die im vorliegenden Fall durch den Kanalgrund des Kanals **28** abgebildet ist. Dieser Abstand d bestimmt sich zu dem Teil der Durchleitung, der einen Teil der Kraft aufnimmt, die vom Fluid **14** auf die Durchleitung nach außen wirkend aufgebracht wird. In anderen Worten ist der Abstand d derjenige Abstand, mit dem sich die lokale Durchflussgeschwindigkeit v ändert. Ändert sich d , so ändert sich folglich linear damit eine radiale Koordinate r , die von einem Mittelpunkt und in der Regel einer Längsachse L der Durchleitung **12** aus gemessen wird (vgl. Fig. 1). Die lokale Durchflussgeschwindigkeit $v = v(r)$ ändert sich mit Änderung dieser radialen Koordinate r und damit mit dem Abstand d .

[0061] Das Messelement **16** weist zudem ein erstes Thermometer **34** und ein zweites Thermometer **36** auf. In der vorliegenden Ausführungsform überspannen beide Thermometer den Kanal **28**. Sie sind mit der Auswerteeinheit **26** verbunden, die ausgebildet ist zum stromfreien Messen eines jeweiligen elektrischen Widerstands R_{34} , R_{36} der Thermometer **34**, **36**. So kann aus den elektrischen Widerständen R_{34} , R_{36} auf die Temperatur der der Thermometer **34**, **36** geschlossen werden. Das erste Thermometer **34** ist im Abstand $x_{th} = x_{34}$ vom H Heizelement **24** angeordnet, das zweite Thermometer **36** im Abstand $(x_{th} =) x_{34}$. Der Abstand x_{th} ist derjenige Abstand, der in die oben angegebenen Formeln einzusetzen ist.

[0062] Die Auswerteeinheit **26** ist ausgebildet zum impulsförmigen Bestromen des Heizelements **24**, sodass dieses eine Enthalpie $H = UI$ abgibt, wobei U die am Heizelement **24** anliegende Spannung, I den fließenden

Strom und t die Zeit charakterisiert, über die der Stromimpuls anliegt. Vorzugsweise ist die Zeit t kleiner als 100 Millisekunden, vorzugsweise kleiner als 1 Millisekunde, insbesondere kleiner als 0,5 Millisekunden. Das Temperaturfeld um eine instantan angeregte punktförmige oder linienförmige Wärmequelle innerhalb eines Fluids, der Wärmeleitfähigkeit λ , der Temperaturleitfähigkeit a und der volumetrischen spezifischen Wärmekapazität ρc_p ist in der DE 10 2014 010 939 beschrieben. In der Auswerteeinheit **26** sind Werte für die Parameter k und F gespeichert, die in Kalibrierversuchen ermittelt wurden. Gespeichert ist zudem ein Abstand x des Thermometers **34** von dem Heizelement **24**.

[0063] Die Auswerteeinheit **26** ist ausgebildet zum Berechnen der Durchflussgeschwindigkeit v anhand einer Gleichung, die die Verringerung der Durchflussgeschwindigkeit v in einer Umgebung des Thermometers **34** und gegebenenfalls des zweiten Thermometers **36** einbezieht.

[0064] Das Messelement **16** ist beispielsweise dadurch hergestellt, dass aus einem Substrat **30** aus einem Halbleiter, beispielsweise Silizium, der Kanal **28** so herausgeätzt wird, dass das Heizelement **24** sowie die Thermometer **34**, **36** bestehen bleiben. Danach wird eine elektrische Kontaktierung zu diesen Elementen hinzugefügt, beispielsweise durch Aufbringen von metallischen Leiterbahnen.

[0065] Ein erster Abstand x_{34} zwischen dem ersten Thermometer **34** und dem Heizelement **24** beträgt vorzugsweise zumindest 40 μm , insbesondere 50 μm , und 600 μm , insbesondere 500 μm . Ein zweiter Abstand x_{36} zwischen dem zweiten Thermometer **36** und dem Heizelement **24** beträgt vorzugsweise ebenfalls zumindest 40 μm , insbesondere 50 μm , und 600 μm , insbesondere 500 μm . Die Auswerteeinheit **26** ist eingerichtet zum Bestromen des Heizelements **24** mit einer Pulsdauer t .

Bezugszeichenliste

10	Durchflussmessgerät
12	Durchleitung
14	Fluid
16	Messelement
18	Abzweigung
20	Sensor
22	Fritte
24	Heizelement
26	Auswerteeinheit
28	Kanal
30	Substrat
32	Wand/Kanalgrund
34	erstes Thermometer
36	zweites Thermometer
a	Temperaturleitfähigkeit
d	Abstand
r	radiale Koordinate,
v	Durchflussgeschwindigkeit

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen eines Durchflussparameters (v) eines Fluids (**14**), mit den Schritten:
 - (a) Leiten des Fluids (**14**) durch eine Durchleitung (**12**),
 - (b) impulsförmiges Erwärmen des Fluids (**14**) mittels eines Heizelements (**24**),
 - (c) Messen einer zeitabhängigen Temperatur (T) mittels eines Thermometers (**34**), das in einem Thermometerabstand (x_{Th}) vom Heizelement (**24**) angeordnet ist,
 - (d) Ermitteln einer Maximaltemperatur-Zeit (t_{max}) in Form der Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt des impulsförmigen Erwärmens und dem Zeitpunkt eines Temperaturmaximums im Thermometerabstand (x_{Th}), und
 - (e) Berechnen des Durchflussparameters (v) aus der Maximaltemperatur-Zeit (t_{max}),
dadurch gekennzeichnet, dass
 der Durchflussparameter (v) aus der Maximaltemperatur-Zeit (t_{max}) berechnet wird anhand der Gleichung

$$\frac{x_{Th}}{t_{max}} = \frac{\sqrt{(kv)^c + \left(\frac{F a}{2 x_{Th}}\right)^2} + \left(\frac{F a}{2 x_{Th}}\right)}{\frac{x_{Th} kv}{Fap} + n}, \text{ mit}$$

k einem Parameter, der von der Geometrie der Durchleitung und der Position des Thermometers abhängt,
F einem Formfaktor ($4 \leq F \leq 6$), der umso größer ist, je besser das Heizelement als Punktquelle genähert werden kann,

a Temperaturleitfähigkeit des Fluids,

c einem Exponenten mit $1,9 \leq c \leq 4$,

p einem Parameter mit $1 \leq p \leq 100$, der die Wechselwirkung zwischen der thermischen Ausbreitung und der sie mitführenden Fluidströmung beschreibt,

n einem Parameter mit $n \approx 1$.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Durchflussparameter (v) aus der Maximaltemperatur-Zeit (t_{max}) berechnet wird und $n = 1$ und $c = 2$ gelten.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Durchflussparameter (v) ermittelt wird anhand der Gleichung

$$v = \frac{p \frac{Fa}{x_{Th}}}{2k \left(\left(\frac{x_{Th}}{t_{max}} \right)^2 - \left(p \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2 \right)} \left[\frac{x_{Th} Fa}{t_{max} x_{Th}} - 2 \left(\frac{x_{Th}}{t_{max}} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{x_{Th} Fa}{t_{max} x_{Th}} \right)^2 - 4 \left(p \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2 \frac{x_{Th} Fa}{t_{max} x_{Th}} + 4 \left(\frac{x_{Th}}{t_{max}} \right)^2 \left(p \frac{Fa}{x_{Th}} \right)^2} \right]$$

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Schritte:

(a) Messen des Produkts (Fa) aus Temperaturleitfähigkeit (a) des Fluids und dem Formfaktor (F) an dem Fluid und

(b) Berechnen des Durchflussparameters (v) anhand des so gemessenen Produkts (Fa).

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Schritte:

– Messen der Temperaturleitfähigkeit (a) und/oder der Wärmeleitfähigkeit (λ) des Fluids,

– Auslesen von Kalibrierdaten (k, F, a, c, P, n), die der Temperaturleitfähigkeit (a) und/oder der Wärmeleitfähigkeit (λ) zugeordnet sind, aus einem digitalen Speicher und

– Berechnen des Durchflussparameters (v) aus den Kalibrierdaten.

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche gekennzeichnet durch die Schritte:

– Messen einer zweiten zeitabhängigen Temperatur an einem zweiten Messort,

– Ermitteln einer zweiten Maximaltemperatur-Zeit ($t_{max,2}$), zu der das Temperaturmaximum den zweiten Messort passiert hat, und

– Berechnen des Durchflussparameters (v) aus den Maximaltemperatur-Zeiten ($t_{max}, t_{max,2}$).

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Temperatur in einem Abstand (d) von einer Wand der Durchleitung (**12**) gemessen wird, der kleiner ist als 1 Millimeter.

8. Durchflussmessgerät zum Messen eines Durchflussparameters eines Fluids (**14**), mit

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

(ii) einem Heizelement (**24**) zum impulsförmigen Erwärmen des Fluids (**14**),

(iii) einem Thermometer (**34**), das an einem Messort angeordnet ist, zum Messen einer zeitabhängigen Temperatur des Fluids (**14**) und

(iv) einer elektrischen Auswerteeinheit,

dadurch gekennzeichnet, dass

(v) die Auswerteeinheit ausgebildet ist zum automatischen Berechnen des Durchflussparameters (v) anhand einer Gleichung nach einem der Ansprüche 1 bis 7.

9. Durchflussmessgerät nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Thermometer (34) in einem Abstand (d) von einer Wand der Durchleitung (12) angeordnet ist, der kleiner ist als 1 Millimeter.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

