



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2021 101 409.3**
(22) Anmeldetag: **22.01.2021**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **05.05.2022**

(51) Int Cl.: **G01N 15/00** (2006.01)
G01P 5/20 (2006.01)
G01P 5/26 (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
Physikalischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte
PartGmbH, 38122 Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:
Grosshans, Holger, Dr., 38104 Braunschweig, DE

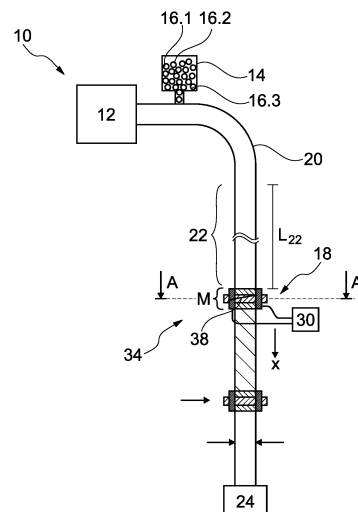
(56) Ermittelte Stand der Technik:

US	8 470 151	B2
US	6 049 382	A
EP	3 431 264	B1
WO	2014/ 106 078	A2

**GROSSHANS, Holger ; PAPALEXANDRIS,
Miltiadis V.: Exploring the mechanism of inter-
particle charge diffusion. In: The European
physical journal: applied physics, Vol. 82, 2018,
No. 1, Art. 11101 (9 S.). - ISSN 1286-0042**
Norm DIN ISO 9276-1 2004-09-00. Darstellung
der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil
1: Grafische Darstellung (ISO 9276-1:1998). URL:
http://perinorm/Perinorm-Volltexte/2016-11_Grunbestand/CD21DE_02/9560648/9560648.pdf? [abgerufen am 2018-03-13]
**SUSANTI, Nuki ; GROSSHANS, Holger:
Measurement of the deposit formation during
pneumatic transport of PMMA powder. In:
Advanced powder technology, Vol. 31, 2020, S.
3597-3609. - ISSN 0921-8831**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts von elektrischen Ladungen von Partikeln in einem Fluidstrom und Fluidstromladungsmessgerät**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts (K) von elektrischen Ladungen von Partikeln (16) in einem Fluidstrom, mit den Schritten (a) Leiten des Fluidstroms, der Partikel (16) enthält, durch eine Fluidleitung (20), (b) orts aufgelöstes Bestimmen einer Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit, in einem Messbereich ohne elektrisches Messfeld, (c) Anlegen eines elektrischen Messfelds quer zur Strömungsrichtung (S) im Messbereich, (d) orts aufgelöstes Bestimmen einer Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) im Messbereich und (e) Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts (K), der eine elektrostatische Aufladung der Partikel (16) beschreibt, aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts von elektrischen Ladungen in Partikeln in einem Fluidstrom. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Fluidstromladungsmessgerät.

[0002] Beim Transport von Partikeln in einem Fluidstrom wie einem Gasstrom, insbesondere einem Luftstrom, kommt es oft zu einer elektrostatischen Aufladung der Partikel. Wird diese elektrostatische Aufladung zu groß, kann es zu einer Funkenentladung kommen. Das ist besonders dann nachteilig, wenn eine exotherme chemische Reaktion zwischen den Partikeln und dem Gas des Gasstroms möglich ist. Es kann dann zu einer Explosion kommen.

[0003] Die Entstehung von elektrostatischer Aufladung von Partikeln, die mittels eines Fluidstroms gefördert werden, ist Gegenstand intensiver Forschungen, wird bislang aber nur schlecht verstanden.

[0004] Zur Bestimmung eines Ladungskennwerts in Form einer Gesamtladung von elektrischen Ladungen von Partikeln in dem Fluidstrom werden im Moment sogenannte Faraday-Becher verwendet. Die Partikel induzieren Ladungen am Faraday-Becher. Diese werden gemessen. Ein solcher Aufbau ist im Paper von Susanti und Großhans „Measurement of the deposit formation during pneumatic transport of PMMA powder“, in: Advanced powder technology, Vol. 31, 2020, S. 3597-3609. - ISSN 0921-8831 beschrieben. Nachteilig an diesem Messverfahren ist, dass nur die Summe der Ladungen erfasst wird, nicht aber die jeweilige positive und negative Aufladung.

[0005] Nachteilig ist zudem, dass die elektrostatische Ladung nicht orts aufgelöst messbar ist.

[0006] Aus der WO 2014/106078 A2 sind Sonden zur Überwachung elektrostatischer Phänomene in schwierigen Umgebungen, wie beispielsweise in Wirbelschichtreaktoren, bekannt. Diese Sonden umfassen eine beschichtete oder unbeschichtete Statik-Sonde zur Messung des elektrischen Feldes und/oder des Ladungszustands der Partikel, eine oszillierende elektrische Feldsonde zur Messung des elektrischen Feldes, eine Sonde mit geteiltem elektrischem Feld zur Messung des elektrischen Feldes und eine Hochfrequenz-Antennensonde zum Aufspüren elektrostatischer Entladungen. Mittels einer modifizierten Oberfläche wird erreicht, dass auf die Elektrode auftreffende Partikel die triboelektrische Aufladung der Sonde vermindern.

[0007] In der US 6 049 382 A werden eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Charakterisierung von Sprays beschrieben, die aus kugelförmigen Partikeln bestehen. Eine Laserquelle erzeugt einen kollimierten Laserstrahl, der durch das zu charakterisierende Spray geführt wird. Der Laserstrahl fällt mit der x-Achse eines kartesischen Koordinatensystems zusammen, das sich in einer senkrecht zur Sprühachse verlaufenden Messebene befindet. 90°-Streuung, die von dem Spritzmaterial in einem kleinen Sondenvolumen erzeugt wird, das am Schnittpunkt des Laserstrahls und des Objektvolumens des Streuungsauffangmittels gebildet wird, wird erfasst. Zusätzliche Erfassungsmittel erfassen die Abschwächung des Laserstrahls, der die Messebene durchquert. Die optischen Systeme sind mit Fotodetektoren und Signalverarbeitungseinheiten gekoppelt, die in der Lage sind, elektrische Signale proportional zu den empfangenen Lichtintensitäten zu erzeugen. Eine Quereinrichtung bewegt den Sprühnebel in Richtung des Laserstrahls und senkrecht dazu, um nacheinander eine tomographische Aufzeichnung der Streu- und Dämpfungsaktivität in Punkten des Sprühnebels zu erhalten, die ein kartesisches Gitter innerhalb der Messebene bilden. Konzentrationsmessmittel sind mit den elektrischen Ausgangssignalen der Dämpfung und Streuung gekoppelt, um die Information über die Anzahldichte des Sprays in den Knoten des tomographischen Gittersystems zu gewinnen.

[0008] In der US 8 470 151 B2 wird ein mikrofluidischer Pumpansatz vorgestellt, der die Wanderwellen-Dielektrophorese (tw-DEP) von Mikropartikeln nutzt. Die Strömung wird direkt in den mikrofluidischen Objekten erzeugt, indem elektromechanische Effekte in der Flüssigkeit durch Mikroelektroden induziert werden. Die fluidischen Antriebsmechanismen aufgrund der Partikel-Fluid- und Partikel-Partikel-Wechselwirkungen unter Wanderwellen-Dielektrophorese werden analysiert, und das induzierte Strömungsfeld wird aus numerischen Simulationen gewonnen.

[0009] In der EP 3 431 264 B1 ist ein 3D-Drucker beschrieben, der eine optische Bestimmungsvorrichtung aufweist, mittels der einen Parameter zur Charakterisierung der Strömungseigenschaften des die Prozesskammer durchströmenden Gasstroms eignet, bestimmt wird. Die optische Bestimmungsvorrichtung hat eine optische Messeinheit zum optischen Messen eines Messwerts innerhalb der Prozesskammer, wobei der Messwert in Beziehung mit dem Gasstrom steht. Eine Auswerteeinheit bestimmt aus dem Messwert den

zumindest einen Parameter. Die Messwerte werden an unterschiedlichen Orten innerhalb der Prozesskammer gemessen. Dadurch der Partikelstrom beim Drucken gut gesteuert werden.

[0010] Im Paper von Großhans et al. „Exploring the mechanism of inter-particle charge diffusion. In: The European physical journal: applied physics, Vol. 82, 2018, No. 1, Art. 11101 (9 8.), ISSN 1286-0042 wird ein numerisches mathematisches Modell zur interpartikulären Ladungsübertragung vorgestellt.

[0011] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0012] Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren zum Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts von elektrischen Ladungen von Partikeln in einem Fluidstrom, mit den Schritten: (a) Leiten des Fluidstroms, der Partikel enthält, durch eine Fluidleitung, (b) orts aufgelöstes Bestimmen einer Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit, in einem Messbereich ohne elektrisches Messfeld, (c) Anlegen eines elektrischen Messfelds quer zur Strömungsrichtung im Messbereich, (d) orts aufgelöstes Bestimmen einer Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit im Messbereich und (e) Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts, der eine elektrostatische Aufladung der Partikel beschreibt, aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten.

[0013] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Fluidstromladungsmessgerät mit (a) einer Fluidleitung, (b) einem Messfelderzeuger zum Erzeugen eines elektrischen Messfelds in einem Messbereich der Fluidleitung, (c) einem Partikelgeschwindigkeitsmesser, der ausgebildet ist zum automatischen Bestimmen einer orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeitsverteilung mittels Partikelbildvelozimetrie und (d) einer Auswerteeinheit, die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten: (i) Messen einer orts aufgelösten Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit mittels der Partikelbildvelozimetrie-Messeinheit, ohne dass der Messfelderzeuger ein elektrisches Messfeld erzeugt, (ii) Erzeugen des elektrischen Messfelds mittels des Messfelderzeugers und (iii) Messen einer orts aufgelösten Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit mittels der Partikelbildvelozimetrie-Messeinheit und (iv) Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts, der eine elektrostatische Aufladung der Partikel beschreibt, aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten.

[0014] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass orts aufgelöste Informationen über die Ladungsverteilung im Fluidstrom erhalten werden können. Anders bei Verfahren nach dem Stand der Technik ist es möglich, etwaig vorhandene Bereiche positiver Ladung und negativer Ladung zu erfassen. Bei Verfahren, die einen Faraday-Becher verwenden, wird lediglich die Gesamtladung bestimmt. Elektrostatische Felder, die zwischen Bereichen des Fluidstroms und/oder zwischen Partikeln ausgebildet sein können, können mit Verfahren nach dem Stand der Technik nicht erfasst werden, wohl aber mit dem erfindungsgemäßen Verfahren.

[0015] Günstig ist es, dass eine Explosionsgefahr in der Regel deutlich besser erfasst werden kann, da die Voraussetzungen für Zündfunken, nämlich ein zu großes elektrostatisches Feld, das unabhängig von dem etwaig anliegenden elektrischen Messfeld vorhanden ist, mit höherer Sicherheit bestimmbar ist.

[0016] Günstig ist zudem, dass der Ladungskennwert berührungsfrei gemessen werden kann. Es kommt daher zu keiner nennenswerten Beeinflussung des Fluidstroms und/oder der Partikel aufgrund der Messung. Insbesondere wird zur Messung des Ladungskennwerts vorzugsweise kein Teilstrom aus dem Fluidstrom ausgekoppelt.

[0017] Günstig ist es daher, wenn der Ladungskennwert partikelverlustfrei gemessen wird. In anderen Worten ist es nicht notwendig, dem Fluidstrom zumindest zeitweise Partikel zu entnehmen, um den Ladungskennwert zu bestimmen.

[0018] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem elektrischen Messfeld vorzugsweise ein zumindest im Wesentlichen homogenes Messfeld verstanden. Unter einem zumindest im Wesentlichen homogenen Messfeld wird insbesondere verstanden, dass das Messfeld zwar inhomogen sein kann, dass diese Inhomogenität aber so schwach ausgebildet ist, dass sie die Messunsicherheit bei der Bestimmung des Ladungskennwerts um höchstens 5 % erhöht.

[0019] Unter dem orts aufgelösten Bestimmen der Partikelgeschwindigkeit wird insbesondere verstanden, dass die Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von zumindest einer Raumkoordinate bestimmt wird. Insbesondere verläuft diese Raumkoordinate quer zu einer Strömungsrichtung des Fluidstroms.

[0020] Die Partikelgeschwindigkeiten werden vorzugsweise zumindest bezüglich zweier Raumkoordinaten bestimmt. Insbesondere umfasst das Bestimmen der Partikelgeschwindigkeiten eine Partikelgeschwindigkeitskomponente quer zur Strömungsrichtung und/oder längs der Strömungsrichtung. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass die Partikelgeschwindigkeit in allen drei Raumkoordinaten bekannt ist. Es ist zudem möglich, nicht aber notwendig, dass die Partikelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von zwei oder drei Raumkoordinaten bekannt sind, es reicht aber grundsätzlich aus, wenn die Partikelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von einer Raumkoordinate bekannt sind.

[0021] Unter dem Merkmal, dass das Messfeld quer zur Strömungsrichtung angelegt wird, wird insbesondere verstanden, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass das elektrische Messfeld im mathematischen Sinne senkrecht zur Strömungsrichtung angelegt wird. Unter der Strömungsrichtung wird die makroskopische Strömungsrichtung des Fluidstroms verstanden. Ist die Fluidleitung im Messbereich, wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, prismatisch, handelt es sich also beispielsweise um ein nicht gekrümmtes Rohr, entspricht die Strömungsrichtung der Längsrichtung der Fluidleitung.

[0022] Unter dem Merkmal, dass zumindest ein Ladungskennwert bestimmt wird, wird insbesondere verstanden, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass genau ein Ladungskennwert ermittelt wird. Es kann sich bei diesem Ladungskennwert beispielsweise um einen Maximalwert der Ladungsdichte handeln. Alternativ oder zusätzlich kann es sich um den Betrag des maximalen Gradienten handeln.

[0023] Unter dem Bestimmen der Partikelgeschwindigkeit wird insbesondere das Bestimmen von zeitlichen Mittelwerten verstanden. Die zeitlichen Mittelwerte beziehen sich vorzugsweise auf eine Mittelungszeit zwischen einer Sekunde und einer Minute.

[0024] Unter einem Durchmesser gesprochen wird der Sauterdurchmesser nach DIN ISO 9276 verstanden.

[0025] Besonders günstig ist es aber, wenn das Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts das Bestimmen einer Vielzahl an Ladungskennwerten ist. Insbesondere handelt es sich bei den Ladungskennwerten um Funktionswerte einer orts aufgelösten Ladungsverteilung. Die Ladungsverteilung ordnet zumindest einer Raumkoordinate quer zur Strömungsrichtung die Ladungsdichte zu oder eine Größe, aus der die Ladungsdichte bestimmt werden kann. Die Ladungsdichte wird angegeben in Ladung pro Volumeneinheit oder Ladung pro Flächeneinheit.

[0026] Alternativ oder zusätzlich ist das Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts ein Bestimmen zumindest eines Ladungsgradienten. Der Ladungsgradient ergibt sich durch Ableitung der Ladungsverteilung. Aus dem Ladungsgradienten kann das lokal vorliegende elektrische Feld bestimmt werden, das aufgrund der elektrostatischen Aufladung der Partikel entsteht.

[0027] Bei dem Fluid handelt es sich vorzugsweise um ein Gas, insbesondere um Luft. Vorzugsweise ist der partikelhaltige Fluidstrom durch elektrischen Funken zündbar. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass es aufgrund eines Zündfunken zu einer chemischen Reaktion zwischen den Partikeln und zumindest einem Bestandteil des Fluidstroms oder zwischen Bestandteilen des Fluidstroms kommen kann. In diesem Fall ist es besonders wichtig, sicherzustellen, dass die elektrostatische Aufladung nicht zu stark wird.

[0028] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit mittels Partikelbildvelozimetrie durchgeführt. Alternativ oder zusätzlich wird das Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit mittels Laser-Doppler-Anemometrie durchgeführt. Alternativ oder zusätzlich wird das orts aufgelöste Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit vorzugsweise mittels Partikelbildvelozimetrie und/oder mittels Laser-Doppler-Anemometrie durchgeführt. Mit diesen Messverfahren sind vergleichsweise hohe Messgeschwindigkeiten, Ortsauflösungen und geringe Messunsicherheiten erreichbar.

[0029] Das orts aufgelöste Bestimmen umfasst die folgenden Schritte: (a) der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit: (i) Aufnehmen eines ersten Messfeldlos-Bilds einer Vielzahl an Partikeln zu einem ersten Zeitpunkt, (ii) Aufnehmen eines zweiten Messfeldlos-Bilds der Partikel zu einem zweiten Zeitpunkt, der um einen Zeitversatz später liegt, (iii) Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit aus den Messfeldlos-Bildern und (b) der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit: (i) Aufnehmen eines ersten Mitfeld-Bilds einer Vielzahl an Partikeln zu einem dritten Zeitpunkt, (ii) Aufnehmen eines zweiten Bild der Partikel zu einem vierten Zeitpunkt, der um einen, insbesondere den gleichen, Zeitversatz später liegt, und (iii) Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit aus den Mitfeld-Bildern.

[0030] Beim Aufnehmen der Bilder werden die Partikel im Fluidstrom vorzugsweise mit einem Lichtblatt bestrahlt, das vorzugsweise mittels eines Lasers erzeugt wird. Auf diese Weise werden die Positionen derjenigen Partikel bestimmt, die vom Lichtblatt erfasst werden. Das Aufnehmen der Bilder erfolgt vorzugsweise mit einer Kamera, die in optischer Achse quer zur Strömungsrichtung verläuft. Damit verläuft die optische Achse vorzugsweise zumindest im Wesentlichen senkrecht zum Lichtblatt.

[0031] Vorzugsweise beträgt ein Winkel β_H zwischen dem Lichtblatt und einer Horizontalen höchstens 22° , insbesondere höchstens 15° . In diesem Fall ist die Gravitationskraft vernachlässigbar.

[0032] Günstig ist es, wenn der Zeitversatz höchstens drei Sekunden, insbesondere höchstens eine Sekunde, vorzugsweise höchstens 0,5 Sekunden beträgt. Alternativ oder zusätzlich ist es günstig, wenn der Zeitversatz so gewählt ist, dass sich die Partikel zwischen dem ersten Zeitpunkt und dem zweiten Zeitpunkt um höchstens 30 Millimeter, insbesondere höchstens 15 Millimeter, fortbewegt haben. Hierbei handelt es sich jeweils um Mittelwerte.

[0033] Es ist möglich, dass die Zahl der Partikel, mittels derer die Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit bestimmt wird, sich von der Zahl der Partikel, mittels derer die Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit bestimmt wird, um höchstens 30 % unterscheidet. In der Regel werden die Messzeitlos-Partikelgeschwindigkeit und die Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit aber zumindest überwiegend an unterschiedlichen Partikeln bestimmt.

[0034] Günstig ist es, wenn das orts aufgelöste Bestimmen der Messzeitlos-Partikelgeschwindigkeit die folgenden Schritte aufweist: (i) in einem ersten Zeitraum Aufnehmen eines Messfeldlos-Bilds einer Vielzahl von Partikeln, die von einem Lichtblatt bestrahlt werden, wobei sich das Lichtblatt entlang der Strömungsrichtung des Fluidstroms erstreckt, (ii) im ersten Zeitraum Verändern einer Lichteigenschaft, insbesondere einer Helligkeit oder einer Farbe, des Lichtblatts und (iii) Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit aus dem Messfeldlos-Bild. Alternativ oder zusätzlich weist das orts aufgelöste Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit die folgenden Schritte aufweist: (i) in einem zweiten Zeitraum Aufnehmen eines zweiten Mitfeld-Bilds einer Vielzahl von Partikeln, die vom Lichtblatt bestrahlt werden, (ii) im zweiten Zeitraum Verändern einer Lichteigenschaft, insbesondere einer Helligkeit oder einer Farbe, des Lichtblatts und (iii) Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit aus dem Mitfeld-Bild.

[0035] Um den Einfluss des Anlegens des elektrischen Messfelds vom Einfluss von Turbulenzen auf die Partikel unterscheiden zu können, umfasst das Verfahren vorzugsweise die Schritte: (a) Hinzufügen von Tracerpartikeln zum Fluidstrom, (b) Bestimmen einer Luftgeschwindigkeit des Fluidstroms mittels Partikelbildvelozimetrie und (c) Bestimmen des Ladungskennwerts aus der orts aufgelösten Luftgeschwindigkeit, der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit und der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (mit und ohne elektrischem Feld). Diese Schritte werden vorzugsweise zumindest dann durchgeführt, wenn sich die Reynolds-Zahl um mehr als 10%, insbesondere zumindest 20%, geändert hat.

[0036] Vorzugsweise wird das Verfahren an Partikeln durchgeführt, deren Durchmesser zumindest 10 Mikrometer beträgt. Vorzugsweise beträgt deren Durchmesser höchstens 500 Mikrometer. Ein Durchmesser der Tracerpartikel ist vorzugsweise kleiner als der Durchmesser der Partikel, insbesondere beträgt er vorzugsweise höchstens ein Fünftel des Durchmessers der Partikel. Günstig ist es, wenn Tracerpartikel einen Durchmesser von zumindest 1 Mikrometer und/oder höchstens 10 Mikrometer haben.

[0037] Günstig ist es, wenn der zumindest eine Ladungskennwert eine orts aufgelöste Ladungsverteilung ist.

[0038] Vorzugsweise umfasst das Verfahren den Schritt eines Ausgebens einer Warnmeldung, wenn der zumindest eine Ladungskennwert außerhalb eines Soll-Ladungskennwertintervalls liegt. Beispielsweise handelt es sich bei dem Soll-Ladungskennwertintervall um ein Intervall, in dem ein Maximum der Ladungsverteilung liegt. Liegt zumindest einer der Ladungskennwerte außerhalb des Soll-Ladungskennwertintervalls, so deutet das darauf hin, dass die elektrostatische Aufladung der Partikel im Fluidstrom zu groß geworden ist.

[0039] Vorzugsweise erfolgt das Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten, die anhand der Formel

$$Q(y,z) = \frac{\pi \rho C_d r^2}{2E \cdot \cos \beta} \left[\left| \bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E} \right| \left(\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E} \right) - \left| \bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E} \right| \left(\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta \right) \right] \text{ erfolgt, mit}$$

ρ der Luftdichte,

β	dem Winkel zwischen den elektrischen Messfeldlinien und dem Lichtblatt,
C_d	dem Strömungswiderstandskoeffizienten,
r	dem Sauterdurchmesser nach DIN ISO 9276 der Partikel,
\bar{u}_β	der Geschwindigkeitskomponente des Fluidstroms im Lichtblatt quer zur Strömungsrichtung,
\bar{v}_β	der Geschwindigkeitskomponente der Partikel im Lichtblatt quer zur Strömungsrichtung ohne elektrisches Messfeld und
$\bar{v}_{\beta,E}$	der Geschwindigkeitskomponente der Partikel im Lichtblatt quer zur Strömungsrichtung bei angelegtem elektrischem Messfeld.

[0040] Die Herleitung dieser Formel wird weiter unten angegeben. Unter dem Merkmal, dass der zumindest eine Ladungskennwert anhand der angegebenen Formel bestimmt wird, wird insbesondere verstanden, dass eine Rechnung durchgeführt wird, deren Ergebnis um maximal 10 %, insbesondere maximal 5 %, von dem Ergebnis abweicht, was mit der angegebenen Formel erreicht worden wäre. In anderen Worten ist es unbeachtlich, ob die Formel direkt bei der Berechnung implementiert, das heißt verwendet wird. Maßgeblich ist lediglich, dass die Messergebnisse so verrechnet werden, dass sie zumindest im Wesentlichen dem Ergebnis entsprechen, das anhand der angegebenen Formel erhalten wird.

[0041] Alternativ oder zusätzlich wird das Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten anhand der Formel $Q(y,z) = \pi \rho C_d r^2 \left| \bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta + \bar{v}_{\beta,E} \right| \frac{\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta + \bar{v}_{\beta,E}}{2E \cdot \cos \beta}$ durchgeführt.

[0042] Vorzugsweise wird das Verfahren an einem turbulenten Fluidstrom durchgeführt. An turbulenten Fluidströmen ist bislang keine aussagekräftige Messung eines Ladungskennwerts möglich.

[0043] Günstig ist es, wenn der Fluidstrom zumindest im Wesentlichen vertikal verläuft. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass ein Winkel zwischen dem Vektor der Strömungsgeschwindigkeit und der Vertikalen höchstens 25°, insbesondere höchstens 15°, beträgt.

[0044] Vorzugsweise umfasst das Verfahren die Schritte (a) Verändern einer Lage des Lichtblatts relativ zur Fluidleitung und (b) Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten. Günstig ist es, wenn der zumindest eine Ladungskennwert für eine Vielzahl an unterschiedlichen Lagen des Lichtblatts erfasst wird.

[0045] Ein erfindungsgemäßes Fluidstromladungsmessgerät ist vorzugsweise ausgebildet zum automatischen Abgeben eines Warnsignals, wenn der Ladungskennwert außerhalb des Soll-Ladungskennwertintervalls liegt. Das Abgeben eines Warnsignals kann beispielsweise das Abgeben eines akustischen, optischen, elektrischen oder elektromagnetischen Signals sein. Vorzugsweise ist das Warnsignal ein elektronisches Signal, das die Nachricht kodiert, dass der Ladungskennwert außerhalb des Soll-Ladungskennwertintervalls liegt. Günstig ist es, wenn das Fluidstromladungsmessgerät ausgebildet ist zum Abgeben dieser Warnmeldung über ein BusSystem.

[0046] Erfindungsgemäß ist zudem eine Pneumatikfördervorrichtung zum Transportieren von Partikeln mittels eines Fluidstroms mit (a) einem Fluidstromerzeuger, insbesondere einem Gebläse oder einem Kompressor, zum Erzeugen des Fluidstroms, insbesondere eines Gasstroms, (b) einem erfindungsgemäßen Fluidstromladungsmessgerät. Vorzugsweise besitzt die Pneumatikfördervorrichtung eine Partikelzuführung zum Zuführen von Partikeln zum Fluidstrom. Bei einer derartigen Pneumatikfördervorrichtung führt das erfindungsgemäße Fluidstromladungsmessgerät dazu, dass Schäden durch zu große elektrostatische Ladungen der Partikel stark vermindert werden können.

[0047] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 in der **Fig. 1a** eine schematische Seitenansicht einer erfindungsgemäßen Pneumatikfördervorrichtung mit einem erfindungsgemäßen Fluidstromladungsmessgerät zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens, in d **Fig. 1b** einen Querschnitt A-A gemäß **Fig. 1** und in **Fig. 1c** eine Vergrößerung des Bereichs B gemäß **Fig. 1a**.

[0048] Fig. 1a zeigt eine erfindungsgemäße Pneumatikfördervorrichtung 10 mit einem Fluidstromerzeuger 12 in Form eines Gebläses zum Erzeugen eines Fluidstroms, einer Partikelzuführung 14 zum Zuführen von schematisch eingezeichneten Partikeln 16.i und einem erfindungsgemäßen Fluidstromladungsmessgerät 18.

[0049] Der Fluidstromerzeuger 12 ist im vorliegenden Fall ein Gebläse zum Erzeugen eines Fluidstroms in Form eines Druckluftstroms mit einem Druck von beispielsweise $p = 300 \text{ kPa}$. Bei den Partikeln 16.i kann es sich beispielsweise um Lebensmittelpartikel handeln, beispielsweise Tee, Kaffee oder Mehl.

[0050] Der Fluidstrom strömt durch eine Fluidleitung 20. Es ist günstig, wenn die Fluidleitung 20 einen Turbulenzbildungsabschnitt 22 aufweist, dessen Länge L_{22} vorzugsweise zumindest 2 Meter, insbesondere zumindest 3 Meter beträgt. Vorzugsweise beträgt die Länge L_{22} höchstens 100 Meter. Im Turbulenzbildungsabschnitt 22 bildet sich eine turbulente Strömung des Fluidstroms, die sich im in Strömungsrichtung S hinteren Abschnitt hinsichtlich ihres Turbulenzmaßes nicht mehr ändert. Günstig ist es, wenn die Länge L_{22} zumindest das Zehnfache eines Durchmessers der Fluidleitung 20 beträgt.

[0051] In Strömungsrichtung S hinter dem Turbulenzbildungsabschnitt 22 ist das Fluidstromladungsmessgerät 18 angeordnet. In Strömungsrichtung S hinter dem Fluidstromladungsmessgerät 18 ist schematisch eine Partikelsenke 24 angeordnet. Bei der Partikelsenke 24 kann es sich beispielsweise um ein Lager für die Partikel 16.i handeln. Alternativ kann es sich bei der Partikelsenke aber auch um eine Maschine zum Weiterverarbeiten der Partikel, beispielsweise zum Verpacken, Umformen, Pressen oder dergleichen handeln.

[0052] Es ist günstig und stellt unabhängig von den ansonsten für die Ausführungsform genannten Merkmalen eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass die Fluidleitung 20 im Turbulenzbildungsabschnitt 22 und einem Messabschnitt 26 gleiche Querschnitte hat. Es handelt sich hierbei um eine Gleichheit im technischen Sinne, das heißt, dass es möglich ist, dass sich die Querschnitte und/oder die Querschnittsformen der Fluidleitung 20 ändern können, dass diese Änderung jedoch so klein ist, dass sie Messunsicherheit bei der Messung eines zu messenden Ladungskennwerts K zu einer Messunsicherheit von höchstens 10 % führt.

[0053] Fig. 1b zeigt einen Querschnitt A - A gemäß Fig. 1a. Es ist zu erkennen, dass das Fluidstrom-Ladungsmessgerät 18 einen Messfelderzeuger 28 aufweist. Der Messfelderzeuger 28 umfasst eine Spannungsquelle 30 sowie Elektroden 32.1, 32.2. Zwischen den Elektroden 32.1, 32.2 bildet sich ein elektrisches Feld E , das in guter Näherung als homogen betrachtet werden kann. Der Messfelderzeuger 28 ist eingerichtet zum Erzeugen eines Felds von zumindest $E = 1 \text{ kV/m}$. Vorzugsweise ist das elektrische Feld kleiner als $E = 2 \text{ MV/m}$.

[0054] Das elektrische Feld liegt in einem Messbereich M an. Das Fluidstromladungsmessgerät 18 umfasst zudem einen Partikelgeschwindigkeitsmesser 34, der im vorliegenden Fall durch eine Partikelbildvelozimetrie-Messeinheit gebildet ist. Die Partikelbildvelozimetrie-Messeinheit 34 umfasst einen Laser 36 (siehe Fig. 1b) zum Erzeugen eines Lichtblatts 38 sowie eine Kamera 40. Mittels einer Auswerteeinheit 40 werden von der Kamera 40 aufgenommene Bilder analysiert und daraus eine Partikelgeschwindigkeitsverteilung $v(y,z)$ bestimmt. Durch Mitteln über eine Mittelungszeit τ_M von beispielsweise $\tau_M = 60 \text{ Sekunden}$ wird eine gemittelte Partikelgeschwindigkeitsverteilung $\bar{v}(y,z)$.

[0055] Ein erfindungsgemäßes Verfahren wird dadurch durchgeführt, dass zunächst die Partikelgeschwindigkeit orts aufgelöst bestimmt wird, sodass die Partikelgeschwindigkeitsverteilung $v(y,z)$ erhalten wird. Dazu werden beispielsweise zwei Bilder, die Messfeldlos-Bilder genannt werden, da kein elektrisches Feld E anliegt, aufgenommen. Die beiden Messfeldlos-Bilder werden nacheinander zu einem ersten Zeitpunkt t_1 und t_2 aufgenommen. Die beiden Zeitpunkte sind um einen Zeitversatz $\tau_V = t_2 - t_1$ voneinander zeitlich beabstandet.

[0056] Nach einer Wartezeit τ_W nach dem zweiten Zeitpunkt t_2 steuert die Auswerteeinheit 42 die Spannungsquelle 30 so an, dass eine Spannung U_{38} zwischen den Elektroden 32.1, 32.2 angelegt wird. Die Wartezeit τ_W ist möglichst klein und beträgt im Idealfall höchstens 500 Millisekunden.

[0057] Es werden dann von der Kamera 40 zwei Mitfeld-Bilder zu einem dritten Zeitpunkt t_3 bzw. einem vierten Zeitpunkt t_4 aufgenommen. Aus diesen Bildern wird eine Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit v_E bestimmt. Es sei darauf hingewiesen, dass es unbeachtlich ist, ob zuerst die Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit v_E bestimmt wird und danach die Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit v oder umgekehrt.

[0058] Alternativ kann die Partikelgeschwindigkeitsverteilung $v(y,z)$ auch mittels Laser-Doppler-Anemometrie bestimmt werden. Wiederum alternativ ist es möglich, dass die Partikelgeschwindigkeitsverteilung $v(y,z)$ mittels Einbild-Partikelbildvelozimetrie bestimmt wird. Bei diesem Verfahren wird eine Lichteigenschaft, beispielsweise die Helligkeit oder die Farbe, des Lichtblatts 38 während der Aufnahme des jeweiligen Bilds geändert. Auf dem jeweiligen Bild, also dem Messfeldlos-Bild und dem Mitfeld-Bild sind dann Trajektorien der Partikel 16.i zu sehen, wobei die Änderung der Lichteigenschaft die Änderung der Zeit kodiert.

[0059] Fig. 1c zeigt schematisch das Partikel 16.1, das zum Zeitpunkt t_1 an der Position x_1 ist. Die x-Koordinate wird in Strömungsrichtung S gemessen, die y- und die z-Koordinate senkrecht dazu, sodass sich ein Rechtssystem ergibt.

[0060] Zum Zeitpunkt t_2 ergibt sich die Position x_2 , wenn kein elektrisches Feld anliegt, das heißt, wenn $E = 0$ gilt. Liegt das elektrische Feld an, ergibt sich die Position $x_{2,E}$.

[0061] Um die Strömungsverhältnisse des Fluidstroms zu charakterisieren, werden in einem Vorversuch ausschließlich Tracerpartikel, beispielsweise mittels der Partikelzuführung 14 in den Fluidstrom eingebracht. Die Tracerpartikel sind deutlich kleiner als die Partikel 16.i, deren elektrostatische Aufladung mittels eines erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden soll. Es wird angenommen, dass die Tracerpartikel so leicht sind, dass eine Tracerpartikel-Geschwindigkeitsverteilung $u(y,z)$ in guter Näherung bei der Geschwindigkeitsverteilung der Fluidvolumina des Fluidstroms entspricht. Es sei darauf hingewiesen, dass die Geschwindigkeiten der Tracerpartikel mit u bezeichnet werden, die Geschwindigkeiten der Partikel 16.i jedoch mit v .

[0062] Aus einer Mehrzahl an Messungen mit den Tracerpartikeln werden jeweils jeweilige Trefferpartikelgeschwindigkeitsverteilungen $u_j(y,z)$ erhalten. Durch Mitteln einer Mittelungszeit T wird eine durchschnittliche ortsaufgelöste Tracerpartikelgeschwindigkeit $\bar{u}(y,z)$ erhalten. Querstrich signalisiert den zeitlichen Mittelwert.

[0063] Ohne elektrisches Feld wirkt die aerodynamische Kraft auf die Partikel 16.i:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_o \pi r^2 |\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta| (\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta) \quad (1)$$

[0064] Wird das elektrische Feld angelegt, so ergibt sich:

$$F_{d,E} = \frac{1}{2} \rho C_D \pi r^2 |\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E}| (\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E}) \quad (2)$$

[0065] Auf die Partikel wirkt die elektrostatische Kraft:

$$F_e = QE \cos \beta \quad (3)$$

[0066] Ein Winkel β_H zwischen dem Lichtblatt 38 und einer Horizontalen H beträgt im vorliegenden Fall $\beta_H = 22^\circ$. Die Gravitationskraft ist daher vernachlässigbar.

[0067] Durch Bilden der Differenz aus Gleichungen (1) und (2) ergibt sich

$$Q(y,z) = \frac{\pi \rho C_d r^2}{2E \cdot \cos \beta} \left[|\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E}| (\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E}) - |\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta| (\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta) \right] \quad (4)$$

[0068] Die geraden Klammern bezeichnen den Absolutbetrag. Es gibt sich so die Ladungsverteilung $Q(y,z)$. Diese Ladungsverteilung hat einen Maximalwert Q_{max} , der einen Ladungskennwert K darstellt. Die Ladungsverteilung $Q(y,z)$ hat zudem ein Gradientenfeld $VQ(y,z)$. Dieses Gradientenfeld hat einen Maximalgradienten, was der Gradienten maximalen Betrages ist. Auch dieser stellt einen Ladungskennwert K dar. Auch alle einzelnen Funktionswerte der Ladungsverteilung $Q(y,z)$ stellen Ladungskennwerte K dar.

[0069] Das Projekt, das zu dieser Patentanmeldung geführt hat, wurde vom Europäischen Forschungsrat unter der Nr. 947606 im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms European Union's Horizon 2020 gefördert.

Bezugszeichenliste

10	Pneumatikfördervorrichtung
12	Fluidstromerzeuger
14	Partikelzuführung
16	Partikel
18	Fluidstromladungsmessgerät
20	Fluidleitung
22	Turbulenzbildungsabschnitt
24	Partikelsenke
26	Messabschnitt
28	Messfelderzeuger
30	Spannungsquelle
32	Elektrode
34	Partikelgeschwindigkeitsmesser
36	Laser
38	Lichtblatt
40	Kamera
42	Auswerteeinheit
τ_w	Wartezeit
τ_v	Zeitversatz
$VQ(y,z)$	Gradientenfeld
E	elektrisches Feld
H	Horizontal
i	Laufindex
K	Ladungskennwert
L22	Länge
M	Messbereich
p	Fluiddruck
$Q(y,z)$	Ladungsverteilung
Q_{max}	Maximalwert der Ladungsverteilung
S	Strömungsrichtung
T	Mittlungszeit
t	Zeit
U_{38}	Spannung
$u(y,z)$	Fluidgeschwindigkeitsverteilung
$\bar{u}(y,z)$	zeitlich gemittelte Fluidgeschwindigkeitsverteilung
$v(y,z)$	Partikelgeschwindigkeitsverteilung
$\bar{v}(y,z)$	zeitlich gemittelte Partikelgeschwindigkeitsverteilung
v	Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit
v_E	Partikelgeschwindigkeit

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts (K) von elektrischen Ladungen von Partikeln (16) in einem Fluidstrom, mit den Schritten:

- (a) Leiten des Fluidstroms, der Partikel (16) enthält, durch eine Fluidleitung (20),
- (b) orts aufgelöstes Bestimmen einer Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit (v), in einem Messbereich ohne elektrisches Messfeld,
- (c) Anlegen eines elektrischen Messfelds quer zur Strömungsrichtung (S) im Messbereich,
- (d) orts aufgelöstes Bestimmen einer Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) im Messbereich und
- (e) Bestimmen des zumindest einen Ladungskennwerts (K), der eine elektrostatische Aufladung der Partikel (16) beschreibt, aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) das orts aufgelöste Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit (v) und der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) mittels Partikelbildvelozimetrie erfolgt oder
- (b) das orts aufgelöste Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit (v) und Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) mittels Laser-Doppler-Anemometrie erfolgt.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) das orts aufgelöste Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit die folgenden Schritte aufweist:
 - (i) Aufnehmen eines ersten Messfeldlos-Bilds einer Vielzahl an Partikeln (16) zu einem ersten Zeitpunkt (t_1),
 - (ii) Aufnehmen eines zweiten Messfeldlos-Bilds der Partikel zu einem zweiten Zeitpunkt (t_2), der um einen Zeitversatz (τ_v) später liegt,
 - (iii) Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit aus den Messfeldlos-Bildern,
- (b) das orts aufgelöste Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) die folgenden Schritte aufweist:
 - (i) Aufnehmen eines ersten Mitfeld-Bilds einer Vielzahl an Partikeln (16) zu einem dritten Zeitpunkt (t_3),
 - (ii) Aufnehmen eines zweiten Bild der Partikel (16) zu einem vierten Zeitpunkt, der um einen, insbesondere den gleichen, Zeitversatz (τ_v) später liegt, und
 - (iii) Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) aus den Mitfeld-Bildern.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) das orts aufgelöste Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit die folgenden Schritte aufweist:
 - (i) in einem ersten Zeitraum Aufnehmen eines Messfeldlos-Bilds einer Vielzahl von Partikeln (16), die von einem Lichtblatt (38) bestrahlt werden, wobei sich das Lichtblatt entlang der Strömungsrichtung (S) des Fluidstroms erstreckt,
 - (ii) im ersten Zeitraum Verändern einer Lichteigenschaft, insbesondere einer Helligkeit oder einer Farbe, des Lichtblatts (38) und
 - (iii) Bestimmen der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit aus dem Messfeldlos-Bild, und/oder
- (b) das orts aufgelöste Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) die folgenden Schritte aufweist:
 - (i) in einem zweiten Zeitraum Aufnehmen eines zweiten Mitfeld-Bilds einer Vielzahl von Partikeln (16), die vom Lichtblatt (38) bestrahlt werden,
 - (ii) im zweiten Zeitraum Verändern einer Lichteigenschaft, insbesondere einer Helligkeit oder einer Farbe, des Lichtblatts (38) und
 - (iii) Bestimmen der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) aus dem Mitfeld-Bild.

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

- (a) Hinzufügen von Tracerpartikeln zum Fluidstrom,
- (b) Bestimmen einer Luftgeschwindigkeit des Fluidstroms mittels Partikelbildvelozimetrie und
- (c) Bestimmen des Ladungskennwerts (K) aus der orts aufgelösten Luftgeschwindigkeit, der Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit und der Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E).

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zumindest eine Ladungskennwert (K) eine orts aufgelöste Ladungsverteilung ($Q(y,z)$) ist.

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Schritte: Ausgeben einer Warnmeldung, wenn der zumindest eine Ladungskennwert (K) außerhalb eines Soll-Ladungskennwertintervalls liegt.

8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts (K) aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten ein Bestimmen

der orts aufgelösten Ladungsverteilung ($Q(y,z)$) anhand der folgenden Formel ist:

$$Q(y,z) = \frac{\pi \rho C_d r^2}{2E \cdot \cos \beta} \left[\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E} \left| \left(\bar{u}_\beta - \bar{v}_{\beta,E} \right) - \left| \bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta \right| \left(\bar{u}_\beta - \bar{v}_\beta \right) \right. \right] \text{ erfolgt, mit}$$

ρ der Luftdichte,

β dem Winkel zwischen den elektrischen Messfeldlinien und dem Lichtblatt (38),

C_d dem Strömungswiderstandskoeffizienten,

r dem Sauterdurchmesser nach DIN ISO 9276 der Partikel (16),

\bar{u}_β der Geschwindigkeitskomponente des Fluidstroms im Lichtblatt (38) quer zur Strömungsrichtung (S),

\bar{v}_β der Geschwindigkeitskomponente der Partikel (16) im Lichtblatt (38) quer zur Strömungsrichtung (S) ohne elektrisches Messfeld und

$\bar{v}_{\beta,E}$ der Geschwindigkeitskomponente der Partikel (16) im Lichtblatt (38) quer zur Strömungsrichtung (S) bei angelegtem elektrischem Messfeld.

9. Fluidstromladungsmessgerät (18) mit

(a) einer Fluidleitung (20),

(b) einem Messfelderzeuger (28) zum Erzeugen eines elektrischen Messfelds in einem Messbereich der Fluidleitung (20),

(c) einem Partikelgeschwindigkeitsmesser, der ausgebildet ist zum automatischen Bestimmen einer orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeitsverteilung mittels Partikelbildvelozimetrie und

(d) einer Auswerteeinheit (42), die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(i) Messen einer orts aufgelösten Messfeldlos-Partikelgeschwindigkeit mittels der Partikelbildvelozimetrie-Messeinheit, ohne dass der Messfelderzeuger (28) ein elektrisches Messfeld erzeugt,

(ii) Erzeugen des elektrischen Messfelds mittels des Messfelderzeugers (28) und

(iii) Messen einer orts aufgelösten Mitfeld-Partikelgeschwindigkeit (v_E) mittels der Partikelbildvelozimetrie-Messeinheit und

(iv) Bestimmen zumindest eines Ladungskennwerts (K), der eine elektrostatische Aufladung der Partikel (16) beschreibt, aus den orts aufgelösten Partikelgeschwindigkeiten.

10. Fluidstromladungsmessgerät (18) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass es ausgebildet ist zum automatischen Abgeben eines Warnsignals, wenn der Ladungskennwert (K) außerhalb des Soll-Ladungskennwertintervalls liegt.

11. Pneumatikfördervorrichtung (10) zum Transportieren von Partikeln (16) in einem Fluidstrom, mit

(a) einem Fluidstromerzeuger, insbesondere einem Gebläse oder einem Kompressor, zum Erzeugen des Fluidstroms,

(b) einer Partikelzuführung zum Zuführen von Partikeln (16) zum Fluidstrom und

(c) einem Fluidstromladungsmessgerät (18) nach einem der Ansprüche 9 bis 10.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

