



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 020 471 B4 2009.12.24**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 020 471.4**

(22) Anmeldetag: **23.04.2008**

(43) Offenlegungstag: **19.11.2009**

(45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **24.12.2009**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 25/18 (2006.01)**

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

(73) Patentinhaber:

**Bundesrepublik Deutschland, vertr.d.d.
 Bundesministerium für Wirtschaft und
 Technologie, d.vertr.d.d. Präsidenten der
 Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
 Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:

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

(72) Erfinder:

Meier, Vladislav, 30455 Hannover, DE

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

DE	102 06 045	A1
DE	23 63 122	A
EP	16 98 890	A1
EP	01 44 443	B1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße einer Probe**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße einer Probe (16), mit den Schritten
 (a) Beaufschlagen der Probe (16) mit einer zeitlich konstanten Heizleistung (q) in einer linearen Wärmeeinleitstelle (18),

(b) Erfassen einer zeitabhängigen Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen

(i) einer ersten Temperaturmessstelle (20) in einem ersten Abstand (D_1) zur Wärmeeinleitstelle (18) und

(ii) einer zweiten Temperaturmessstelle (22) in einem zweiten Abstand (D_2) zur Wärmeeinleitstelle (18) zu mehreren Zeitpunkten (t_i),

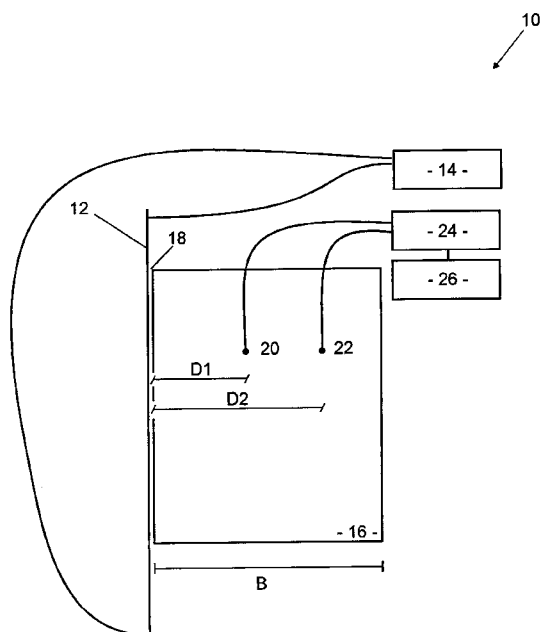
dadurch gekennzeichnet, dass

(c) das Erfassen der zeitabhängigen Temperaturdifferenz (ΔT) in logarithmisch äquidistanten Zeitabständen erfolgt oder das Erfassen in nicht logarithmisch äquidistanten Zeitabständen erfolgt und aus den so erhaltenen Messwerten die Temperaturdifferenzen interpoliert werden und
 (d) das Verfahren die Schritte

– Ermitteln einer maximalen Steigung ($\Delta\Delta T_{\max}$) der zeitabhängigen Temperaturdifferenz ($\Delta T(\ln t)$) in Abhängigkeit von einer logarithmierten Zeitkoordinate ($\ln t$) und
 – Berechnen der Wärmeleitfähigkeit (λ) aus der maximalen Steigung ($\Delta\Delta T_{\max}$).

und/oder

– Ermitteln eines...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße einer Probe, mit den Schritten (a) Beaufschlagen der Probe mit einer zeitlich konstanten Heizleistung in einer linearen Wärmeleitstelle, (b) Erfassen einer zeitabhängigen Temperaturdifferenz zwischen einer ersten Temperaturmessstelle in einem ersten Abstand zur Wärmeleitstelle und einer zweiten Temperaturmessstelle in einem zweiten Abstand zur Wärmeleitstelle zu mehreren Zeitpunkten.

[0002] Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung eine Thermotransportgrößenmessvorrichtung zum Messen einer thermischen Transportgröße einer Probe, mit (a) einer Heizvorrichtung zum Beaufschlagen der Probe mit einer zeitlich konstanten Heizleistung in einer linearen Wärmeleitstelle, (b) einem ersten Temperaturmesser, der in einem ersten Abstand zur Wärmeleitstelle angeordnet ist, und (c) einem zweiten Temperaturmesser, der in einem zweiten Abstand zur Wärmeleitstelle angeordnet ist.

[0003] Um Transportgrößen, beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit oder die Temperaturleitfähigkeit zu messen, ist eine Vielzahl von Messverfahren bekannt. Die bekannten Messverfahren sind zur Bestimmung nur einer der thermischen Transportgrößen ausgelegt. Soll die Wärmeleitfähigkeit gemessen werden, so wird beispielsweise das Heizdrahtverfahren eingesetzt. Nachteilig hieran ist, dass Randbedingungen der Messvorrichtung sowohl innere als auch äußere, einen großen Einfluss auf die zu erreichende Messgenauigkeit haben. Die Randbedingungen sind jedoch schwer zu kontrollieren, sodass die Messunsicherheit nicht abzuschätzen ist. Bei der Temperaturleitfähigkeitsmessung wird beispielsweise das Laser Flash Verfahren eingesetzt, bei dem der Geräteaufwand beträchtlich ist. Nachteilig ist zudem, dass die thermische Belastung durch den Laserpuls auf der Probenoberfläche zu hoch ist.

[0004] Aus der DE 102 06 045 A1 ist ein quasistationäres Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit bekannt. Quasistationäre Verfahren haben den Nachteil einer langen Messzeit.

[0005] Aus der EP 0 144 443 ist ein Verfahren zum Messen der Koagulation von Milch bekannt. Bei diesem Verfahren ändert sich der Wärmeeintrag eines Heizdrahts in die Milch in Abhängigkeit davon, ob die Milch koaguliert ist oder nicht. Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass es einen Phasenübergang des zu untersuchenden Materials voraussetzt und damit nicht für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit oder der Temperaturleitfähigkeit geeignet ist.

[0006] Aus der EP 1 698 890 A1 ist ein Verfahren zum Charakterisieren einer Lagerstätte für Kohlenwasserstoffe bekannt. Bei diesem Verfahren wird die zeitliche Veränderung der Temperatur in der Lagerstätte gemessen und daraus auf Eigenschaften der Lagerstätte geschlossen. Dies Verfahren eignet sich nicht zum Vermessen von kleinen Probewerkstücken.

[0007] Aus der DE 2 363 122 ist ein Verfahren zur Messung des Wärmeübertragungs-Koeffizienten bekannt, bei dem die Wärmeleitfähigkeit des zu vermessenden Probewerkstücks in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Sensors berechnet wird. Nachteilig hieran ist, dass die Wärmeleitfähigkeit des Sensors selbst fehlerbehaftet ist, so dass ein systematischer Messfehler entsteht.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße anzugeben, das eine erhöhte Genauigkeit besitzt.

[0009] Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1.

[0010] Mit einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch eine gattungsgemäße Thermotransportgrößenerfassungsvorrichtung, die eine elektrische Steuerung aufweist, die eingerichtet ist zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0011] Der Vorteil bei dem Verfahren ist, dass nur geringe Anforderungen an die verwendete Probe bestehen. Das ist besonders dann vorteilhaft, wenn eine Messung der thermischen Transportgröße an einem bestehenden Objekt durchgeführt werden soll, das nicht zerstört werden soll.

[0012] Vorteilhaft ist zudem, dass einfache Mess- und Auswertevorrichtungen verwendet werden können, ohne dass die Genauigkeit der ermittelten thermischen Transportgröße nachteilig beeinflusst wird. Vorteilhaft sind zudem die hohe Messgenauigkeit, die geringe Messzeit und die geringen Kosten. Die zeitabhängige Temperaturdifferenzsteigerung hat zudem einen charakteristischen Verlauf, der von der Randbedingung gering be-

einflusst ist. Bestehende Einflüsse sind gut erkennbar. Das trägt zu einer hohen Messgenauigkeit bei, die auch mit weniger genau messenden Messgeräten erreicht wird.

[0013] Es ist ein weiterer Vorteil, dass eine kleine Anzahl an Messwerten von beispielsweise weniger als 500, insbesondere weniger als 100, ausreichend ist, um eine einfache und schnelle Auswertung zu ermöglichen. Die Auswertung kann zudem während der Messung der zeitabhängigen Temperaturdifferenz ohne signifikanten rechnerischen Aufwand durchgeführt werden. Das Verfahren ist zudem schnell durchführbar, so dass es sich auch für Anwendungen eignet, bei denen nur wenig Messzeit zur Verfügung steht. Dank dem gattungsgemäßen Verfahren ist es möglich, die Auswertung einfach in Echtzeit während der Messung durchzuführen, wobei wenig aufwändige Elektronik benötigt wird. Die erfindungsgemäße Thermotransportgrößenmessvorrichtung ist daher kostengünstig herstellbar und anwendbar.

[0014] Gegenüber einem Pulsverfahren, bei dem ein kurzfristiger Wärmepuls in die Probe abgegeben wird, ist vorteilhaft, dass die Probe einer geringeren Maximaltemperatur ausgesetzt ist, was die Probe schont. Es werden außerdem störende Wirkungen von Kontaktschichten und der Wärmekapazität des Heizdrahts verringert.

[0015] Unter dem Merkmal, dass das Erfassen der zeitabhängigen Temperaturdifferenz in logarithmisch äquidistanten Zeitabständen erfolgt, ist insbesondere zu verstehen, dass die Temperaturdifferenzen in logarithmisch äquidistanten Zeitabständen gemessen werden. Es ist aber auch möglich, dass die Temperaturdifferenzen nicht in logarithmisch äquidistanten Zeitabständen gemessen werden und in einem nachfolgenden Schritt aus den so erhaltenen Messwerten die Temperaturdifferenzen interpoliert werden.

[0016] Unter dem Merkmal, dass die Zeitpunkte in logarithmisch gleichen Zeitabständen liegen, ist insbesondere zu verstehen, dass ein Quotient aus einem ersten Zeitpunkt, zu dem die Temperaturdifferenz gemessen wird, und einem auf den ersten Zeitpunkt folgenden zweiten Zeitpunkt, zu dem die Temperaturdifferenz gemessen wird, konstant ist, was eine geometrische Reihenfolge der Messzeiten ergibt.

[0017] Das Beaufschlagen der Probe mit einer zeitlich konstanten Heizleistung kann beispielsweise durch einen Heizdraht oder einen Heizstreifen erfolgen. Es handelt sich dann um ein Heizdrahtverfahren, in seiner Voll- oder Halbraum-Ausführung.

[0018] Gemäß einer Ausführungsform ist die thermische Transportgröße eine Wärmeleitfähigkeit und das Verfahren umfasst die Schritte eines Ermitteln einer maximalen Steigung der zeitabhängigen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von einer logarithmierten Zeitkoordinate und eines Berechnens der Wärmeleitfähigkeit aus der maximalen Steigung.

[0019] Alternativ oder additiv ist die thermische Transportgröße eine Temperaturleitfähigkeit und das Verfahren umfasst die Schritte eines Ermitteln eines Maximalsteigungs-Zeitpunkts, zu dem die maximale Steigung der zeitabhängigen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der logarithmierten Zeitkoordinate vorliegt, und eines Berechnens der Temperaturleitfähigkeit aus dem Maximalsteigungs-Zeitpunkt.

[0020] Eine besonders hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der thermischen Transportgröße wird erhalten, wenn der Steigungsverlauf der zeitabhängigen Temperaturdifferenz einer analytisch beschreibbaren Fit-Kurve angepasst wird. Die Fit-Kurve, die eine Lösung der Wärmeleitgleichung ist, hat vorzugsweise nur zwei Anpassungsparameter, nämlich die zu messende Wärmeleitfähigkeit und die zu messende Temperaturleitfähigkeit.

[0021] Eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit wird erreicht, wenn der zweite Abstand höchstens die Hälfte, insbesondere höchstens ein Drittel, einer Probenbreite der Probe und eine Länge der Wärmequelle beträgt. Auf diese Weise werden äußere Randeffekte unterdrückt.

[0022] Ein weiterer Vorteil für das Messverfahren gegenüber dem bekannten Heizdrahtverfahren ist die entfallende Notwendigkeit für Vorkenntnis der Temperaturleitfähigkeit der Probe, um die richtige Messdauer einzustellen. Dies ermöglicht die Realisierung des vollautomatischen Messgerätes, was Personalkosten spart.

[0023] Die Messung dauert bevorzugt so lange, bis die Steigung der aufgenommenen Temperaturdifferenz nach einem Passieren des Maximums hinreichend abgefallen ist. Für die Maximumbestimmung reicht es, wenn die Steigungsabweichung mehr als das 2–3 fache einer Messfehlergröße beträgt. Die Messfehlergröße wird aus den bereits gemessenen Messwerten errechnet. Für die höhere Genauigkeit der beiden Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit bei der Auswertung mittels Anpassungsmethode ist

eine längere Messzeit notwendig. Es kann so lange gemessen werden, bis äußere Randeffekte beträchtlich auftreten.

[0024] Aus praktisch realisierbaren Messvorrichtungsverhältnissen der Probengröße und Wärmequellelänge zum Abstand D_2 (zweimal bis fünfmal größer als D_2 oder höher), kann die Messung bei dem Abfall auf das 0,8-fache der maximalen Steigung der Messung unterbrochen werden. Bei einem größeren Verhältnis der Probengröße zum Abstand D_2 ist bis insbesondere so lange zu messen, bis die Steigung auf unter das 0,6-fache oder sogar auf unter das 0,4-fache gesunken ist, was die Genauigkeit verbessert.

[0025] Bevorzugt umfasst das Verfahren zudem die Schritte (a) eines Errechnens eines Parameters, der die Abweichung der Messwerte von einer analytischen Lösung, der Wärmeleitungsgleichung beschreibt, und (b) eines Ausgebens eines anhand des Parameters berechneten Messfehlerwerts, der den Messfehler des durchgeführten Verfahrens charakterisiert.

[0026] Bevorzugt werden mehr als zwei zeitabhängige Temperaturdifferenzen zwischen drei, vier oder mehr Temperaturmessstellen erfasst, wobei die Temperaturmessstellen jeweils paarweise verschiedene Abstände zur Wärmeeinleitstelle haben. Diese mehrfache Anordnung ermöglicht die Messungen in inhomogenen Stoffen.

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

[0028] Fig. 1 ein Schema einer erfindungsgemäßen Thermotransportgrößenmessvorrichtung,

[0029] Fig. 2 ein Flussdiagramm einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens und

[0030] Fig. 3 ein Diagramm, in dem die einheitslose Steigung der zeitabhängigen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von der logarithmierten einheitslosen Zeitkoordinate aufgetragen ist.

[0031] Fig. 1 zeigt eine Thermotransportgrößenmessvorrichtung **10** mit einer Heizvorrichtung **12** in Form eines Heizdrahts, der mit einer geregelten Stromquelle **14** verbunden ist. Die Stromquelle **14** ist ausgebildet, um an die Heizvorrichtung **12** eine solche elektrische Spannung anzulegen, dass die Heizvorrichtung **12** eine zeitlich konstante Heizleistung q abgibt. Beispielsweise gibt die Stromquelle **14** einen konstanten elektrischen Strom I ab, sofern der elektrische Widerstand des Drahtes bei Temperaturänderung hinreichend konstant ist.

[0032] Die Heizvorrichtung **12** steht in Kontakt mit einer Probe **16**, von der eine thermische Transportgröße gemessen werden soll, beispielsweise eine Temperaturleitfähigkeit a oder eine Wärmeleitfähigkeit λ . Dort, wo die Probe **16** mit der Heizvorrichtung **12** Kontakt hat, ist eine Wärmeeinleitstelle **18**, die im vorliegenden Fall eine Linie ist. Die Probe **16** hat eine Probenbreite B , die als Abstand von der Heizvorrichtung **12** gemessen ist. Die Wärmeeinleitstelle ist die Länge L .

[0033] In der Probe **16** ist ein erster Temperaturmesser **20** angeordnet, der eine erste Temperaturmessstelle bildet und einen ersten Abstand D_1 von der Wärmeeinleitstelle **18** hat. In der Probe **16** ist zudem ein zweiter Temperaturmesser **22** angeordnet, der eine zweite Temperaturmessstelle bildet einen zweiten Abstand D_2 von der Wärmeeinleitstelle **18** besitzt. Die Temperaturmesser **20**, **22** sind über elektrische Kabel mit einer elektrischen Auswerteeinheit **24** verbunden. Die Temperatur auf diesen Messstellen kann auch optisch, mit einem Pyrometer oder einer Infrarotkamera, gefasst werden.

[0034] Zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens werden zunächst über eine Eingabevorrichtung **26**, beispielsweise einer Tastatur oder einen Touchscreen, die gewählte Heizleistung q sowie die Abstände D_1 und D_2 eingegeben. Es wird zudem die Messwertanzahl N angegeben, die Zahl der im Laufe der Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens aufzunehmenden Messwerte angibt.

[0035] Sodann wird die Messung gestartet und beide Temperaturmesser **20**, **22** nehmen in kurzen Zeitabständen Temperaturmesswerte $T_1(t_i)$ bzw. $T_2(t_i)$ auf. Dabei ist i eine Laufvariable, für die $i = 1, 2, 3, \dots, N$ gilt. Die Auswerteeinheit **24** berechnet aus der Anzahl der aufzunehmenden Messwerte N und der eingegebenen Messzeit t_{mess} einen Faktor

$$f = N \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{mess}}}{dt}} \quad (1),$$

wobei t_{mess} eine voreingestellte oder erwartete Messdauer ist und dt ein Zeitinkrement ist, das einer Ansprechzeit entspricht, wenn ein analoges Messgerät verwendet wird, und einer Abtastrate entspricht, wenn ein analoges Messgerät verwendet wird.

[0036] Das Zeitinkrement dt bestimmt eine gerätespezifische Zeitvariable. Sollen beispielsweise $N = 11$ Messwerte in der Messzeit $t_{\text{mess}} = 1024$ s aufgenommen werden und ist das Zeitintervall $dt = 1$ s, so ergibt sich

$$f = N \cdot \sqrt[11]{t_{\text{mess}}} = 11 \cdot \sqrt[11]{1024} = 2$$

und es werden Messwerte zu den Zeitpunkten $T_0 = 1$ s, $T_2 = 2$ s, ..., $T_{10} = 1024$ s aufgenommen. Die Messwerte werden danach digitalisiert. Aus den so aufgenommenen Temperaturmesswerten berechnet die Auswerteeinheit **24** eine Temperaturdifferenz

$$\Delta T(t_i) = T_1(t_i) - T_2(t_i) \quad (2).$$

[0037] Im Folgenden wird beschrieben, wie aus den Temperaturdifferenzen $\Delta T(t)$ die thermische Transportgröße berechnet wird. Die exakte Lösung der Wärmeleitungsgleichung für die Temperaturdifferenz $\Delta T(t)$ zwischen den beiden Punkten D_1 und D_2 beträgt

$$\Delta T(t) = K_T \left[\text{Ei} \left(-\frac{D_2^2}{4at} \right) - \text{Ei} \left(-\frac{D_1^2}{4at} \right) \right] \quad \text{mit } K_T = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (3).$$

[0038] Dabei ist Ei die Integralsinusfunktion.

[0039] Für die logarithmierte Zeit $\ln t$ folgt

$$\Delta T(\ln t) = K_T \left[\text{Ei} \left(-\frac{D_2^2}{4a \exp(\ln t)} \right) - \text{Ei} \left(-\frac{D_1^2}{4a \exp(\ln t)} \right) \right] \quad (4).$$

Aus

$$\frac{d}{dt} \text{Ei} \left(-\frac{\alpha}{t} \right) = -\frac{1}{t} \exp \left(-\frac{\alpha}{t} \right) \quad (5)$$

folgt mit Gleichung (4)

$$\begin{aligned} \frac{d}{d \ln t} \Delta T(\ln t) &= K_T \frac{d}{d \ln t} \left[\text{Ei} \left(-\frac{D_2^2}{4a \exp(\ln t)} \right) - \text{Ei} \left(-\frac{D_1^2}{4a \exp(\ln t)} \right) \right] \\ &= K_T \left[\exp \left(-\frac{D_1^2}{4at} \right) - \exp \left(-\frac{D_2^2}{4at} \right) \right] \end{aligned} \quad (6).$$

[0040] Der dimensionslose Teil in Klammern beschreibt das charakteristische Verhalten der Temperaturdifferenzsteigung in logarithmischer Zeit, der in weiteren als m bezeichnet wird

$$\frac{d}{d \ln t} \Delta T(\ln t) =: K_T m(\ln t) \quad (7)$$

und besitzt zu einem Maximalsteigungs-Zeitpunkt m_{max} , für das gilt:

$$m_{\max} = \frac{1}{K} \left\{ \frac{d}{d \ln t} \Delta T(\ln t) \right\} = \exp \left(-\frac{2D1^2 \ln \left(\frac{D2}{D1} \right)}{D2^2 - D1^2} \right) - \exp \left(-\frac{2D2^2 \ln \left(\frac{D2}{D1} \right)}{D2^2 - D1^2} \right) \quad (8).$$

$$= \left(\frac{D1}{D2} \right)^{2 \frac{D1^2}{D2^2 - D1^2}} - \left(\frac{D1}{D2} \right)^{2 \frac{D2^2}{D2^2 - D1^2}}$$

[0041] Die so berechnete einheitslose maximale Steigung ist nur von den Abständen D1 und D2 abhängig.

[0042] Die Messwerte werden in logarithmisch äquidistanten Zeitpunkten t_0, t_1, \dots, t_N aufgenommen, es gilt daher

$$\ln t_{i+1} - \ln t_i = \ln \left(\frac{t_{i+1}}{t_i} \right) = \ln f \quad (9).$$

[0043] Im Maximalsteigungs-Zeitpunkt t_{\max} gilt näherungsweise der Differenzenquotient

$$K_T m_{\max} \approx \frac{\Delta T(\ln t_{\max}) - \Delta T(\ln t_{\max} + \varepsilon)}{\ln t_{i+1} - \ln t_i}$$

$$= \frac{\Delta T(\ln t_{\max}) - \Delta T(\ln t_{\max} + \varepsilon)}{\ln f} \quad (10),$$

$$=: \frac{\Delta \Delta T(\ln t_{\max})}{\ln f}$$

$$= \frac{\Delta \Delta T(t_{\max})}{\ln f}$$

wobei in der letzten Zeile Formel (8) eingesetzt wurde. Einsetzen der Definition von K_T nach Gleichung (3) und Auflösen nach λ liefert

$$\lambda = \frac{q \ln f}{4 \pi \Delta \Delta T(t_{\max})} m_{\max} \quad (11)$$

[0044] Die Temperaturleitfähigkeit a kann man aus der dem Maximalsteigungs-Zeitpunkt t_{\max} berechnen, indem Gleichung (8) für t_{\max} mit Gleichung (6) gleichgesetzt wird

$$a = \frac{D2^2 - D1^2}{8 t_{\max} \ln \left(\frac{D2}{D1} \right)} \quad (12).$$

[0045] Die Auswerteeinheit **24** erfasst die Temperaturdifferenz $\Delta T(t_i)$ zu den vorgegebenen Zeitpunkten t_i und ermittelt daraus beispielsweise numerisch anhand des Differenzquotienten die Temperaturdifferenzsteigung

$$\frac{\Delta \Delta T}{\ln f}$$

und ihren maximalen Wert

$$\frac{\Delta \Delta T(t_{\max})}{\ln f}$$

mit der entsprechenden Zeit t_{\max} .

[0046] Mit Hilfe von Gleichung (11) wird dann die Wärmeleitfähigkeit λ berechnet und auf einer nicht eingezeichneten Anzeigevorrichtung ausgegeben. Alternativ oder additiv wird mit Hilfe von Gleichung (12) die Tem-

peraturleitfähigkeit a berechnet und ausgegeben. Die Berechnung der gemessenen Wärmetransportgrößen λ und α kann dadurch mit einer größeren Genauigkeit durchgeführt werden, dass in einer Umgebung der maximalen Temperaturdifferenzsteigung

$$\frac{\Delta\Delta T(t_{\max})}{\text{Inf}}$$

und ihres fallenden Teils mit der Funktion nach (Gleichung 6) angepasst werden, die analytische Lösung für die gegebene Messvorrichtung darstellt und enthält als Anpassungsparameter die gemessenen Transportgrößen enthält.

[0047] Fig. 2 zeigt ein Flussdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens, das sich mit digitalen Geräten realisieren lässt. In einem Schritt **1** werden die Anfangswerte bestimmt, wobei dt die Zeitinkrement (Ansprechzeit für analoge und Abtastzeit für digitale Geräte ist). Das Zeitinkrement liegt in der Regel zwischen 1 ms und 1 s.

[0048] In einem Schritt **2** erfolgt eine Berechnung der Anzahl der Messungen n_i für den i -ten Temperaturdifferenzmesswert für die Ermittlung des Mittelwerts in Form einer Signalglättung mit logarithmischem Fenster.

[0049] In einem Schritt **3** liefern die Temperaturmesser **20**, **22** zeitlich äquidistante Messwerte, beispielsweise im Abstand von 5 ms. Daraus werden die logarithmisch äquidistanten Temperaturdifferenzmesswerte ΔT ermittelt, indem ein gleitender Mittelwert über n_i Messwerte gebildet wird.

[0050] In einem Schritt **4** wird aus der im Schritt **3** ermittelten Temperaturdifferenz ΔT_i die Steigung $\Delta\Delta T(t_i)$ zum Zeitpunkt t_i berechnet. In Schritt **5** wird die Zeit t_i als geometrischer Mittelwert aus den Anfangs- und Endzeiten des gegenwärtigen logarithmischen Zeitintervalls berechnet.

[0051] In Schritt **6** wird die maximale Steigung m_{\max} und der Maximalsteigungs-Zeitpunkt t_{\max} bestimmt. Wenn eine Abbruchbedingung **7** erfüllt ist, erfolgt eine Ausgabe der Ergebnisse, nämlich der Wärmeleitfähigkeit λ und der Temperaturleitfähigkeit a .

[0052] In Schritt **7** sind zwei alternative Abbruchbedingungen gezeigt. Die Messung wird beendet, wenn entweder die voreingestellte Messzeit erreicht ist. Alternativ kann die Messung beendet werden, wenn der zuletzt gemessene Wert für die Steigung m kleiner als 0,8 des bisherigen Maximalwerts.

[0053] In Fig. 3 ist die einheitslose Steigung m (einheitenlos) für verschiedene Quotienten $D2/D1$ gegen die logarithmisch dargestellte einheitslose Zeitkoordinate

$$r^2 = \frac{4at}{D1^2}$$

aufgetragen.

Bezugszeichenliste

10	Thermotransportgrößenmessvorrichtung
12	Heizvorrichtung
14	Stromquelle
16	Probe
18	Wärmeeinleitstelle
20	Temperaturmesser
22	Temperaturmesser
24	Auswerteeinheit
26	Eingabevorrichtung
N	Anzahl der Messwerte
D1	erster Abstand
D2	zweiter Abstand
B	Probenbreite
L	Länge der Wärmeeinleitstelle
q	Heizleistung
a	Temperaturleitfähigkeit

λ	Wärmeleitfähigkeit
t	Zeit
t_{mess}	Messzeit
dt	Ansprechzeit oder Tastrate
i	Zählindex 1, 2 ...
$T1$	Temperatur
$T2$	Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz
$\Delta\Delta T$	Steigung der Temperaturdifferenz
f	Faktor

Patentansprüche

- Verfahren zum Messen einer thermischen Transportgröße einer Probe (**16**), mit den Schritten
 - Beaufschlagen der Probe (**16**) mit einer zeitlich konstanten Heizleistung (q) in einer linearen Wärmeeinleitstelle (**18**),
 - Erfassen einer zeitabhängigen Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen
 - einer ersten Temperaturmessstelle (**20**) in einem ersten Abstand ($D1$) zur Wärmeeinleitstelle (**18**) und
 - einer zweiten Temperaturmessstelle (**22**) in einem zweiten Abstand ($D2$) zur Wärmeeinleitstelle (**18**) zu mehreren Zeitpunkten (t_i),
dadurch gekennzeichnet, dass
 - das Erfassen der zeitabhängigen Temperaturdifferenz (ΔT) in logarithmisch äquidistanten Zeitabständen erfolgt oder das Erfassen in nicht logarithmisch äquidistanten Zeitabständen erfolgt und aus den so erhaltenen Messwerten die Temperaturdifferenzen interpoliert werden und
 - das Verfahren die Schritte
 - Ermitteln einer maximalen Steigung ($\Delta\Delta T_{\text{max}}$) der zeitabhängigen Temperaturdifferenz ($\Delta T(\ln t)$) in Abhängigkeit von einer logarithmierten Zeitkoordinate ($\ln t$) und
 - Berechnen der Wärmeleitfähigkeit (λ) aus der maximalen Steigung ($\Delta\Delta T_{\text{max}}$).
 und/oder
 - Ermitteln eines Maximalsteigungs-Zeitpunkts (t_{max}), zu dem die maximale Steigung ($\Delta\Delta T_{\text{max}}$) der zeitabhängigen Temperaturdifferenz ($\Delta T(\ln t)$) in Abhängigkeit von der logarithmierten Zeitkoordinate ($\ln t$) vorliegt, und
 - Berechnen der Temperaturleitfähigkeit (a) aus dem Maximalsteigungs-Zeitpunkt (t_{max}), umfasst.
- Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch die Schritte
 - Anpassen einer zeitabhängigen Steigungsfunktion der zeitabhängigen Temperaturdifferenz ($\Delta T(\ln t)$) mit einer Ausgleichsfunktion, insbesondere einer die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit als Parameter enthaltenden analytischen Lösung für die zeitabhängige Steigungsfunktion, und
 - Ermitteln dadurch der Wärmeleitfähigkeit und/oder Temperaturleitfähigkeit anhand der Ausgleichsfunktion.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine der zweite Abstand ($D2$) höchstens die Hälfte, insbesondere höchstens ein Drittel, einer Probenbreite (B) und einer Wärmequellenlänge L beträgt.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Beaufschlagen der Probe (**16**) mit der zeitlich konstanten Heizleistung (q) mittels eines Heizdrahts (**12**), eines Heizstreifens oder einer Strahlungsquelle erfolgt.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zeitabhängige Temperaturdifferenz (ΔT) so lange gemessen wird, bis die Steigung ($\Delta\Delta T$) der gemessenen Temperaturdifferenzen nach einem Passieren der maximalen Steigung ($\Delta\Delta T_{\text{max}}$) unter 0,8, insbesondere unter 0,6, insbesondere unter 0,4 des Maximumsniveaus fällt.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturdifferenzen mit einem digitalen Messgerät aufgenommen und ein digitales Signalglätten durchgeführt wird.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Signalglätten mittels einer Mittelwertermittlung von mit einer konstanten Rate laufenden Messwerten so durchgeführt wird, dass die Anzahl der berechneten Werte mit einem konstanten Faktor während der Messung steigt.

8. Thermotransportgrößenmessvorrichtung zum Messen einer thermischen Transportgröße einer Probe (16), mit
- (a) einer Heizvorrichtung zum Beaufschlagen der Probe (16) mit einer zeitlich konstanten Heizleistung (q) in einer linearen Wärmeeinleitstelle (18),
 - (b) einem ersten Temperatormesser (20), der in einem ersten Abstand (D_1) zur Wärmeeinleitstelle (18) angeordnet ist, und
 - (c) einem zweiten Temperatormesser (22), der in einem zweiten Abstand (D_2) zur Wärmeeinleitstelle (18) angeordnet ist,
- gekennzeichnet durch
- (d) eine Auswerteeinheit (24), die eingerichtet ist zum Durchführen eines Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche.

9. Thermotransportgrößenmessvorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Heizvorrichtung (12) ein Heizdraht ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

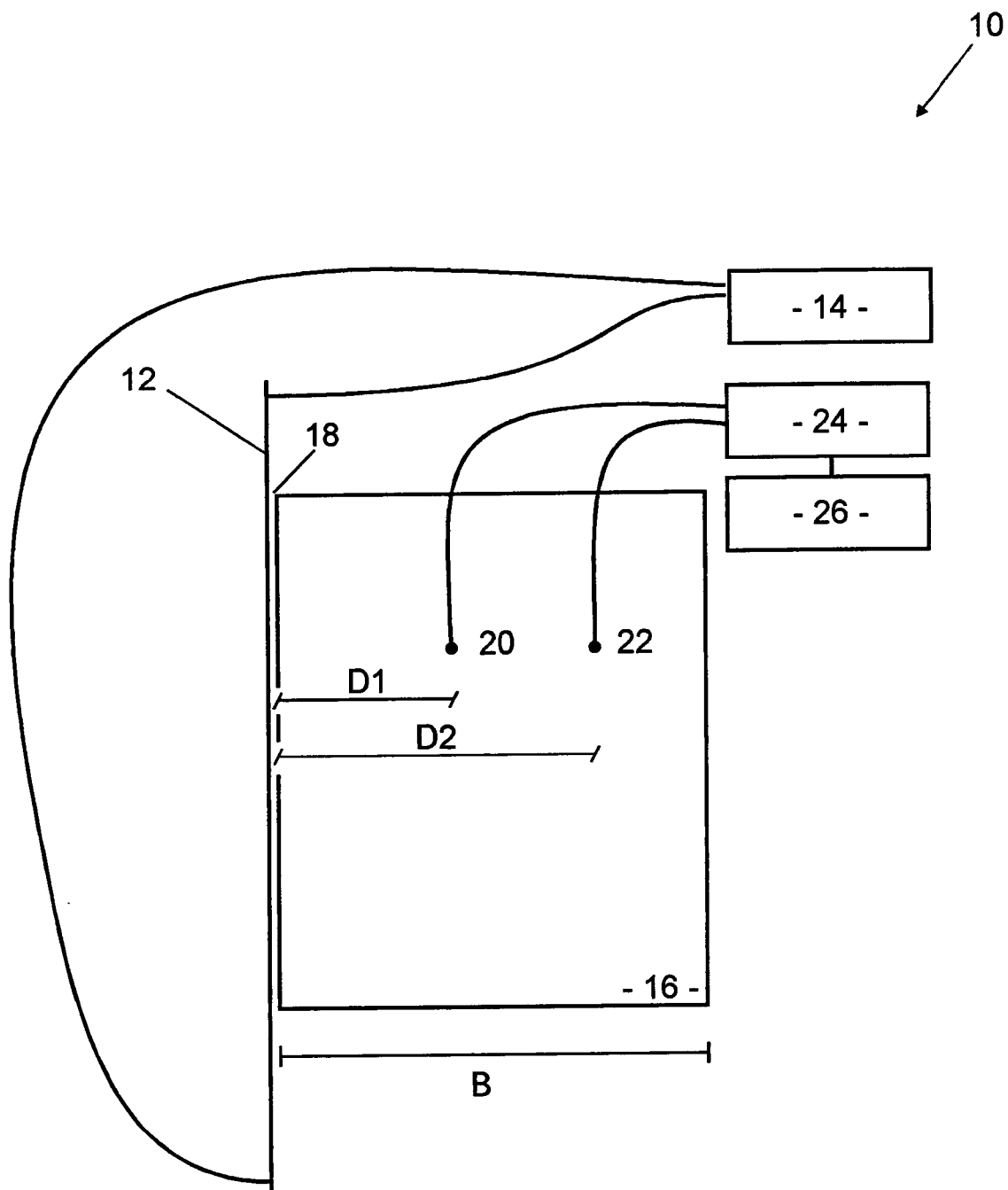


Fig. 1

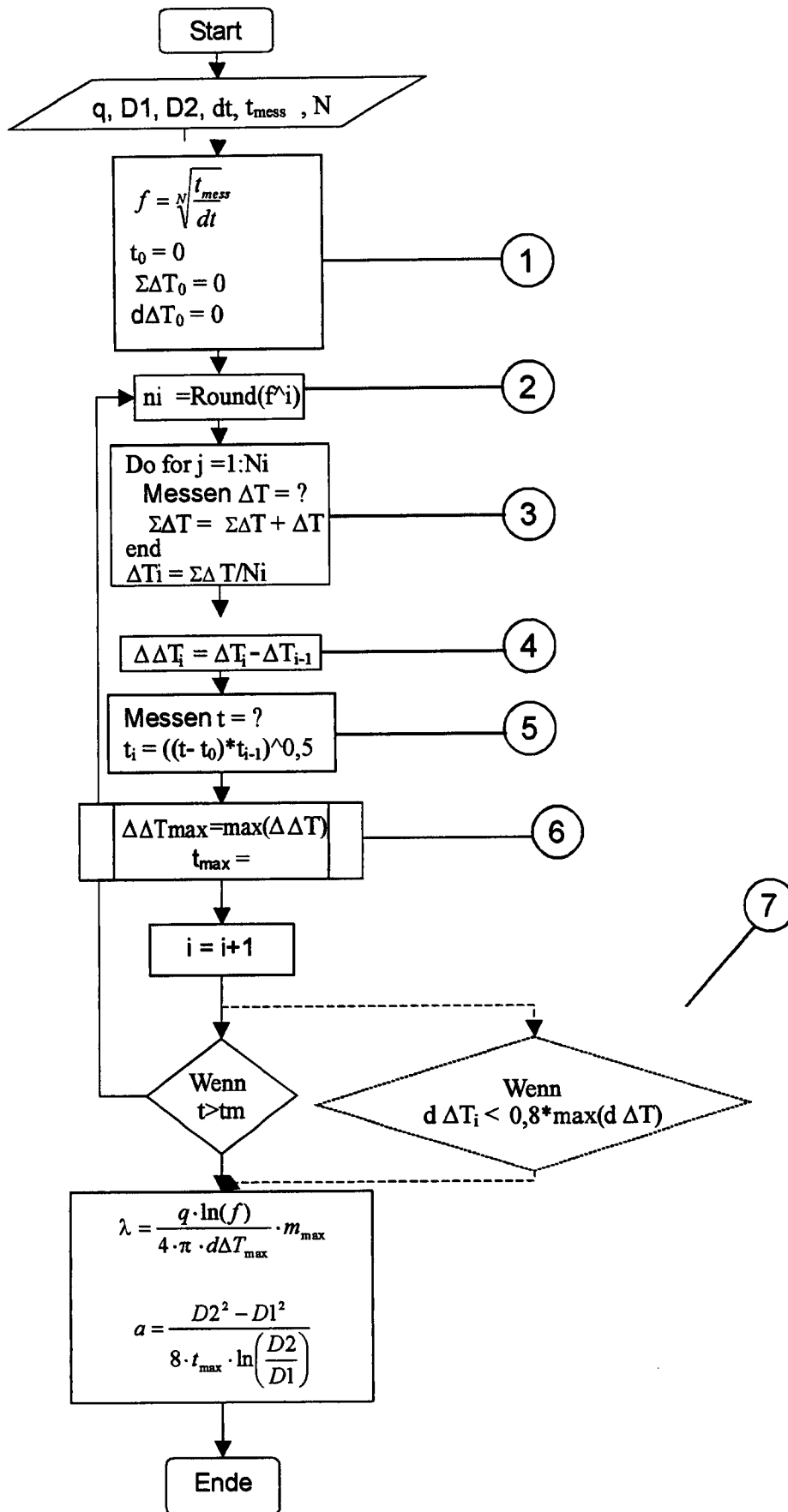


Fig. 2

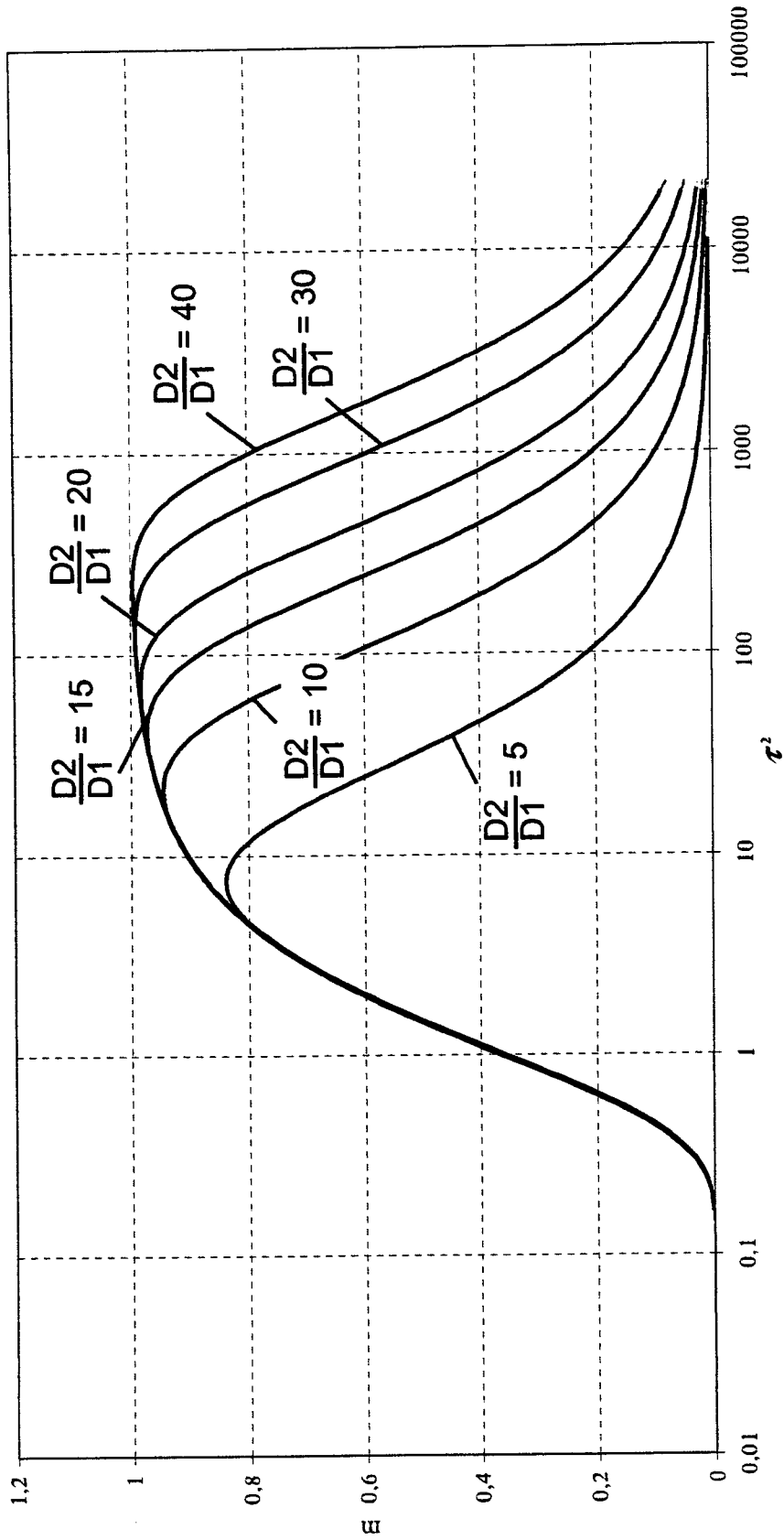


Fig. 3