

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
18. Oktober 2012 (18.10.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/139554 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2012/000385
(22) Internationales Anmeldedatum:
13. April 2012 (13.04.2012)
(25) Einreichungssprache: Deutsch
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 017 194.0
15. April 2011 (15.04.2011) DE
(72) Erfinder; und
(71) Anmelder : NIED, Roland [DE/DE]; Raiffeisenstr. 10,
86486 Bonstetten (DE).
(74) Anwalt: SEEGER · SEEGER · LINDNER
PARTNERSCHAFT PATENTANWÄLTE; Paosstr.
95, 81249 München (DE).

- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR MEASURING THE SIZES OF PARTICLES DISPERSED IN A FLUID STREAM AND SYSTEM THEREFOR

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR MESSUNG DER GRÖSSEN VON IN EINEM FLUIDSTROM DISPERGIERTEN PARTIKELN UND ANLAGE DAFÜR

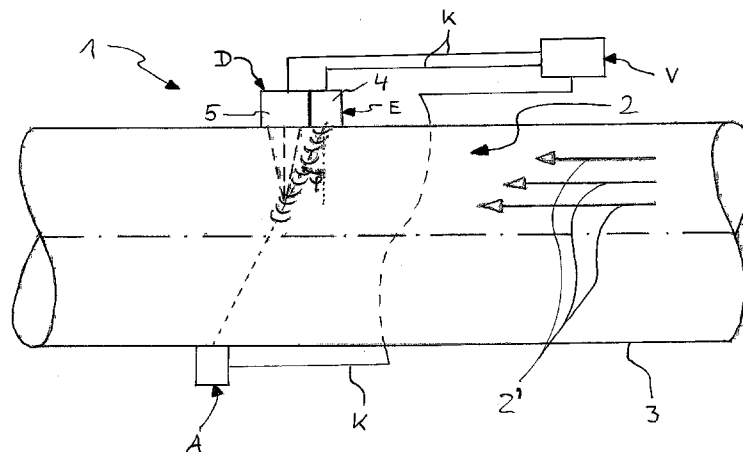


Fig. 1

(57) Abstract: The present invention relates to a method for measuring the sizes of particles dispersed in a fluid stream (2) following a line (3), wherein an acoustic vibration is imparted to the stream of fluid and particles following the line (3) as an excitation vibration and a response vibration of the particles to the excitation vibration is measured, and wherein an evaluation is performed by comparing the excitation vibration and the response vibration with regard to vibration velocity, vibration amplitude and/or phase shift to determine the sizes of the particles. Furthermore, the invention relates to a system for measuring the sizes of particles dispersed in a fluid stream following a line (3), comprising: excitation devices (E), in order to impart an acoustic vibration to the stream of fluid and particles following the line (3) as an excitation vibration, detector devices (D), in order to measure a response vibration of the particles to the excitation vibration, and processing devices (V) for determining the sizes of the particles by comparing the excitation vibration and the response vibration with regard to vibration velocity, vibration amplitude and/or phase shift.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2012/139554 A2

**Veröffentlicht:**

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung der Größen von in einem einer Leitung (3) folgenden Fluidstrom (2) dispergierten Partikeln, wobei dem der Leitung (3) folgenden Fluid-Partikel-Strom eine akustische Schwingung als Erregerschwingung aufgeprägt wird und eine Antwortschwingung der Partikel auf die Erregerschwingung gemessen wird, und wobei zur Ermittlung der Größen der Partikel eine Auswertung durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung erfolgt. Ferner betrifft die Erfindung eine Anlage zur Messung der Größen von in einem einer Leitung (3) folgenden Fluidstrom dispergierten Partikeln, enthaltend: Erregereinrichtungen (E), um dem der Leitung (3) folgenden Fluid-Partikel-Strom eine akustische Schwingung als Erregerschwingung aufzuprägen, Detektoreinrichtungen (D), um eine Antwortschwingung der Partikel auf die Erregerschwingung zu messen, und Verarbeitungseinrichtungen (V) zur Ermittlung der Größen der Partikel durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung.

**Verfahren zur Messung der Größen von in einem Fluidstrom
dispergierten Partikeln und Anlage dafür**

Beschreibung

5

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung der Größen von in einem einer Leitung folgenden Fluidstrom dispergierten Partikeln nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und eine Anlage zur Messung der Größen von in einem einer Leitung folgenden Fluidstrom dispergierten Partikeln nach dem Oberbegriff des Anspruchs 8.

Seit etwa 20 Jahren gibt es Bestrebungen, die Partikelgrößenverteilung in Prozessen insbesondere online zu messen. Aus der Praxis bekannte Verfahren sind die Laserbeugung (Malvern, Hosokawa-Alpine bzw. Xoptis LTD, siehe xoptix.co.uk) und die Lichtstreuung (Dantec Dynamics, siehe DantecDynamics.com). Die Laserbeugung ist kein echtes Online-Verfahren, denn sie bedarf der Probenahme eines Teilstromes aus dem Prozess. Damit einhergehend ist eine Kalibrierung erforderlich. Die Nutzung der Lichtstreuung wird, als zusätzliches "Hilfsmittel", auch bei Laserbeugern eingesetzt. Ob sich mit diesem Prinzip alleine die Bestimmung der Korngrößenverteilung verlässlich in einem weiten Bereich der Konzentration und der Partikelgröße realisieren lässt, ist jedoch fraglich. Erfahrungsberichte über den Einsatz entsprechender Geräte sind nicht bekannt.

Die DE 195 21 786 A1 offenbart ein Verfahren zum Überwachen eines Partikelstromes in einer Leitung durch periodische Erregung. Dabei wird nicht direkt in der Gas-Partikel-Suspension gemessen, sondern ein Detektor ist mittels einer Öffnung mit der den Fluidstrom dispergierten Partikeln führenden Leitung verbunden. Bei

diesem Verfahren erfolgt dann eine Messung von zu Änderungen des Druckes des erregten Fluids und nicht der der Partikel repräsentativen Signalen. Die Einrichtungen zur Messung von Signalen bestehen aus wenigstens einem Druckaufnehmer oder Elementen zum
5 Messen der elektro-akustischen Impedanz. Eine direkte Messung der Partikelgeschwindigkeit sowie eine Verwendung eines LDAs sind in der Druckschrift weder angesprochen noch angeregt.

In der US 2009/0323061 A1 ist ein Verfahren zur Ermittlung der
10 Größe von Nanopartikeln unter Nutzung der Lichtstreuung beschrieben.

In dem Artikel "Laser detection of sound" von Vignola et al., in: The Journal of the Acoustical Society America, Vol. 90, 1991, No.
15 3, S. 1275-1286, - ISSN: 0001-4966, wird die Messung von Turbulenzen in Fluiden diskutiert. Hierzu werden Tracer-Partikel benutzt, die aufgrund ihrer "Kleinheit" den Turbulenzen nahezu verzögerungsfrei folgen. Mithilfe einer LDA-Messung werden Richtung und Geschwindigkeit der Tracer-Partikel bestimmt. Zur Simulation
20 einer turbulenten Strömung in Wasser wird eine stehende Schallwelle benutzt. Dies hat für den Autor den Vorteil, das turbulente "Strömungsfeld" zu kennen und damit Aussagen treffen zu können, inwieweit Tracer-Partikel der turbulenten Strömung tatsächlich folgen. Im Unterschied zu dem technischen Gebiet der vorliegenden
25 Erfindung gibt es aber bei dieser bekannten Technologie weder einen einer Leitung folgenden Fluidstrom, noch erfolgt eine Befassung mit der Ermittlung von Partikelgrößen.

Die in dem Artikel "Flow Tracing Fidelity of Scattering Aerosol
30 in Laser Doppler Velocimetric", Mazumder et al., in: Applied Optics, Vol. 14, 1975, No. 4, S. 894 - 901, behandelte Technik befasst sich mit ähnlicher Aufgabenstellung und Lösung, wie die

Technologie gemäß der vorstehend behandelten Publikation von Vignola et al., allerdings wird als Fluid Luft benutzt. Im Hinblick auf das vorliegend betroffene technische Gebiet geht Mazumder et al. nicht über Vignola et al. hinaus.

5

Die vorliegende Erfindung hat und erreicht das Ziel, eine einfache und verlässliche Messung der Größen von in einem Fluidstrom dispergierten Partikeln zu schaffen.

10 Dieses Ziel wird mit einem Verfahren zur Messung der Größen von in einem Fluidstrom dispergierten Partikeln nach dem Anspruch 1 und einer Anlage zur Messung der Größen von in einem Fluidstrom dispergierten Partikeln nach dem Anspruch 8 erreicht.

15 Gemäß der Erfindung wird somit ein Verfahren zur Messung der Größen von in einem einer Leitung folgenden Fluidstrom dispergierten Partikeln geschaffen, wobei dem der Leitung folgenden Fluid-Partikel-Strom eine akustische Schwingung als Erregerschwingung aufgeprägt wird und eine Antwortschwingung der Partikel auf die
20 Erregerschwingung gemessen wird, und wobei zur Ermittlung der Größen der Partikel eine Auswertung durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung erfolgt.

25

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird in anderen Worten und im Unterschied zum gesamten Stand der Technik physikalisch der "Durchmesser eines Partikels gleicher Sinkgeschwindigkeit" ermittelt. Dabei erfolgt eine Anregung des Partikelkollektives mittels
30 einer akustischen Erregerschwingung und Messung der Antwortschwingung in einem Fluidstrom, also nicht in einem ruhenden Fluid.

- Vorteilhafterweise kann weiter vorgesehen sein, dass die Antwortschwingung der Partikel durch Messung ihrer Schwinggeschwindigkeit dokumentiert wird. Eine weitere bevorzugte Ausgestaltung besteht darin, dass die Antwortschwingung der Partikel durch Messung ihrer Schwingungsamplitude dokumentiert wird. Es kann ferner mit Vorteil vorgesehen sein, dass die Antwortschwingung der Partikel durch Messung der Phasenverschiebung dokumentiert wird. Noch weiter kann mit Vorzug vorgesehen sein, dass die Antwortgeschwindigkeit mit einem Laser-Doppler-Anemometer gemessen wird. Weiterhin ist es bevorzugt, wenn die Erregung und Messung der Schwingungen der Partikel zumindest im Wesentlichen senkrecht zur Strömungsrichtung des Fluid-Partikel-Stroms erfolgen.
- Es kann ferner vorgesehen sein, dass die Abschwächung der akustischen Erregerschwingung in der Fluid-Partikel-Suspension (in dem Fluid-Partikel-Aerosol; in den vorliegenden Unterlagen wird generell von einer Suspension auch bei einer Gas-Partikel-Kombination/Dispersion gesprochen) berücksichtigt wird.
- Durch die Erfindung wird ferner eine Anlage zur Messung der Größen von in einem einer Leitung folgenden Fluidstrom dispergierten Partikeln geschaffen, enthaltend:
- Erregereinrichtungen, um dem der Leitung folgenden Fluid-Partikel-Strom eine akustische Schwingung als Erregerschwingung aufzuprägen,
 - Detektoreinrichtungen, um eine Antwortschwingung der Partikel auf die Erregerschwingung zu messen, und
 - Verarbeitungseinrichtungen zur Ermittlung der Größen der Partikel durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung.

- Eine vorzugsweise Weiterbildung davon besteht darin, dass die Detektoreinrichtungen ausgelegt sind, um die Schwinggeschwindigkeit der Antwortschwingung der Partikel zu dokumentieren. Weiterhin
- 5 kann mit Vorzug und denselben Vorteilen, wie oben zur verfahrensmäßigen Ausgestaltung angegeben ist, vorgesehen sein, dass die Detektoreinrichtungen ausgelegt sind, um die Schwingungsamplitude der Antwortschwingung der Partikel zu dokumentieren. Noch eine weitere vorzugsweise Ausgestaltung besteht darin, dass die Detek-
- 10 toreinrichtungen ausgelegt sind, um die Phasenverschiebung der Antwortschwingung der Partikel zu dokumentieren. Ferner ist es bevorzugt, wenn die Detektoreinrichtungen ein Laser-Doppler-Anemometer zur Messung der Antwortgeschwindigkeit enthalten. Noch eine andere vorzugsweise Ausgestaltung besteht darin, dass die
- 15 Erregereinrichtungen und Detektoreinrichtungen derart angeordnet sind, dass Erregung und Messung der Schwingungen der Partikel zumindest im Wesentlichen senkrecht zur Strömungsrichtung des Fluid-Partikel-Stroms erfolgen.
- 20 Es kann noch weiter vorgesehen sein, dass Einrichtungen zur Messung der Abschwächung der akustischen Erregerschwingung in der Fluid-Partikel-Suspension enthalten sind.
- Weitere bevorzugte und/oder vorteilhafte Ausgestaltungen der Er-
- 25 findung und ihrer einzelnen Aspekte ergeben sich aus Kombinationen der abhängigen Ansprüche sowie aus den gesamten vorliegenden Anmeldungsunterlagen.
- Die Erfindung wird anhand von Ausführungsbeispielen nachfolgend
- 30 unter Bezugnahme auf die Zeichnung lediglich exemplarisch näher erläutert, in der

Fig. 1 in einer Prinzipskizze eine Anlage zur Messung der Größen von in einem Fluidstrom dispergierten Partikeln zeigt,

Fig. 2 eine graphische Darstellung der Relation von auf eine Fluid-Partikel-Suspension (ein Fluid-Partikel-Aerosol) als Erregerschwingung aufgeprägter Schallsschwingung und einer Antwortschwingung der Partikel in der Fluid-Partikel-Suspension darauf verdeutlicht,

Fig. 3 die Relation von auf eine Fluid-Partikel-Suspension als Erregerschwingung aufgeprägter Schallsschwingung mit einer Frequenz von 5 kHz und Antwortschwingungen von Partikeln verschiedener Größen in der Fluid-Partikel-Suspension zeigt,

Fig. 4 die Relation von auf eine Fluid-Partikel-Suspension als Erregerschwingung aufgeprägter Schallsschwingung mit einer Frequenz von 0,1 kHz und Antwortschwingungen von Partikeln verschiedener Größen in der Fluid-Partikel-Suspension zeigt, und

Fig. 5 die Relation von auf eine Fluid-Partikel-Suspension als Erregerschwingung aufgeprägter Schallsschwingung mit einer Frequenz von 20 kHz und Antwortschwingungen von Partikeln verschiedener Größen in der Fluid-Partikel-Suspension zeigt.

Anhand der nachfolgend beschriebenen und in den Zeichnungen dargestellten Ausführungs- und Anwendungsbeispiele wird die Erfindung lediglich exemplarisch näher erläutert, d.h. sie ist nicht auf diese Ausführungs- und Anwendungsbeispiele beschränkt. Verfahrens- und Vorrichtungsmerkmale ergeben sich jeweils analog auch aus Vorrichtungs- bzw. Verfahrensbeschreibungen.

Einzelne Merkmale, die im Zusammenhang mit einem konkreten Ausführungsbeispiel angeben und/oder dargestellt sind, sind nicht

- 7 -

auf dieses Ausführungsbeispiel oder die Kombination mit den übrigen Merkmalen dieses Ausführungsbeispiels beschränkt, sondern können im Rahmen des technisch Möglichen, mit jeglichen anderen Varianten, auch wenn sie in den vorliegenden Unterlagen nicht gesondert behandelt sind, kombiniert werden.

Gleiche Bezugszeichen in den einzelnen Figuren und Abbildungen der Zeichnung bezeichnen gleiche oder ähnliche oder gleich oder ähnlich wirkende Komponenten. Anhand der Darstellungen in der Zeichnung werden auch solche Merkmale deutlich, die nicht mit Bezugszeichen versehen sind, unabhängig davon, ob solche Merkmale nachfolgend beschrieben sind oder nicht. Andererseits sind auch Merkmale, die in der vorliegenden Beschreibung enthalten, aber nicht in der Zeichnung sichtbar oder dargestellt sind, ohne weiteres für einen Fachmann verständlich.

Die zu Grunde liegende Idee ist, in einem Fluidstrom suspendierte Partikel akustisch zum Schwingen anzuregen und diese Partikelschwingungen zur Korngrößenanalyse zu nützen. Die Koppelung der Erregerschwingung (= Schall) und der damit erzeugten Partikelschwingungen wird physikalisch durch das Gleichgewicht Schleppkraft F_S der Strömung plus Massenträgheitskraft F_T dargestellt:

$$F_S + F_T = 0 \quad (1)$$

Die Schleppkraft der Strömung ist gegeben durch

$$F_S = \frac{\rho_C}{2} \cdot v_{rel}^2 \cdot \frac{d_p^2 \cdot \pi}{4} \cdot c_w \quad (2)$$

wobei:

ρ_C Feststoffdichte

v_{rel} Relativgeschwindigkeit der Partikelschwingung

d_p Durchmesser der Partikel

c_w Widerstandsbeiwert

- 8 -

mit

$$c_w = \frac{24}{\text{Re}} \quad (3)$$

wobei:

5 Re Reynoldszahl

für laminare Umströmung der Partikeln. Diese ist gegeben für Reynoldszahlen $\text{Re} < 1$ mit

$$\text{Re} = \frac{d_P \cdot v_{\text{rel}} \cdot \rho_C}{\eta_C} \quad (4)$$

10 wobei:

 η_C Viskosität des Gases

Die Massenträgheitskraft erhält man zu

$$F_T = \frac{d_P^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_s \cdot b \quad (5)$$

15 wobei:

 ρ_s Feststoffdichte b Beschleunigung

mit

$$20 \quad b = \frac{dv_{\text{rel}}}{dt} \quad (6)$$

Die Relativgeschwindigkeit v_{rel} ist dabei die Differenz zwischen der aktuellen (oszillierenden) Erregergeschwindigkeit c und der (ebenfalls oszillierenden) Partikelgeschwindigkeit u :

$$25 \quad v_{\text{rel}} = c - u \quad (7)$$

Nach Einsetzen und Umformen erhält man daraus

- 9 -

$$\frac{dv_{rel}}{dt} = -C_d \cdot v_{rel} \quad (8)$$

wobei:

$$C_d = 18 \cdot \frac{\eta_c}{d_p^2 \cdot \rho_s} \quad (9).$$

- 5 Die Gleichung (8) ist nicht geschlossen lösbar, sie kann aber in eine Fourierreihe entwickelt oder numerisch gelöst werden. Letzteres ist der Weg, der vorliegend gegangen wurde.

10 In der Fig. 1 ist die Messanordnung schematisch in einer Prinzipskizze einer Anlage 1 zur Messung der Größen von in einem Fluidstrom 2 dispergierten Partikeln (nicht dargestellt) mittels eines optisch-akustischen Messverfahrens gezeigt.

15 Eine Fluid-Partikel-Suspension (ein Fluid-Partikel-Aerosol; in den vorliegenden Unterlagen wird generell von einer Suspension auch bei einer Gas-Partikel-Kombination/Dispersion gesprochen) wird in einer Strömungsrichtung 2' des Fluidstroms 2 in einer Leitung 3 in Form z.B. eines geraden Rohrstückes geführt, an der ein Schallerreger 4 als Erregereinrichtung E in der Fluidstromströmungsrichtung 2' vor einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) 5
20 als Detektoreinrichtung D angeordnet ist.

Über den Schallerreger 4 wird durch dessen Auslegung und Anordnung der Fluid-Partikel-Suspension zumindest im Wesentlichen
25 senkrecht zu deren Fluidstromströmungsrichtung 2' Schall einer gewissen Frequenz und Energie als Erregerschwingung aufgeprägt. Der Schall breitet sich mit der Schallgeschwindigkeit c_s (ca. 340 m/s in Luft) aus und wird entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit v_s der Fluid-Partikel-Suspension um den Winkel ϕ in Fluidstromströmungsrichtung 2' abgelenkt. Die Auslegung und Anord-
30

- 10 -

5 nung von Schallerreger 4 und LDA 5 ist so eingestellt oder einstellbar, dass die Aufprägung des Schalls auf die Fluid-Partikel-Suspension durch den Schallerreger 4, also die Erregerschwingung, in einem räumlichen Messbereich oder Messfeld 6 des LDAs 5 wirksam ist.

10 Entsprechend kann der Schallerreger 4 in der Fluidstromströmungsrichtung 2' auch hinter dem LDA 5 angeordnet sein, wenn dabei dafür Sorge getragen ist oder getragen werden kann, dass die Aufprägung des Schalls auf die Fluid-Partikel-Suspension unter einer Neigung entgegen der Fluidstromströmungsrichtung 2' um den Winkel φ entsprechend der Ablenkung des Schalls infolge der Strömungsgeschwindigkeit v_s der Fluid-Partikel-Suspension erfolgt.

15 Für die Ablenkung des Schalls gilt

$$\tan \varphi = \frac{v_s}{c_s} \quad (10)$$

wobei:

v_s Strömungsgeschwindigkeit der Fluid-Partikel-Suspension

c_s Schallgeschwindigkeit

20 Durch die Aufprägung des Schalls auf die Fluid-Partikel-Suspension, also die Erregerschwingung, werden die Partikel in dem Schallfeld zu einer "Antwortschwingung" angeregt. Die Schwinggeschwindigkeit u dieser Antwortschwingung der Partikel in der Fluid-Partikel-Suspension (in dem Fluid-Partikel-Aerosol) wird mit
25 dem Laser-Doppler-Anemometer 5 gemessen.

Weiterhin gibt es noch Verarbeitungseinrichtungen V zur Ermittlung der Größen der Partikel durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit,
30 Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung. D.h.,

dass zur Ermittlung der Größen der Partikel eine Auswertung durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung erfolgt. Ferner kann vorzugsweise eine Abschwächmesseinrichtung A vorgesehen sein, die dazu dient, die Abschwächung der akustischen Erregerschwingung in der Fluid-Partikel-Suspension (dem Fluid-Partikel-Aerosol) zu ermitteln und bei der Bestimmung der Größen der in dem Fluidstrom 2 dispergierten Partikeln zu berücksichtigen.

10

Die Daten-, Signal- und/oder Informationsübertragung zwischen einerseits der Erregereinrichtung E und Detektoreinrichtung D sowie ggf. Abschwächmesseinrichtung A und andererseits den Verarbeitungseinrichtungen V erfolgt beispielsweise über Kabel K.

15

Die Fig. 2 zeigt schematisch das zu erwartende und mit dem LDA 5 zu ermittelnde Verhalten anhand der Erregerschwingung von dem Schallerreger 4 und der Antwortschwingung der Partikel. Die Antwortschwingung der Partikel erfolgt abhängig von deren Masse, der Erregerfrequenz und dem Schalldruck phasenverschoben und mit reduzierter Schwinggeschwindigkeit. Auf der Ordinate des Diagramms ist die Schwinggeschwindigkeit v von Luft und von Partikeln aufgetragen über dem Phasenwinkel α . Zu sehen ist der Phasenverschiebungswinkel $\Delta\alpha$ und die Schwinggeschwindigkeitsdifferenz Δv zwischen der Erregerschwinggeschwindigkeit von Luft und der Antwortschwinggeschwindigkeit von Partikeln.

25

Mathematisch-physikalische Simulation

30

Betrachtet man für sehr kleine Winkeländerungen (und damit sehr kleine Zeitabschnitte Δt) die Erregergeschwindigkeit c als jeweils konstant, so lässt sich Gleichung (8) abschnittsweise lösen:

- 12 -

$$\int \frac{1}{v_{rel}} dv_{rel} = -C_d \cdot \int dt \quad (11)$$

$$\ln v_{rel} = -C_d \cdot t + \ln v_0 \quad (12)$$

wobei:

5 v_0 Geschwindigkeit des Erregerschalls zur Zeit $t = 0$

(folgt aus der Randbedingung $t = 0, v_{rel} = v_0$) oder, nach Umformen

$$v_{rel} = e^{-C_d \cdot t} \cdot v_0 \quad (13)$$

10 In der Fig. 3 ist das Ergebnis einer beispielhaften Berechnung für einen Feststoff der Dichte 2.700 g/l, Luft, eine Erregerfrequenz f von 5 kHz, einen Schalldruck von 0,2 Pa (entsprechend etwa 70 db) sowie Partikelgrößen von 1, 5, 10 und 50 μm angegeben. Auf der Ordinate ist die Schwinggeschwindigkeit über der Zeit t
 15 auf der Abszisse aufgetragen. Die Dimension der Schwinggeschwindigkeiten c (für Luft), u_1 (für Partikel der Größe 1 μm), u_2 (für Partikel der Größe 5 μm), u_3 (für Partikel der Größe 10 μm) und u_4 (für Partikel der Größe 50 μm) ist m/s, und die Dimension der Zeitachse ist s.

20

Wie die Graphik für das vorstehend erläuterte Zahlenbeispiel zeigt, schwingen "1 μm -Partikel" fast "im Gleichschritt" mit der Erregerschwingung. "5 μm -Partikel" und "10 μm -Partikel" erscheinen noch aufgelöst, "50 μm -Partikel" sind nicht mehr von der

25 Nulllinie unterscheidbar.

In den Fig. 4 und 5 ist die gleiche Situation für eine Erregerfrequenz von 100 Hz und 20 kHz gezeigt. In Fig. 4 ist die Dimension der Erregergeschwindigkeit c (für Luft), u_1 (für Partikel der Größe 1 μm), u_2 (für Partikel der Größe 5 μm), u_3 (für Partikel der Größe 10 μm) und u_4 (für Partikel der Größe 50 μm) in m/s
 30

und der Zeitachse t in s aufgetragen. In der Fig. 5 ist die Erregergeschwindigkeit c , die Partikelgeschwindigkeit u_1 (für Partikel der Größe $0,5 \mu\text{m}$), u_2 (für Partikel der Größe $1 \mu\text{m}$), u_3 (für Partikel der Größe $5 \mu\text{m}$) und u_4 (für Partikel der Größe $10 \mu\text{m}$) in m/s und der Zeitachse t in s aufgetragen.

Dabei zeigt sich eine eindeutige Frequenzabhängigkeit der Auflösung: je niedriger die Frequenz, desto größer (oder größer) die wahrnehmbaren Partikel und umgekehrt. Ins praktische übertragen heißt das, dass für enge Korngrößenverteilungen eine Messung mit einer Erregerfrequenz ausreicht oder ausreichen kann, während breite Korngrößenverteilungen vorteilhafterweise mit mehreren Frequenzen erfasst werden, was auch getaktet erfolgen kann.

15 Praktische Umsetzung

In der Praxis ist die Erregergeschwindigkeit c als $f(t)$ vorgegeben, die Partikelgeschwindigkeit u wird gemessen. Damit ist v_{rel} eine bekannte Größe. Gesucht wird der Partikeldurchmesser d_p . Hierzu muss Gleichung (12) mit (9) nach d_p aufgelöst werden:

$$d_p = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_c \cdot t}{\ln \frac{v_0}{v_{rel}} \cdot \rho_s}} \quad (14)$$

wobei:

t Zeitintervall

25 Bei der Würdigung dieser Gleichung ist zu beachten, dass der Ansatz aus der numerischen Lösung entlehnt ist, d.h., dass

$$v_{rel}(t_i) = c(t_{i-1}) - u(t_i) \quad (15)$$

wobei:

i Laufvariable

Ansonsten würde Gleichung (15) bei $u = u_{max}$ zu Singularitäten führen. Alternativ kann, wie schon weiter oben erwähnt wurde, auch der Weg über eine Fourier-Analyse gegangen werden.

- 5 Zu beachten ist weiterhin, dass in der Zeit alle Teilchen auch Geschwindigkeiten $u < u_{max}$ annehmen, also von gröberen Partikeln nicht a priori unterscheidbar sind. Dieses Problem kann gelöst werden, indem die erfassten Partikelgrößen über ein Filter Messkanälen zugeordnet werden. Dabei soll gelten, dass die kumulierten Messergebnisse im jeweils "feineren" Messkanal von allen grö-
- 10 beren Messergebnissen subtrahiert werden usw., so dass die Anteile feinerer Partikel aus den "gröberen" Messkanälen verschwinden. Aus der Anzahl der Messergebnisse je Kanal, dividiert durch die Gesamtheit der Ereignisse kann schließlich eine Partikelgrößen-
- 15 verteilung generiert werden.

Es wurde somit nachgewiesen, dass die so bestimmte Partikelgröße nur von den Parametern Viskosität des Gases η_c , Feststoffdichte ρ_s sowie der Schnelle des Erregerschalls v_0 abhängt.

- 20 Neben der Schallablenkung (wie oben beschrieben) kann auch die Schallabschwächung in der Fluid-Partikel-Suspension über die Abschwächmesseinrichtung A berücksichtigt werden. Dies kann recht einfach über die zusätzliche Messung des Schalldruckes an der dem
- 25 Schallerreger 4 gegenüber liegenden Seite der Leitung 3 bewerkstelligt werden, wobei entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit v_s der Fluid-Partikel-Suspension der Ablenkwinkel ϕ zu berücksichtigen ist, um die korrekte Lage des Detektors zur Schalldruckmessung zu bestimmen oder einzustellen. Da die Schallab-
- 30 schwächung in der Fluid-Partikel-Suspension dem Quadrat der Entfernung proportional ist, kann auf die Schallintensität im Messbereich oder Messvolumen des LDAs geschlossen werden.

Für die Konzentration der Partikel wird vorausgesetzt, dass sie nur so groß ist, dass die freie Beweglichkeit der Einzelteilchen oder Partikel nicht beeinträchtigt ist. Darüber hinaus wäre es
5 ein idealer Zustand, wenn sich zum Zeitpunkt der Messung nur jeweils ein Teilchen im Messvolumen des LDAs befände.

Die erste Bedingung ist einfach abzuschätzen. Wird von einer typischen Feststoffbeladung des Gases von 0,1 kg/m² und einer Feststoffdichte von 2 kg/l ausgegangen, so ergibt sich eine Volumen-
10 konzentration von $5 \cdot 10^{-5}$. Daraus folgt die mittlere freie Weglänge $\bar{l}$ zu

$$\bar{l} = \sqrt[3]{20000} \cdot d_p \approx 27 \cdot d_p \quad (16)$$

15 Damit ist im trockenen Inline-Betrieb die Forderung nach freier Beweglichkeit erfüllt.

Zur Erfüllung der zweiten Bedingung ist auf ein möglichst kleines Messvolumen der LDA zu achten. Das wird sich mit kleinen Brenn-
20 weiten realisieren lassen, was im Übrigen auch hinsichtlich der Schallabschwächung vorteilhaft ist.

Die jeweils zu erfüllende Auflösung des LDAs kann einfach bestimmt werden unter Berücksichtigung von $u \leq 10^{-4}$ m/s, frequenz-
25 abhängig etwa 10^4 Messungen in der Sekunde. Beispielsweise kann mit einem Zeitintervall von $0,5 \cdot 10^{-4}$ s bei 100 Hz, 10^{-6} s bei 20 kHz gearbeitet werden.

Die Erfindung ist anhand der Ausführungsbeispiele in der Beschreibung und in der Zeichnung lediglich exemplarisch dargestellt und nicht darauf beschränkt, sondern umfasst alle Variati-
30

onen, Modifikationen, Substitutionen und Kombinationen, die der Fachmann den vorliegenden Unterlagen insbesondere im Rahmen der Ansprüche und der allgemeinen Darstellungen in der Einleitung dieser Beschreibung sowie der Beschreibung der Ausführungsbeispiele entnehmen und mit seinem fachmännischen Wissen sowie dem Stand der Technik kombinieren kann. Insbesondere sind alle einzelnen Merkmale und Ausgestaltungsmöglichkeiten der Erfindung kombinierbar.

10

Bezugszeichenliste

1	Anlage zur Messung der Größen von in einem Fluidstrom dispergierten Partikeln
15 2	Fluidstrom
2'	Fluidstromströmungsrichtung
3	Leitung
4	Schallerreger
5	Laser-Doppler-Anemometer (LDA)
20 6	Messfeld des LDAs
A	Abschwächmesseinrichtung
D	Detektoreinrichtung
E	Erregereinrichtung
K	Kabel
25 V	Verarbeitungseinrichtungen

Ansprüche

1. Verfahren zur Messung der Größen von in einem einer Leitung
(3) folgenden Fluidstrom (2) dispergierten Partikeln,
5 dadurch gekennzeichnet, dass dem der Leitung (3) folgenden
Fluid-Partikel-Strom eine akustische Schwingung als Erre-
gerschwingung aufgeprägt wird und eine Antwortschwingung
der Partikel auf die Erregerschwingung gemessen wird, und
dass zur Ermittlung der Größen der Partikel eine Auswertung
10 durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwort-
schwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwin-
gungsamplitude und/oder Phasenverschiebung erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die
15 Antwortschwingung der Partikel durch Messung ihrer Schwing-
geschwindigkeit dokumentiert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
dass die Antwortschwingung der Partikel durch Messung ihrer
20 Schwingungsamplitude dokumentiert wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch
gekennzeichnet, dass die Antwortschwingung der Partikel
durch Messung der Phasenverschiebung dokumentiert wird.
25
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch
gekennzeichnet, dass die Antwortgeschwindigkeit mit einem
Laser-Doppler-Anemometer (5) gemessen wird.
- 30 6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch
gekennzeichnet, dass die Erregung und Messung der Schwin-

gungen der Partikel zumindest im Wesentlichen senkrecht zur Strömungsrichtung (2') des Fluid-Partikel-Stroms erfolgen.

5 7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Abschwächung der akustischen Erregerschwingung in der Fluid-Partikel-Suspension berücksichtigt wird.

10 8. Anlage zur Messung der Größen von in einem einer Leitung (3) folgenden Fluidstrom (2) dispergierten Partikeln, dadurch gekennzeichnet, dass enthalten sind:

- Erregereinrichtungen (E), um dem der Leitung (3) folgenden Fluid-Partikel-Strom eine akustische Schwingung als Erregerschwingung aufzuprägen,
- 15 - Detektoreinrichtungen (D), um eine Antwortschwingung der Partikel auf die Erregerschwingung zu messen, und
- Verarbeitungseinrichtungen (V) zur Ermittlung der Größen der Partikel durch Vergleich der Erregerschwingung und der Antwortschwingung hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit, Schwingungsamplitude und/oder Phasenverschiebung.

20

9. Anlage nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektoreinrichtungen (D) ausgelegt sind, um die Schwinggeschwindigkeit der Antwortschwingung der Partikel zu dokumentieren.

25

10. Anlage nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektoreinrichtungen (D) ausgelegt sind, um die Schwingungsamplitude der Antwortschwingung der Partikel zu dokumentieren.

30

11. Anlage nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektoreinrichtungen (D) ausgelegt sind, um die Phasenverschiebung der Antwortschwingung der Partikel zu dokumentieren.
- 5
12. Anlage nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektoreinrichtungen (D) ein Laser-Doppler-Anemometer (5) zur Messung der Antwortgeschwindigkeit enthalten.
- 10
13. Anlage nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Erregereinrichtungen (E) und Detektoreinrichtungen (D) derart angeordnet sind, dass Erregung und Messung der Schwingungen der Partikel zumindest im Wesentlichen senkrecht zur Strömungsrichtung (2') des Fluid-Partikel-Stroms erfolgen.
- 15
14. Anlage nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass Einrichtungen (A) zur Messung der Abschwächung der akustischen Erregerschwingung in der Fluid-Partikel-Suspension enthalten sind.
- 20

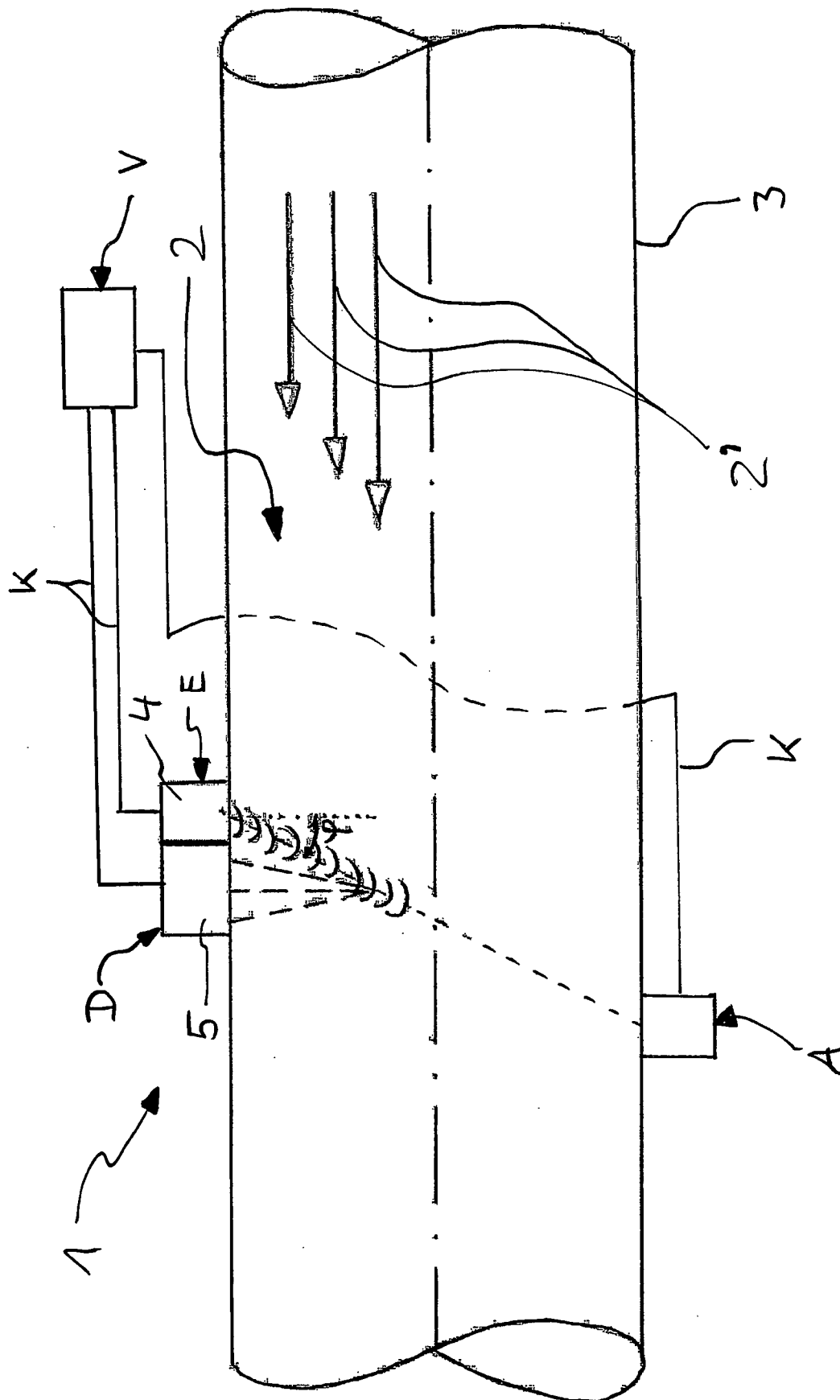


Fig. 1

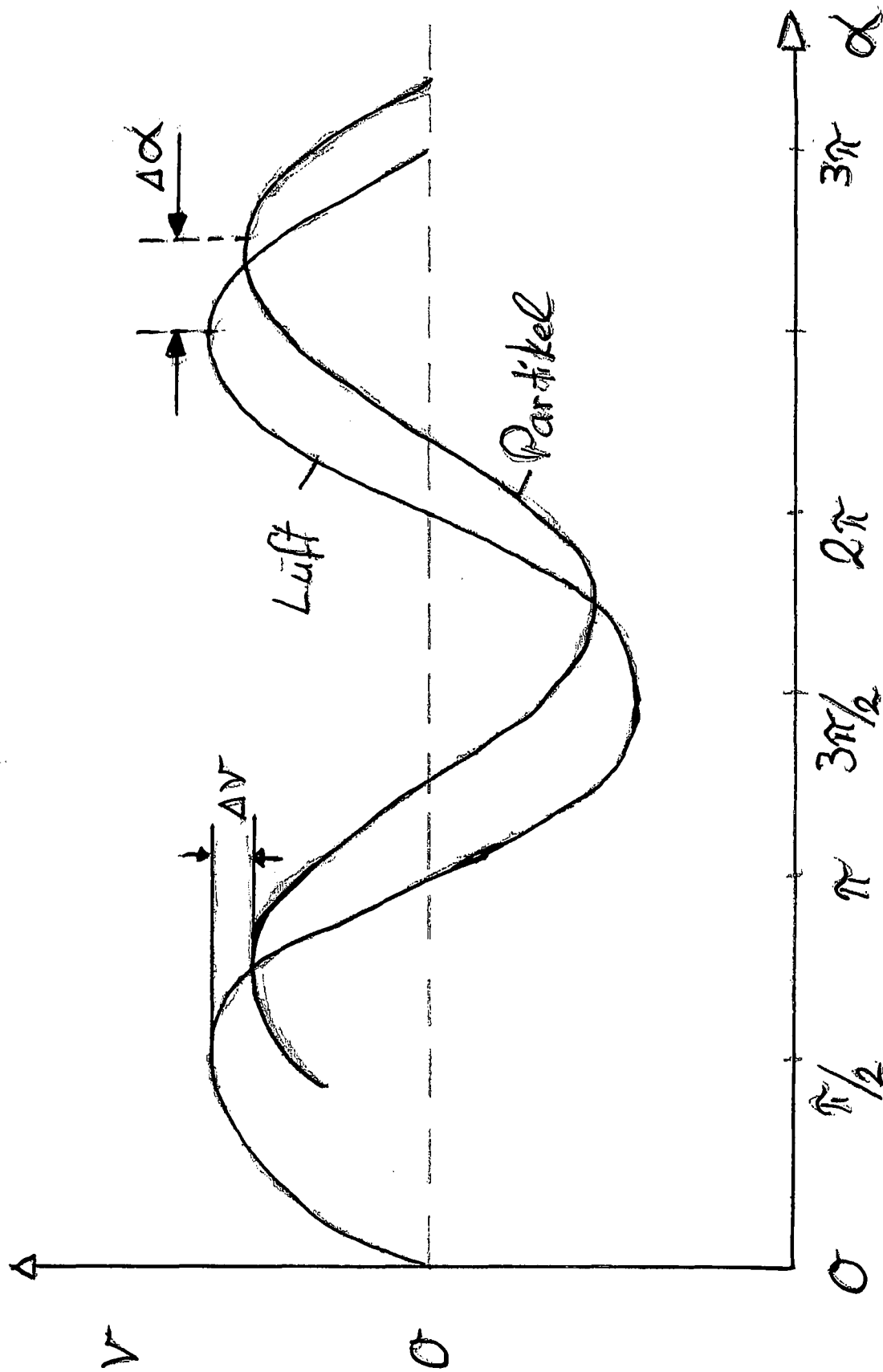


Fig. 2

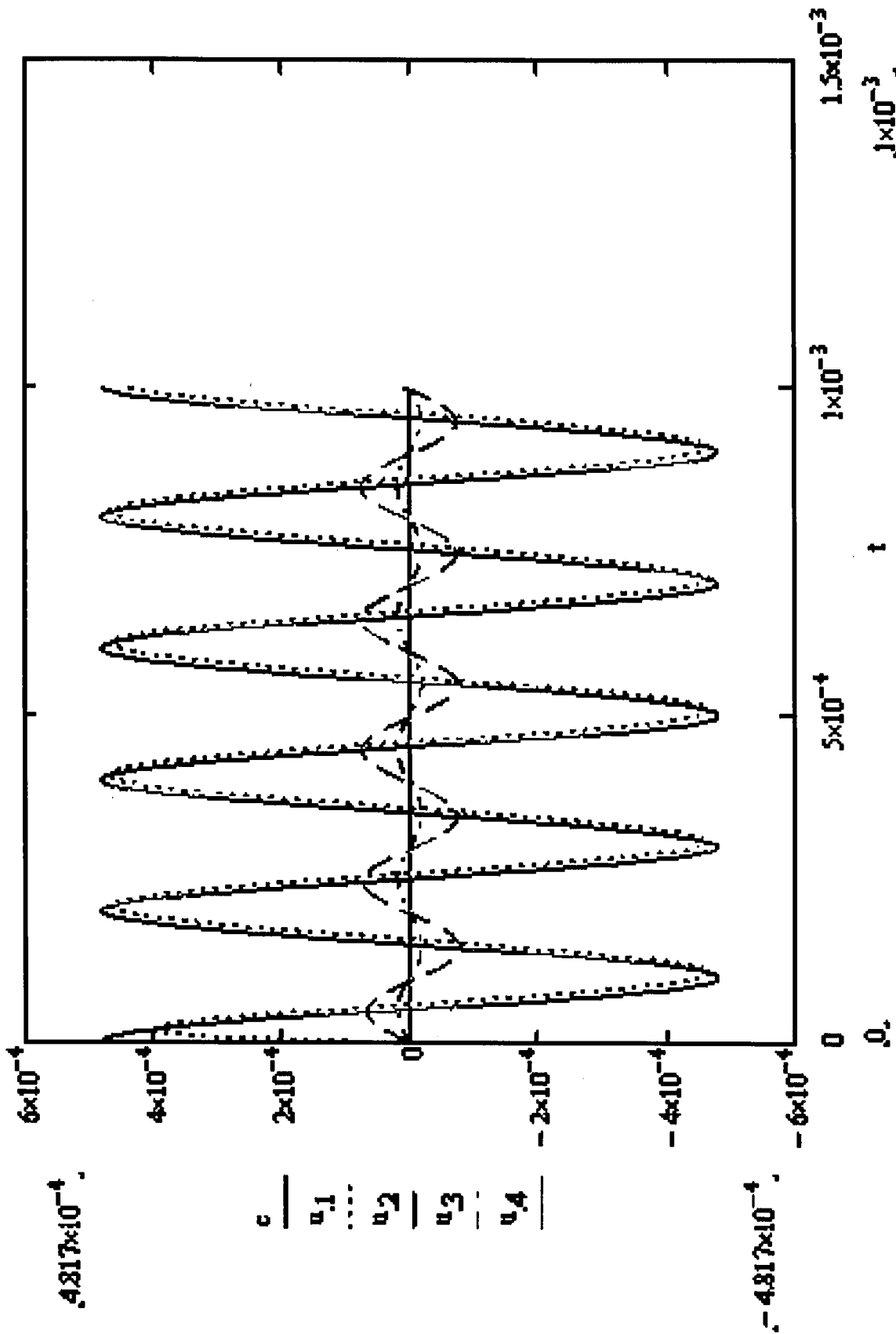


Fig. 3

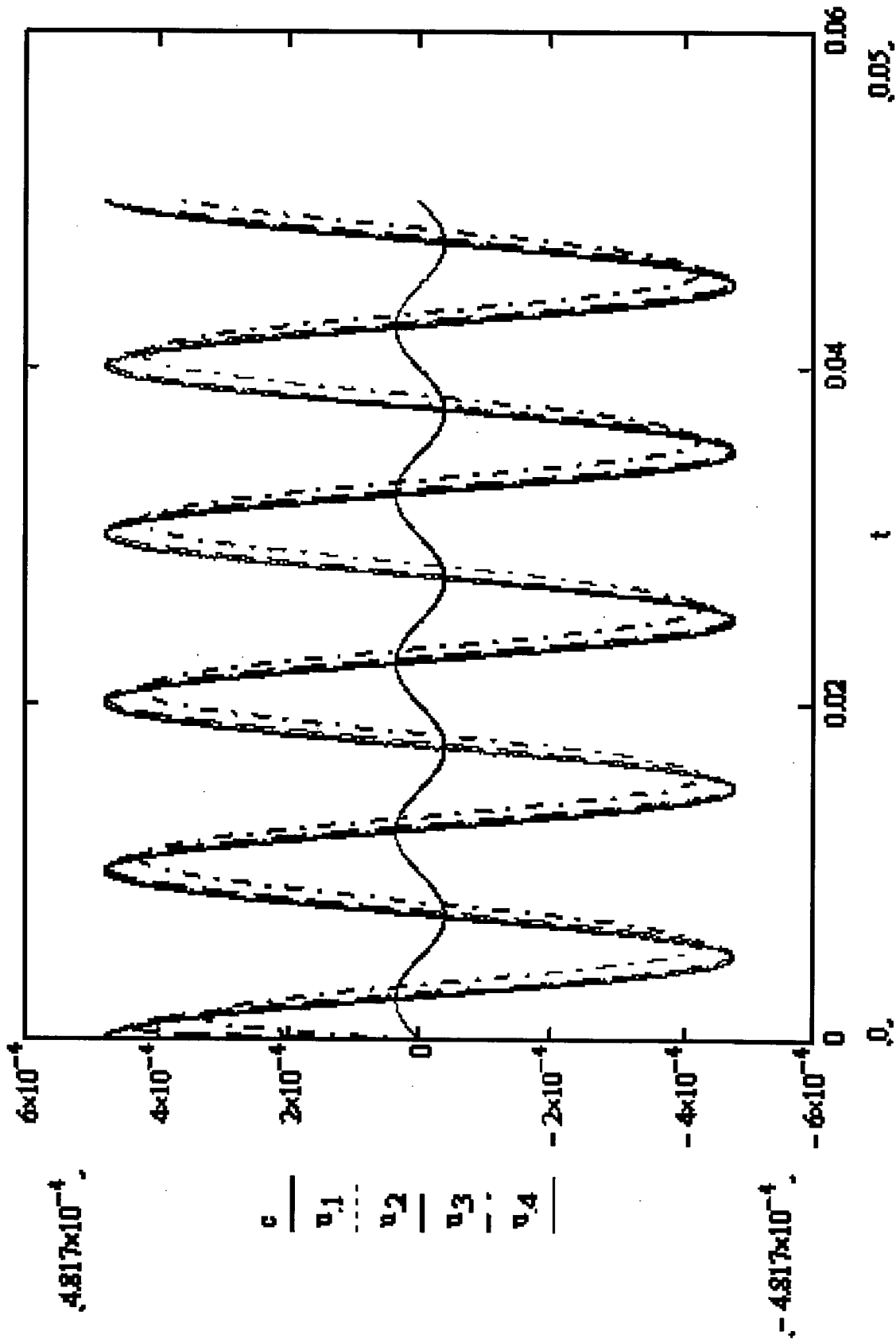


Fig. 4

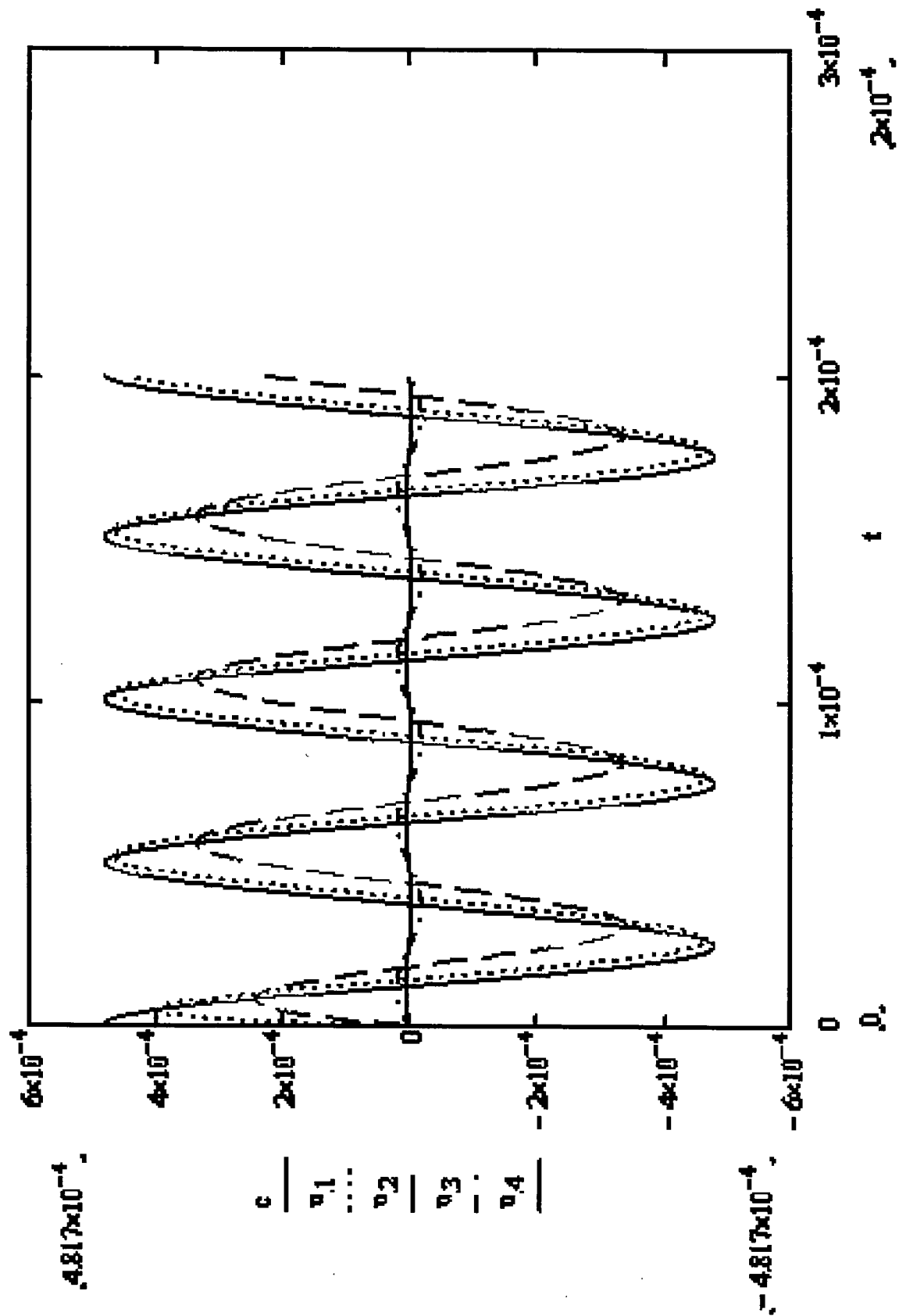


Fig. 5