

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 51073/2016 (51) Int. Cl.: **G01N 21/17** (2006.01)
 (22) Anmeldetag: 25.11.2016 **G01N 29/34** (2006.01)
 (45) Veröffentlicht am: 15.07.2018

(56) Entgegenhaltungen:
 US 2012279279 A1
 WO 2008072167 A1
 DE 19516974 A1
 US 2002194897 A1

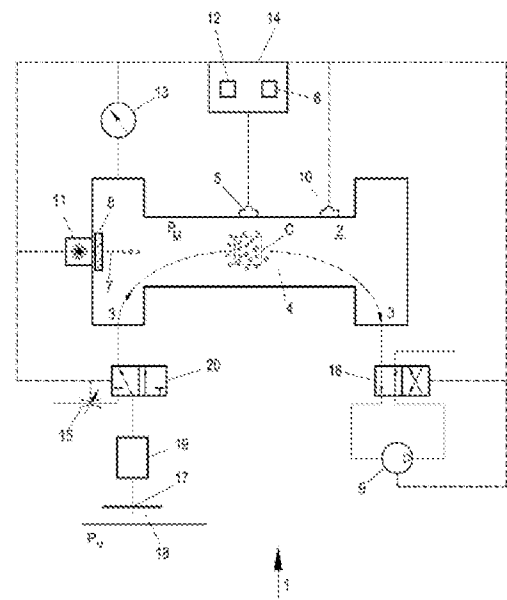
(73) Patentinhaber:
 AVL List GmbH
 8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
 Reingruber Herbert Dr.
 8045 Graz (AT)
 Harms Klaus-Christoph Dr.
 8051 Thal/Graz (AT)

(74) Vertreter:
 Patentanwälte Pinter & Weiss OG
 1040 Wien (AT)

(54) **Messgerät und Verfahren zum Betreiben des Messgeräts**

(57) Die Erfindung betrifft ein Messgerät (1) zur Messung einer Messeigenschaft (C) einer Messkomponente (2) in einem Messgas (3) und ein Verfahren zum Betreiben des Messgeräts (1). Das Messgas (3) wird in einer Messkammer (4) photoakustisch angeregt, der dabei erzeugte Schall wird mit einem Schallaufnehmer (5) aufgenommen und das aufgenommene Signal wird in einer Auswerteeinheit (6) zur Ermittlung der Messeigenschaft (C) ausgewertet. Die Auswerteeinheit (6) korrigiert die ermittelte Messeigenschaft (C) mittels einer Korrekturfunktion. Zur Ermittlung zumindest eines Parameters der Korrekturfunktion wird zumindest einmal ein Ermittlungsdruck (P_E) in der Messkammer (4) eingestellt, dabei wird der Absolutdruck (P) in der Messkammer (4) ermittelt. Es wird bei diesem Absolutdruck (P) zumindest eine Ermittlungsmessung bei einer Ermittlungsanregung durchgeführt und der zumindest eine Parameter wird anhand des Absolutdrucks (P) und des Ermittlungsmessergebnisses (C_E) der Ermittlungsmessung ermittelt.



Beschreibung

MESSGERÄT UND VERFAHREN ZUM BETREIBEN DES MESSGERÄTS

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Messgeräts, welches zur Messung einer Messeigenschaft einer Messkomponente in einem Messgas geeignet ist, wobei das Messgas in einer Messkammer photoakustisch angeregt wird, der dabei erzeugte Schall mit einem Schallaufnehmer aufgenommen wird und das aufgenommene Signal in einer Auswerteeinheit zur Ermittlung der Messeigenschaft ausgewertet wird, wobei die Auswerteeinheit die ermittelte Messeigenschaft mittels einer Korrekturfunktion korrigiert.

[0002] Weiters betrifft die Erfindung ein Messgerät zur Messung einer Messeigenschaft einer Messkomponente in einem Messgas, wobei das Messgerät eine Messkammer, zumindest eine Anregevorrichtung zur photoakustischen Anregung des Messgases in der Messkammer, einen Schallaufnehmer und eine Auswerteeinheit aufweist, wobei mit der Auswerteeinheit das vom Schallaufnehmer aufgenommene Signal zur Ermittlung einer Messeigenschaft auswertbar und die Messeigenschaft mittels einer Korrekturfunktion korrigierbar ist, und wobei an der Messkammer eine Druckmesseinheit zur Ermittlung des Absolutdrucks in der Messkammer vorgesehen ist.

[0003] Für Forschung und Entwicklung an Verbrennungskraftmaschinen werden Messungen zur Analyse der Komponenten des Abgases durchgeführt und dazu unter Anderem photoakustische Messgeräte eingesetzt. Diese können eine hohe und selektive Messempfindlichkeit für bestimmte, in geringer Konzentration im Messgas vorhandene feste, flüssige oder gasförmige Komponenten haben und funktionieren nach folgendem an sich bekannten Prinzip:

[0004] Die zu messenden Komponenten des Messgases (die hierin als Messkomponenten bezeichnet werden) strömen mit diesem in eine Messkammer, die bevorzugt in einer solchen geometrischen Form ausgeführt ist, dass in ihr zumindest eine deutlich ausgeprägte akustische Resonanz angeregt werden kann. Als Messkomponente werden insbesondere die im Messgas vorhandenen gasförmigen, flüssigen oder festen Bestandteile bezeichnet. Als Messeigenschaft dieser Messkomponente kann beispielsweise die Konzentration oder die Partikelanzahl durch das photoakustische Messgerät zeitlich aufgelöst gemessen werden. Eine in ihrem Spektrum auf die Absorptionsfähigkeit der Messkomponente abgestimmte elektromagnetische Strahlung, wobei insbesondere „Licht“ vom nahen Ultraviolett (UV) bis ins mittlere Infrarot (IR) mit Wellenlängen von 200 bis 10000 nm genutzt werden kann, wird mit einer solchen Pulsationsfrequenz in die Messkammer eingestrahlt, dass sich die Messkomponente und damit das umgebende Messgas durch die Absorption des periodisch eingestrahlichten Lichts periodisch erwärmt, wodurch entsprechende Schalldruckpulsationen erzeugt werden. Der auf diese Art in Abhängigkeit von der Konzentration der Messkomponente optisch angeregte Schall in der Messkammer wird mit einem Schallaufnehmer bzw. Mikrofon detektiert und von der Auswerteeinheit ausgewertet.

[0005] Als „Messgas“ wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Erfindung das Gas bezeichnet, das während der Messung und/oder während anderer Betriebsfunktionen, wie etwa einer Ermittlung von Parametern der Korrekturfunktion durch die Messkammer geleitet wird, bzw. sich gerade in der Messkammer befindet. Der Begriff umfasst gegebenenfalls auch ein Kalibrier- oder Nullgas, das bekannte Eigenschaften aufweist und sich während einer Kalibrierung, Justierung oder einer anderen Referenzmessung in der Messkammer befindet bzw. durch diese strömt.

[0006] Bekannte Messsysteme der eingangs genannten Art werden häufig sehr spezifisch für Anwendungsfälle mit nur einer Gasart und Messkomponente ausgelegt. Auch werden im Allgemeinen, um die Systemparameter und insbesondere die Messempfindlichkeit möglichst konstant zu halten, Messkammer und Messgas thermostatisiert und das Gas in der Messkammer wird auf konstantem Druck (Messkammerdruck) gehalten.

[0007] Dies lässt sich dies jedoch nicht immer vollständig realisieren. Aufgrund technischer

Einschränkungen kann beispielsweise der Druckunterschied zwischen dem Druck in der Messkammer und dem Umgebungsdruck Beschränkungen unterworfen sein, beispielsweise kann bei Geräten des Standes der Technik der Messkammerdruck auf den Umgebungsdruck +60/-100 mbar beschränkt sein. Im Fall einer Über- oder Unterschreitung dieser Limitierung, beispielsweise infolge starker Druckpulsationen im Abgas, kann es erforderlich sein, das Einlassventil zu schließen und so einer Schädigung der Komponenten vorzubeugen. Beim Einsatz solcher bekannten Geräte, beispielsweise zur mobilen Messung der im Abgas einer Verbrennungsanlage enthaltenen Rußpartikel, kann aber das Problem auftreten, dass sich der Umgebungsdruck stärker ändert, und sich damit im Allgemeinen auch der Druck in der Messkammer ändern muss. Beispielsweise beim Einsatz des Geräts an Bord eines Fahrzeugs und auf Gebirgsstraßen kann der barometrische Druck sehr niedrige Werte annehmen, beispielsweise 783 mbar auf 2000 m Seehöhe oder 533 mbar auf 5000 m Seehöhe, gegenüber 1013 mbar auf Meeresebene. Mit einer Änderung des Umgebungsdrucks kann sich jedoch auch der Messkammerdruck entsprechend ändern. Trotzdem sollten die ausgegebenen Rußmesswerte unabhängig vom Druck und daher vergleichbar sein.

[0008] Grundsätzlich ist es bekannt, den Absolutdruck in der Messkammer zu messen und im Messergebnis des photoakustischen Messgeräts zu berücksichtigen. Dazu wird einerseits die bei einem bestimmten Absolutdruck gemessene Konzentration der Messkomponente mithilfe der (idealen) Gasgleichung auf Normbedingungen umgerechnet, z.B. auf 0 °C und 1013 mbar. Andererseits werden Korrektur-Algorithmen bzw. Korrekturfunktionen, z.B. Polynome erster oder auch höherer Ordnung, eingesetzt, mit denen auch eine nicht-lineare Abhängigkeit der Messempfindlichkeit vom Absolutdruck berücksichtigt werden kann.

[0009] Bei bekannten Einrichtungen müssen aber die Koeffizienten solcher Algorithmen immer a-priori vorgegeben sein. Sie werden beispielsweise bei der Fertigung und Kalibrierung des Geräts für Höhen bis 2000 m Seehöhe bestimmt und als Festwerte zur näherungsweisen Berücksichtigung des Absolutdrucks im Messsystem abgelegt. Oder der Benutzer muss sie vor Durchführung der Messungen händisch eingeben, was aber im Allgemeinen nicht geschieht, da im Feld, bei den laufenden Messungen, keine messtechnischen Grundlagen für eine solche Parameteränderung erhalten werden können.

[0010] Auch wird bei bekannten Einrichtungen nicht berücksichtigt, dass auch die Mikrofonempfindlichkeit Änderungen unterworfen ist, wobei diese Änderungen einerseits durch Alterung, andererseits durch Druckunterschiede bewirkt werden. So nimmt neben der oben beschriebenen Abnahme der Massenkonzentration (laut „idealer Gasgleichung“) auch die Mikrofonempfindlichkeit bei fallendem Druck ab.

[0011] US 2012279279 A1 offenbart einen photoakustischen Detektor, bei welchem Umgebungsbedingungen, wie etwa eine Außentemperatur, ein Außendruck und eine Außenfeuchtigkeit, in einen Korrekturfaktor eingehen.

[0012] WO 2008072167 A1 offenbart einen photoakustischen Detektor mit einer Kompensation von Wellenlängenverschiebungen, die von Temperaturänderungen der Laserlichtquelle hervorgerufen werden. Die Temperatur des Messgases wird in dieser Druckschrift nicht thematisiert.

[0013] DE 19516974 A1 offenbart einen photoakustischen Sensor, bei welchem Referenzmessungen zur Korrektur des Messergebnisses vorgenommen werden.

[0014] US 2002194897 A1 offenbart ein photoakustisches Messsystem mit einer Kalibrierung.

[0015] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren bereitzustellen, das die Nachteile des Standes der Technik vermeiden kann und eine Überprüfung und eventuell auch eine Korrektur der Koeffizienten für die Berücksichtigung des Absolutdrucks im Messergebnis des photoakustischen Messsystems ermöglicht.

[0016] Diese und weitere Aufgaben werden durch ein Verfahren der eingangs genannten Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass zur Ermittlung zumindest eines Parameters der Korrekturfunktion zumindest einmal ein Ermittlungsdruck in der Messkammer eingestellt wird, der

Absolutdruck in der Messkammer bei diesem Ermittlungsdruck ermittelt wird, bei diesem Absolutdruck zumindest eine Ermittlungsmessung bei einer Ermittlungsanregung durchgeführt wird, und der zumindest eine Parameter anhand des Absolutdrucks und des Ermittlungsmessergebnisses der Ermittlungsmessung ermittelt wird. Als Ermittlungsdruck kann ein beliebiger Über- oder Unterdruck (bezogen auf den Umgebungsdruck) verwendet werden, wobei die Ermittlung von Parametern auch in mehreren Schritten bei mehreren unterschiedlichen Drücken wiederholt werden kann, falls zur Ermittlung der Parameter mehrere Messungen erforderlich sind. Als Ermittlungsanregung kann eine beliebige Anregung erfolgen, die entweder der bei der „regulären“ Messung stattfindenden photoakustischen Anregung entspricht oder von dieser verschieden ist. Unter einer Ermittlungsmessung wird die im Zusammenhang mit der Ermittlungsanregung vorgenommene Messung verstanden.

[0017] In einer Variante der Erfindung ist der Ermittlungsdruck als ein Relativdruck zum Umgebungsdruck definiert. Dies erlaubt eine sehr einfache Einstellung des Ermittlungsdrucks, wobei relativ große Toleranzbereiche zulässig sind, da ohnehin eine Messung des Absolutdrucks in der Messkammer zur Ermittlung der Parameter vorgesehen ist.

[0018] Als Ermittlungsanregung wird in vorteilhafter Weise eine in der Anregungsstärke reproduzierbare und von der Messkomponente unabhängige akustische Ermittlungsschwingung angeregt, wobei es bevorzugt ist, wenn diese Ermittlungsanregung auf möglichst einfache Weise und mit minimalem Bedieneingriff realisiert wird.

[0019] Bevorzugter Weise wird die Ermittlungsanregung akustisch mittels eines Schallgebers erzeugt, wobei der dazu verwendete Schallgeber die Funktionalität der Messkammer im Messbetrieb nicht beeinträchtigt.

[0020] In einer Variante der Erfindung wird die Ermittlungsanregung photoakustisch erzeugt.

[0021] In einer weiteren Variante der Erfindung wird die Ermittlungsanregung mittels eines in einem Strahlengang einer zur Erzeugung des photoakustischen Effekts verwendeten elektromagnetischen Anregestrahlung angeordneten Absorbers erzeugt. Die an sich bekannte Anwendung eines Absorbers kann auch im Feld vom Benutzer auf einfache Weise durchgeführt werden.

[0022] In einer weiteren Ausführungsform wird der Ermittlungsdruck in der Messkammer von einer Pumpvorrichtung, vorzugsweise von der im Messgerät vorhandenen Messgaspumpe, erzeugt. Dadurch kann ein gewünschter Über- oder Unterdruck (Ermittlungsdruck) in der Messkammer mit der im Gerät vorhandenen Pumpvorrichtung und bei entsprechender Drosselung oder Absperrung des Gasanschlusses relativ einfach erzeugt werden, was eine kostengünstige Anwendung des Verfahrens erlaubt. Beispielsweise kann mit einer vorhandenen Saugpumpe ein Unterdruck in der Messkammer erzeugt werden, wie dies in an sich bekannter Weise bei einem „Lecktest“ erfolgt, bei dem die Messkammer mithilfe der vorhandenen Saugpumpe evakuiert und der nachfolgende Druckanstieg zur Bestimmung der Leckrate infolge eventuell vorhandener Undichtigkeiten ausgewertet wird. Durch ein Umkehren der Wirkrichtung der Saugpumpe, beispielsweise mit Ventilen, kann natürlich auch ein Überdruck in der Messkammer erzeugt werden, falls dies erforderlich sein sollte.

[0023] Vorteilhafterweise ist zumindest ein Parameter der Korrekturfunktion ein Koeffizient einer Polynomfunktion erster, zweiter oder höherer Ordnung, wobei sie beispielsweise den Term

$$K_0 + K_1 * ((P - P_0) / P_0) + K_2 * ((P - P_0) / P_0)^2$$

enthalten kann. Darin entspricht P dem Absolutdruck in der Messkammer, P₀ dem Referenzdruck bei Normbedingungen, vorzugsweise 1013 mbar, und K₀, K₁ und K₂ entsprechen Koeffizienten der Polynomfunktion. Polynomterme zweiter und höherer Ordnung erlauben die Berücksichtigung besonderer Effekte, wie etwa eine Änderung der Mikrofonempfindlichkeit.

[0024] Des Weiteren werden die Aufgaben der Erfindung durch das eingangs erwähnte Messgerät erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass es eine Ermittlungseinheit aufweist, mit der zur Ermittlung von zumindest einem Parameter der Korrekturfunktion ein Ermittlungsdruck in der

Messkammer einstellbar, der Absolutdruck bei diesem Ermittlungsdruck ermittelbar und bei diesem Absolutdruck zumindest eine Ermittlungsmessung bei einer Ermittlungsanregung durchführbar ist, wobei zumindest ein Parameter der Korrekturfunktion aus zumindest dem gemessenen Absolutdruck und dem Ermittlungsmessergebnis der Ermittlungsmessung mit der Ermittlungseinheit ermittelbar ist. Ein solches Messgerät erlaubt die vorteilhafte Implementierung des obengenannten Verfahrens.

[0025] In einer Variante der Erfindung ist an der Messkammer ein Schallgeber zur akustischen Ermittlungsanregung angeordnet. Dies erlaubt es, auf akustische Weise die Ermittlungsanregung in ausreichender Genauigkeit zu erzielen. Eine akustische Anregung mit einem Schallgeber kann, in an sich bekannter Weise, auch zur Bestimmung der Resonanzfrequenz des Systems verwendet werden. Als Schallgeber kann beispielsweise ein Mikrofon verwendet werden, wobei der Schallgeber gleichartig wie der Schallaufnehmer sein kann, da er wegen der Reziprozität des Schallwandlers elektrisch als Lautsprecher betrieben werden kann. Die Übertragungsfunktion dieser Anordnung wird demnach zweimal von einer ungefähr gleichen Charakteristik bestimmt, einerseits von der Empfindlichkeit im Empfangsbetrieb und andererseits von der Empfindlichkeit im Sendebetrieb.

[0026] Zur Ermittlung des zumindest einen Parameters der Korrekturfunktion ist vorteilhafterweise ein Absorber in einem Strahlengang der zur Erzeugung des photoakustischen Effekts verwendeten elektromagnetischen Anregestrahlung angeordnet. Als Absorber zur definierten photakustischen Anregung von Schallwellen in der Messkammer hat sich ein Absorberfenster bewährt, das auf einfache Art in den Strahlengang der Lichtquelle eingebracht werden kann. Damit kann unter anderem auch ein sogenannter „Span-Check“ zur Bestimmung oder Überwachung einer eventuellen, gegebenenfalls alterungsbedingten Drift der Mikrofonempfindlichkeit durchgeführt werden.

[0027] In einer weiteren Variante der Erfindung weist das Messgerät eine Pumpvorrichtung, vorzugsweise eine Messgaspumpe auf, mittels der der Ermittlungsdruck in der Messkammer einstellbar ist.

[0028] Vorteilhafterweise ist die Ermittlungseinheit dazu eingerichtet, zumindest einen Parameter der Korrekturfunktion vor jedem Prüflauf erneut zu ermitteln, wobei die Funktionalität der Ermittlung des zumindest einen Parameters der Korrekturfunktion in das Messgerät integriert sein kann und keinen Bedienungseingriff erfordert. Dadurch lassen sich Fehlmessungen aufgrund von Bedienfehlern minimieren.

[0029] Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figur 1 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend eine vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung zeigt. Dabei zeigt

[0030] Fig.1 ein schematisches Schaltbild eines erfindungsgemäßen Messgeräts.

[0031] Das in Fig. 1 schematisch dargestellte Messgerät 1 umfasst eine Messkammer 4, durch die ein Messgas 3 geleitet wird. Das Messgas 3 enthält eine Messkomponente 2, beispielsweise Abgaspartikel, wobei eine Messeigenschaft C dieser Messkomponente 2 von dem Messgerät ermittelt werden soll. Die Messeigenschaft C kann insbesondere ein Wert sein, der Rückschlüsse auf die Konzentration und/oder die Partikelanzahl der Messkomponente 2 im Messgas 3 erlaubt. Als Messeigenschaft könnten jedoch auch eine Massen- und/oder Größenverteilung von Partikeln oder andere Eigenschaften der Messkomponente 2 ermittelt werden, sofern diese Eigenschaften einer photoakustischen Messung zugänglich sind.

[0032] Das Messgas 3 kann beispielsweise an einer Entnahmestelle 17 von dem in einer Abgasleitung 18 enthaltenen Abgas abgezweigt und der Messkammer 4 zugeführt werden, wobei gegebenenfalls in an sich bekannter Weise eine Konditioniereinheit 19, insbesondere zur Verdünnung bzw. Kühlung des Abgases vorgesehen sein kann. Das konditionierte Abgas wird über ein Einlassventil 20 in die Messkammer geführt. Andererseits kann mit einem Drosselventil 15 mit einstellbarem Querschnitt der Messkammerdruck P_M eingestellt werden.

[0033] Die Strömung des Messgases 3 durch die Messkammer 4 wird während der Messung von einer der Messkammer 4 nachgelagerten Pumpvorrichtung in Form einer Messgaspumpe 9 aufrechterhalten. Zu Zwecken der erfindungsgemäßen Ermittlung des zumindest einen Parameters der Korrekturfunktion kann die Förderrichtung der Messgaspumpe 9 mithilfe eines Umschaltventils 16 umgekehrt werden. Diese Umkehrung der Förderrichtung ist nur für die untenstehend beschriebene Ermittlungsfunktion relevant und wird während der Messung nicht verwendet.

[0034] Um den zeitlichen Verlauf der Messeigenschaft C der Messkomponente 2 zu ermitteln, wird von einer Anregevorrichtung 11 eine pulsierende - d.h. eine in der Intensität periodisch modulierte - elektromagnetische Strahlung, vorzugsweise eine Laserstrahlung im sichtbaren oder nicht sichtbaren Spektrum, in die Messkammer 4 eingebracht, wobei die Pulsationsfrequenz auf die Messkammer 4, das Messgas 3 und die Messkomponente 2 abgestimmt ist. Damit kann zumindest eine deutlich ausgeprägte akustische Resonanz angeregt und dadurch die erzielbare Messgenauigkeit verbessert werden. Die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung kann spezifisch auf die Eigenschaften der Messkomponente 2 abgestimmt werden und ist im Allgemeinen so gewählt, dass die Strahlung von der Messkomponente optimal absorbiert wird, nicht jedoch von dem Messgas 3 oder von anderen Komponenten, die vom Messgas 3 mitgeführt werden. Auch die Pulsationsfrequenz ist auf die Abmessungen der Messkammer 4 und die Eigenschaften des Messgases 3 und der Messkomponente 2 abgestimmt, um unter Ausnutzung von Resonanzverhalten eine möglichst gute Messverstärkung zu erzielen. Der photoakustisch angeregte Schall wird über einen Schallaufnehmer 5 bzw. Mikrofon aufgenommen und von einer Auswerteeinheit 6 zur Ermittlung der Messeigenschaft C ausgewertet.

[0035] Der Absolutdruck P in der Messkammer kann über eine Druckmesseinheit 13 ermittelt werden. Wie allgemein üblich kann mit dieser tatsächlich der Absolutdruck oder ein Differenzdruck, insbesondere relativ zum Umgebungsdruck P_U , ermittelt werden. Im Zusammenhang mit der gegenständlichen Erfindung wird als „Absolutdruck“ P der aus dem Messergebnis der Druckmesseinheit 13 ermittelte absolute Druck bezeichnet. Als Messkammerdruck P_M wird hingegen der relative Druck in der Messkammer bezogen auf den Umgebungsdruck P_U bezeichnet.

[0036] Weiters umfasst das Messgerät 1 zu Zwecken der Ermittlung von zumindest einem Parameter der Korrekturfunktion einen Absorber 8, der in den Strahlengang der Anregestrahlung 7 der Anregevorrichtung 11 eingesetzt werden kann und einen Schallgeber 10, mit dem die Messkammer auf herkömmliche Weise (d.h. ohne photoakustische Anregung und bei Abwesenheit der Messkomponente 2) akustisch angeregt werden kann.

[0037] Gegebenenfalls können durch entsprechende Ventile (die der Übersichtlichkeit halber in Fig. 1 nicht dargestellt sind) anstelle des Abgases ein Spülgas und/oder ein Null- bzw. Kalibriergas über das Drosselventil 15 und Einlassventil 20 in die Messkammer geleitet werden, wenn in dem Messgerät 1 entsprechende Vorrichtungen vorgesehen sind.

[0038] Die einzelnen elektronischen Komponenten des Messgeräts 1 sind mit einer Steuereinheit 14 verbunden, die neben der Auswerteeinheit 6 auch eine Ermittlungseinheit 12 umfasst. Die Steuereinheit 14 steht in Verbindung mit dem Schallaufnehmer 5, der Messgaspumpe 9, dem Schallgeber 10, der Anregevorrichtung 11, der Druckmesseinheit 13, dem Drosselventil 15, dem Umschaltventil 16 und dem Einlassventil. Damit kann die Steuereinheit 14 Messdaten dieser Einheiten zentral erfassen und Steuerbefehle an diese Einheiten ausgeben.

[0039] Die photoakustische Messung erfolgt auf an sich bekannte Weise, wobei das Messgas 3 von der Messgaspumpe 9 durch die Messkammer 4 gesaugt wird, während die Anregevorrichtung 11 eine Anregestrahlung 7 zur Erzielung des photoakustischen Effekts unter einer von der Steuereinheit 14 vorgegebenen Pulsationsfrequenz pulsierend in die Messkammer 4 einbringt. Die Anregestrahlung 7 wird von den Messkomponenten 2 absorbiert und diese, bzw. die diese umgebenden Bereiche des Messgases 3, werden dadurch periodisch erwärmt, was entsprechende Schalldruckpulsationen bewirkt. Der dabei erzeugte Schall wird vom Schallaufnehmer 5 detektiert und von der Auswerteeinheit 6 ausgewertet, wobei die Auswerteeinheit 6 aus dem vom

Schallaufnehmer 5 aufgenommenen Signal einen zeitlich aufgelösten Wert für die Messeigenschaft C ermittelt. Dabei können an sich bekannte Verfahren zur digitalen und/oder analogen Signalverarbeitung genutzt werden.

[0040] Während der erfindungsgemäßen Ermittlung der Koeffizienten K_n ist der Messkammerdruck P_M im Wesentlichen durch die Ansteuerung der Messgaspumpe 9 und des Drosselventils 15 bestimmt. Die Art der Beschaltung, mit dem Drosselventil 15 vor und der Messgaspumpe 9 nach der Messkammer 4, ist in Fig. 1 nur beispielhaft dargestellt. Tatsächlich werden meist komplexere Systeme verwendet, etwa um eine Drosselung des Abgases vor der Messkammer 4 zu vermeiden. Solche komplexen Beschaltungen sind dem Fachmann hinlänglich bekannt, sodass aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die in Fig. 1 dargestellte vereinfachte Beschaltung beschrieben wird. Gegebenenfalls können an allen Stellen der Strömungswege weitere Temperatur- und/oder Drucksensoren zur Messung der im Messgerät 1 strömenden Medien vorgesehen sein, wenn dies erforderlich ist.

[0041] Im Allgemeinen ist es nicht immer möglich, den Druck in der Messkammer auf einen vorgegebenen konstanten Absolutdruck P einzustellen, da eine zu große Abweichung des Messkammerdrucks P_M vom Umgebungsdruck P_U das Messergebnis verfälschen würde und sogar zu einer Schädigung der Komponenten führen könnte. Daher wird der Messkammerdruck P_M im Allgemeinen als Relativdruck zum Umgebungsdruck P_U gemessen und in einem engen Intervall möglichst konstant gehalten. Das hat zur Folge, dass sich der Absolutdruck P in der Messkammer nicht nur mit dem möglicherweise heftig pulsierenden Druck im Abgas, sondern auch mit dem Umgebungsdruck P_U während eines Messlaufs ändern kann.

[0042] Das Messgerät 1 ist dabei üblicherweise auf Normbedingungen (zum Beispiel auf einen Druck P_0 von 1013 mbar und eine Temperatur T_0 von 0°C) kalibriert. Abweichungen von diesen Normbedingungen werden daher von der Auswerteeinheit 6 anhand der Druckmesseinheit 13 und gegebenenfalls einer (in Fig. 1 nicht dargestellten) Temperaturmesseinheit überwacht und der Wert für die Messeigenschaft C wird mithilfe von Korrekturfunktionen, die unter anderem auch die ideale Gasgleichung berücksichtigen können, korrigiert.

[0043] Die Korrekturfunktionen können beispielsweise in Polynomform vorliegen, wobei als Variable des Polynoms beispielsweise die Abweichung $((P-P_0)/P_0)$ vom Normaldruck, die Abweichung $((T-T_0)/T_0)$ von der Normaltemperatur oder Kombinationen daraus verwendet werden können. Die Koeffizienten des Polynoms werden derzeit üblicherweise werksseitig ermittelt, wobei in der Praxis derzeit üblicherweise nur Polynome ersten Grades verwendet werden. Eine Ermittlung von Koeffizienten für Polynomterme höherer Ordnung von Werk aus erwies sich bisher als zu ungenau.

[0044] Die erfindungsgemäße Lösung erlaubt es, die Korrekturfunktion unmittelbar vor einer Messung sehr genau auf die tatsächlichen Verhältnisse anzupassen, sodass beispielsweise auch Koeffizienten höherer Ordnung sinnvoll und vorteilhaft eingesetzt werden können. Dazu umfasst die Steuereinheit 14 eine Ermittlungseinheit 12, die vor der Messung die folgenden Schritte durchführt:

- [0045]** • In der Messkammer 4 wird ein gewünschter Über- oder Unterdruck (Ermittlungsdruck) hergestellt.
- [0046]** • Unter dieser Betriebsbedingung erfolgt eine in der Anregungsstärke reproduzierbare und von der Messkomponente unabhängige Anregung des Messgases zu akustischen Schwingungen (Ermittlungsanregung).
- [0047]** • Der Absolutdruck P in der Messkammer wird gemessen und die akustischen Schwingungen werden von der Auswerteeinheit 6 wie bei der eigentlichen Messung erfasst und ausgewertet (Ermittlungsmessung).
- [0048]** • Die obigen Schritte können gegebenenfalls mit einem anderen Ermittlungsdruck wiederholt werden, wenn eine Ermittlungsmessung zur Ermittlung der Koeffizienten bzw. Parameter nicht ausreicht.

[0049] • Aus der Abhängigkeit des Messergebnisses vom anstehenden Absolutdruck werden die gesuchten Koeffizienten bzw. Parameter der Korrekturfunktion bestimmt.

[0050] Danach, bei der eigentlichen Messung, kann die Korrekturfunktion mit den derart bestimmten Koeffizienten bzw. Parametern zur Anwendung kommen.

[0051] Die reproduzierbare und von der Messkomponente unabhängige Anregung des Messgases kann dabei entweder photoakustisch mithilfe eines in die Anregestrahlung 7 eingebrachten Absorbers 8 erfolgen, oder über den Schallgeber 10.

[0052] Erfindungsgemäß können die Koeffizienten des Korrekturpolynoms somit auf einfache Weise ermittelt werden, beispielsweise vor jedem Messlauf, ohne dass dazu ein werksseitiger Eingriff erforderlich ist. Dadurch können zusätzliche Faktoren in der Korrekturfunktion auf komplexere Weise berücksichtigt werden, wie etwa eine alterungsbedingte Veränderung der Mikrofonempfindlichkeit oder eine Abhängigkeit der Mikrofonempfindlichkeit vom Druck.

[0053] Die Ermittlung von Koeffizienten unmittelbar vor dem Messlauf erlaubt es auch, das Messergebnis mithilfe von Polynomen zweiter und höherer Ordnung zuverlässig zu korrigieren.

[0054] Neben Polynomen können auch andere Arten von Korrekturfunktionen verwendet werden, deren Parameter auf dieselbe Weise unmittelbar vor dem Messlauf ermittelt bzw. angepasst werden können.

[0055] Funktionalität und Bedeutung des erfindungsgemäßen Verfahrens und der zugehörigen Vorrichtung werden im Zusammenhang mit dem nachfolgend beschriebenen konkreten Anwendungsbeispiel, besonders deutlich. Vorrangig geht es dabei um die Frage, welche Größen und Betriebsbedingungen einen Einfluss auf die kalibrierte Messempfindlichkeit des Messgeräts 1 haben, mit welchen Methoden und Einrichtungen sie ermittelt und überprüft werden, und wie die bekannten Möglichkeiten durch das erfindungsgemäße Verfahren und die zugehörige Einrichtung sinnvoll ergänzt werden können.

[0056] Unter „Kalibrierung“ versteht man (nach DIN 1319-1) den Vergleich des angezeigten Messwerts eines Sensors mit dem einer geeichten Referenz. Ein Gleichsetzen des angezeigten Messwerts mit dem der geeichten Referenz - genauer gesagt: ein Minimieren der Messwertabweichung - wird (nach DIN 1319-1) als "Justieren" bezeichnet. Da für ein Messgerät eine Kalibrierung allein im Allgemeinen eher sinnlos ist, wird im folgenden "Kalibrierung" stets im Sinne von "Kalibrierung und Justierung" verwendet.

[0057] Folgende Werte können werksseitig und gegebenenfalls von einem geschulten Servicetechniker kalibriert werden:

[0058] ➤ Analogausgänge: Nullwert, Endwert

[0059] ➤ Sensoren:

[0060] - Temperatur der Messkammer: 2-Punktkalibrierung mit einem "unteren" und einem "oberen" Vergleichswert. Diese Kalibrierung sollte gegebenenfalls vor der Kalibrierung der anderen Sensoren durchgeführt werden.

[0061] - Absolutdruck: aktueller Umgebungsluftdruck; wesentlich für das erfindungsgemäße Verfahren

[0062] - Druck ("Relativdruck") in bzw. unmittelbar nach der Messkammer: 2-Punktkalibrierung mit "Nullwert" und einem "oberen" Vergleichswert; wesentlich für das erfindungsgemäße Verfahren

[0063] - Durchfluss des Probengases, Differenzdrucksensor: 2-Punktkalibrierung mit "Nullwert" und einem "oberen" Vergleichswert

[0064] Hinweis: Fehler in der Kalibrierung des Relativdrucks, der unter 50 mbar liegen muss und daher üblicherweise einen Fehler von <5 mbar haben wird (0,5 % des Umgebungsdrucks), und Fehler in der Kalibrierung des Durchflusses haben keine Auswirkung auf die Korrektheit des Messwerts.

[0065] ➤ Messwert: Beziehung zwischen Sensorsignal in mV und Abgasbeladung mit Ruß in mg/m^3

[0066] Bei der Kalibrierung des Messwerts wird das Sensorsignal (in mV) in Beziehung zur Rußkonzentration einer stabilen Rußquelle gesetzt. Dazu kann beispielsweise das Gerät "Combustion Aerosol Standard" (CAST) von Matter Engineering verwendet. Es produziert Ruß, dessen Eigenschaften jenen von Dieselruß gleichen. Die von CAST abgegebene Rußkonzentration wird gravimetrisch ermittelt, wobei das Ergebnis auf Normbedingungen (Druck 1013 mbar, Temperatur 0 °C) bezogen wird. Diese Methode entspricht der Standardreferenzmessmethode für Rußkalibrierung nach VDI-Richtlinie 2465, Blatt 1. Eine einfachere Kalibriermethode wäre wünschenswert, aber wegen der komplexen physikochemischen Natur von Ruß ist eine allgemein anerkannte Alternative (wie die bei Gasanalysatoren bekannten Kalibriergasflaschen) bis heute nicht entwickelt worden.

[0067] Das Ergebnis der Kalibrierung und Justierung ist ein Kalibrierfaktor, den das Gerät zur Umrechnung der internen Messwerte des Mikrofons (mV) in die Konzentrationsgröße (g/m^3) verwendet. Der Kalibrierfaktor setzt sich aus einer festen Größe und einem variablen Faktor F_{kal} zusammen. Die feste Größe ist eine grobe Umrechnung für eine "mittlere" Geräteempfindlichkeit. Bei der ersten Werkskalibrierung wird der Default-Wert $F_{\text{kal}} = 1$ durch einen gerätespezifischen Wert ersetzt.

[0068] Zuerst ist die Phasenlage ϕ_M des Mikrofonsignals relativ zur Phasenlage des anregenden Lasersignals bei einer ausreichend hohen Rußkonzentration in der Messzelle zu bestimmen und als „Referenzphase“ einzustellen. Die Phasenlage ϕ_M ist für Messsignale über 100 mV, bzw. für Rußkonzentrationen von über $1 \text{ mg}/\text{m}^3$, innerhalb von $\pm 3^\circ$ konstant und muss vom Gerät bei der phasensensitiven Auswertung der Messsignale beachtet werden.

[0069] Danach wird der Anzeigewert der Vorrichtung (in mg/m^3) mit dem Ergebnis z. B. einer coulometrischen Rußbestimmung verglichen. Der neue Kalibrierfaktor F_{kal} wird aus dem alten Kalibrierfaktor und dem Verhältnis der aktuellen Anzeige und dem auf Normbedingungen (1013 mbar, 0 °C) bezogenen Referenz-Messwert nach folgender Formel bestimmt:

$$F_{\text{kal}(\text{neu})} = F_{\text{kal}(\text{alt})} * \text{Referenz} / \text{Anzeige}$$

[0070] Die Messwert-Kalibrierung ist üblicherweise über Jahre stabil, wie Vergleichsmessungen gezeigt haben. Sollte jedoch der Verdacht bestehen, dass sich die Empfindlichkeit geändert hat und daher eine neue Kalibrierung erforderlich ist, kann der Faktor F_{kal} , und eventuell auch die Phasenlage ϕ_M , neu gesetzt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Fenster frisch gereinigt sind und daher ein möglichst geringes Nullsignal vorliegt.

[0071] Zur Überprüfung der Werkskalibrierung, bzw. ihrer Gültigkeit, ohne die komplette Kalibrierprozedur durchführen zu müssen, kann eine spezielle Methode angewendet werden. Sie basiert auf der angemessenen und allgemein akzeptierten Annahme, dass das kalibrierte Verhältnis zwischen Sensorsignal (in mV) und der Massenkonzentration von Ruß (in mg/m^3) sich nicht ändert, wenn die Charakteristiken jener Elemente, die das Sensorsignal erzeugen, unverändert bleiben. In der Praxis bedeutet das, dass die folgenden Eigenschaften stabil bleiben:

[0072] - Mikrofonempfindlichkeit

[0073] - Intensität des Laserstrahls

[0074] - Linearität des Mikrofons

[0075] - Linearität der Laserintensität mit dem Strom

[0076] Hinweis zur Linearität der Mikrofonempfindlichkeit und der Laseransteuerung: Wie einerseits verschiedene Experimente gezeigt haben und andererseits aus dem photoakustischen Prinzip theoretisch abgeleitet werden kann, hängen das Sensorsignal (in mV) und die Rußmassenkonzentration (in mg/m^3) linear zusammen. Eine Abweichung von dieser Linearität kann nur bei nicht-linearem Verhalten der Komponenten der Messkette, insbesondere des Mikrofons, auftreten.

[0077] Zur Überprüfung dieser Eigenschaften stehen die folgenden, unten näher beschriebenen Funktionen bereits jetzt zur Verfügung und können durch das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft ergänzt werden:

[0078] ➤ Kalibrierüberprüfung: Zur "Überprüfung der korrekten Kalibrierung des Messwerts" wird die Empfindlichkeit der Messkette (die Intensität des Laserstrahls zusammen mit der Empfindlichkeit des Mikrofons) mit Hilfe eines Absorberfensters überprüft.

[0079] ➤ Resonanzfrequenz Scan: Die Empfindlichkeit des Mikrofons (und des ebenfalls im System integrieren Lautsprechers) kann durch Überprüfung des Signalwerts erfolgen, der nach Abschluss des Resonanzfrequenz Scans angezeigt wird.

[0080] ➤ Linearitätsüberprüfung des Mikrofons

[0081] ➤ Linearitätsüberprüfung des Lasers

[0082] Um die Kalibrier- und Überprüfungsfunktionen verstehen zu können muss man das Gesamtsystem kennen. Sein Herzstück ist die photoakustische Messkammer 4, wie sie schematisch in einer einfachsten Auslegung zum Erreichen einer guten Messempfindlichkeit in Fig. 1 dargestellt ist.

[0083] Im Zentrum der Messkammer 4 befindet sich ein akustisches Resonanzrohr, das als sogenannte "offene Pfeife" ausgeführt ist, mit folgenden charakteristischen Merkmalen: Der Durchmesser ist klein gegenüber der Länge L und an beiden Enden erweitert sich der Durchmesser ("Notch Filter"). Dadurch bildet sich eine stehende akustische Welle mit Druckknoten an den Enden des Resonanzrohres und einem Druckmaximum in der Mitte. Die Amplitude der akustischen Welle ist im Bereich der "Notch Filter" mit relativ größerem Durchmesser wesentlich schwächer als im Resonanzrohr.

[0084] Aufgrund dieser Prinzipien ergibt sich:

[0085] ▪ Die Resonanzfrequenz der Zelle (und damit die zugehörige Wellenlänge λ) wird von der Länge L_R des Resonators bestimmt. Näherungsweise gilt $\lambda = L_R/2$.

[0086] ▪ Das Maximum des Schalldrucks liegt in der Mitte der Zelle, weshalb sich das Mikrofon auch dort befindet.

[0087] ▪ Die Schallschnelle wird am Ende der "Notch Filter", also bei den optischen Fenstern, Null. Damit verbunden ist ein Maximum des Schalldrucks. Zusammen mit dem ersten Punkt folgt daraus, dass die Gesamtlänge des Zellenraumes L näherungsweise ein ganzzahliges Vielfaches von $\lambda/2$ ist.

[0088] ▪ Gaseinlass und Gasauslass werden in die Druckknoten der stehenden Welle gelegt, um diese nicht durch das unvermeidliche Strömungsrauschen an den Einlasskanten zu stören.

[0089] Die in der Fig. 1 schematisch gezeigte Messkammer hat verschiedene vorteilhafte Merkmale. Zum Beispiel lässt das seit Jahren am Markt befindliche Gerät „AVL Micro Soot Sensor“ strömungstechnisch günstig gestaltete Verrundungen an den Ein- und Auslässen und an den Querschnittsänderungen erkennen. Und es sind ein weiteres enges Rohrstück und eine weitere Kammer ("Notch Filter") mit größerer Querschnittfläche vorgesehen, die das Beströmen der Messzelle durch zwei Einlässe bei den Fenstern und einen gemeinsamen Auslass ermöglichen. So wird erreicht, dass die optischen Fenster nicht vom Partikelstrom angeströmt werden und daher weniger leicht verschmutzen.

[0090] Das Gerät kann in verschiedene Betriebszustände gesetzt werden:

[0091] ○ RUHEZUSTAND

[0092] ○ PAUSE

[0093] ○ STANDBY (inklusive NULLABGLEICH)

[0094] ○ MESSUNG (mit der möglichen SPITZENWERTMESSUNG)

[0095] ○ NULLPUNKTÜBERPRÜFUNG

[0096] Und je nach Betriebszustand können zusätzlich Prüf- und Wartungsfunktionen durchgeführt werden:

[0097] ○ RÜCKSPÜLUNG (der Entnahmeleitung)

[0098] ○ DICHTHEITSTEST (Überprüfen des Gaswegs auf Dichtheit)

[0099] ○ RESONANZFREQUENZ SCAN (Überprüfen von Resonanzfrequenz und Signalintensität)

[00100] ○ FENSTERREINIGUNG (nach Überprüfung der Fenster- und Zellenverschmutzung)

[00101] ○ KALIBRIERÜBERPRÜFUNG "SPAN CHECK" (Überprüfen der Gültigkeit der Messwertkalibrierung)

[00102] ○ LINEARITÄTSTEST für Mikrofon und Laser

[00103] Im RUHEZUSTAND ist das Mikroprozessorsystem betriebsbereit, es werden aber keine Mess- oder Regelfunktionen ausgeführt. Die Magnetventile sind stromfrei geschaltet und verbinden die Komponenten des Messsystems mit sauberer gefilterter Luft.

[00104] Auch im Betriebszustand PAUSE sind die Magnetventile stromfrei geschaltet und verbinden das Messsystem mit sauberer gefilterter Luft. Die Temperaturregelungen der Messzelle werden eingeschaltet und nach einer dreiminütigen Stabilisierungszeit erfolgt eine Überprüfung der diversen Temperaturen, der akustischen Resonanzfrequenz und der Verschmutzung. Im Fall einer Grenzwertüberschreitung des neu ermittelten Nullwerts wird eine Warnung ausgegeben, dass die optischen Fenster gereinigt werden müssen.

[00105] Im Betriebszustand STANDBY und nach dem Erreichen der Solltemperaturen wird die Pumpe gestartet, aber die Magnetventile bleiben stromlos geschaltet und verbinden das Messsystem mit sauberer gefilterter Luft. Dieses partikelfreie „Nullgas“ - in Spezialfällen kann statt Luft auch gefiltertes Abgas verwendet werden - strömt in der Folge durch die Messzelle und erlaubt nach 10 Sekunden Stabilisierungszeit die Bestimmung des Nullwerts durch Mittelung des Sensorsignals (hier: „Nullsignal“) über mindestens 20 Sekunden (maximal 260 Sekunden). Im Fall einer Grenzwertüberschreitung des neu ermittelten Nullwerts wird eine Warnung ausgegeben, dass die optischen Fenster gereinigt werden müssen. Außerdem wird die Resonanzfrequenz ermittelt und überprüft. Danach ist das System messbereit, und solange nicht der Betriebszustand MESSUNG aufgerufen wird, wird weiterhin „Nullgas“ durch die Messzelle geleitet und kontinuierlich der Nullwert über die jeweils letzten 20 s (oder die aktuell eingestellte Nullabgleichszeit) ermittelt.

[00106] Ein NULLABGLEICH sollte vor jedem Messzyklus durchgeführt werden. Messzyklen dauern typischerweise nicht länger als 30 Minuten und es ist empfehlenswert, nach einem Messzeitraum von 30 bis 60 Minuten wieder auf den Betriebszustand STANDBY zu schalten, um neuerlich den Nullwert festzustellen. Mit dem neuen Nullwert werden die eventuell neu hinzugekommenen Verschmutzungen der optischen Fenster kompensiert.

[00107] Erst im Betriebszustand MESSUNG wird das Einlassventil umgeschaltet, sodass Messgas (unverdünntes oder verdünntes Abgas) von der Entnahmeleitung zur Messzelle und zum Bypass gepumpt wird. Die Messwerte werden kontinuierlich ermittelt, wobei der zuvor bestimmte Nullwert phasenkorrekt ("vektoriell") abgezogen wird. Mit dem gerätespezifischen Kalibrierfaktor werden die Messwerte in Rußkonzentrationen umgerechnet.

[00108] Manchmal wird während des Betriebszustands MESSUNG eine SPITZENWERTMESSUNG benötigt, beispielsweise zur Ermittlung des während einer Beschleunigung oder Lastaufschaltung aufgetretenen Spitzenwerts. Dazu dienen ein Start- und ein Stopp-Kommando, mit denen während der laufenden Messung ein Intervall für die Spitzenwerkerkennung aktiviert wird, sodass nach dem Stopp-Kommando der während des Intervalls gemessene Spitzenwert abge-

rufen werden kann.

[00109] Im Betriebszustand NULLPUNKTÜBERPRÜFUNG wird ein Magnetventil aktiviert, um "Nullgas" in die Messkammer strömen zu lassen, und die Messwerte werden weiterhin kontinuierlich ermittelt. Dabei wird auch der zuletzt ermittelte Nullwert phasenkorrekt ("vektoriell") abgezogen und die primären Sensorsignale mit dem gerätespezifischen Kalibrierfaktor in Rußkonzentrationen umgerechnet. Wenn nun - beispielsweise infolge einer hinzugekommenen Verschmutzung der Fenster - ein unzulässig hoher Messwert auftritt, beispielsweise mit einem Betrag von größer als $0,001 \text{ mg/m}^3$, oder der ursprüngliche Nullwert nicht erreicht wird, so kann der neu erhaltene Nullgas-Messwert zur Basislinienkorrektur der zuvor erhaltenen Ruß-Messwerte herangezogen werden. Empfohlen wird in einem solchen Fall vor einer weiteren Messung in den Betriebszustand STANDBY zu schalten und den Nullwert neu zu ermitteln.

[00110] Wird die Nullpunktüberprüfung aus einem Messzustand mit hoher, stationärer Rußbelastung aufgerufen, kann es einige Sekunden dauern, bis der stabile Nullpunkt erreicht wird: Die Abfallzeit auf 10 % des letzten Messwerts dauert ca. 1 s, auf 1 % des letzten Messwerts aber wesentlich länger.

[00111] Die Notwendigkeit einer Nullpunktüberprüfung steht im Zusammenhang mit einer möglichen Fensterverschmutzung. Daher wird vom System eine Nullabgleichswarnung ausgegeben, dass eine Nullpunktüberprüfung durchgeführt werden sollte, wenn seit dem letzten Betrieb des Messgeräts im Betriebszustand STANDBY eine im Sekundentakt aufsummierte Gesamtrußkonzentration von z.B. $100000 \text{ s} \cdot \text{mg/m}^3$ (das entspricht z.B. 10 mg/m^3 während 10000 s) durch die Messzelle gefördert wurde. Nach einer solchen geförderten Rußmenge sollte das durch die Fensterverschmutzung verursachte Signal noch immer kleiner als $0,01 \text{ mg/m}^3$ sein. Das ist eine grobe Abschätzung für typische Betriebsbedingungen; die tatsächliche Fensterverschmutzung hängt von diversen Betriebsbedingungen ab, beispielsweise von Druckschwankungen, Stationärmessungen oder Messungen mit variierenden Rußkonzentrationen.

[00112] Wenn der Wert über z.B. $0,05 \text{ mg/m}^3$ liegt, so ist beim Testlauf eine massive Verschmutzung aufgetreten, und / oder das Gerät wurde über einen sehr langen Zeitraum nicht im Betriebszustand STANDBY betrieben. Bei Auftreten so hoher Nullwerte ist eine Reinigung der Fenster erforderlich.

[00113] Bei der Wartungsfunktion RÜCKSPÜLUNG werden alle Ventile geschlossen und dann das Magnetventil zum Einlassen der Druckluft 30 Sekunden lang geöffnet. Diese Spülluft strömt dann durch die Entnahmeleitung und Entnahmesonde zurück in die Verdünnungseinheit. Dabei werden Entnahmesonde und Entnahmeleitung von abgelagerten groben Partikeln gereinigt.

[00114] Die Funktion DICHTHEITSTEST („Lecktest“, Überprüfung des Gaswegs auf Dichtheit) kann zur automatischen Überprüfung der Leckrate des Systems aufgerufen werden und sie kann auch zur Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet werden.

[00115] Der interne Dichtheitstest dient zur Überprüfung der geräteinternen Komponenten (vom Einlassventil bis zur Pumpe) und sollte nach Arbeiten im Inneren des Geräts (Fensterreinigung, Messzellenreinigung, Filtertausch) durchgeführt werden.

[00116] Der externe Dichtheitstest dient zur Überprüfung auch der externen Komponenten (Gesamtweg von der manuell verschlossenen Entnahmesonde oder -leitung bis zur Pumpe) und sollte nach jeder Neuinstallation des Gesamtsystems oder nach Arbeiten am Entnahmesystem durchgeführt werden.

[00117] Mit Start des Dichtheitstests wird der Gasweg auf einen Unterdruck von ca. -110 mbar (relativ zum Umgebungsdruck) evakuiert. Nach einer kurzen Stabilisierungszeit wird der gegebenenfalls von einem Leck verursachte Druckanstieg überprüft. Dieser Anstieg muss so klein sein, dass auch beim maximal erlaubten Unterdruck von -110 mbar die durch das Leck strömende Fehlluft weniger als 1 % des Durchflusses im Messbetrieb des System ausmacht. Eine Fehlermeldung wird bei Überschreiten des Grenzwerts $0,5 \text{ ml/s}$ ausgegeben. Damit besteht ein Sicherheitsabstand zur tolerierten Leckrate von 1 % vom Durchfluss $4 \text{ l/min} = 0,66 \text{ ml/s}$.

[00118] Bei der Funktion RESONANZFREQUENZ SCAN schaltet das System wie am Ende der Betriebsart PAUSE den Laser ab und führt eine Überprüfung der Resonanzfrequenz der Messzelle durch (Dauer ca. 20 Sekunden). Dabei generiert ein in der Messzelle eingebautes zweites Mikrofon, das als Lautsprecher betrieben wird, Schall mit konstanter Amplitude, aber variabler Frequenz zwischen 3750 Hz und 4500 Hz. Das Maximum der vom Sensormikrofon empfangenen Amplitude definiert die Resonanzfrequenz, ihr Wert (in mV) bedeutet die gerätespezifische Mikrofonempfindlichkeit. Durch wiederholtes Aufrufen dieser Funktion (was sinnvollerweise nur nach dem Erreichen eines stabilen Zustands der Temperaturregelung erfolgen soll) und Notieren des Mikrofonsignals über längere Zeit kann überprüft werden, ob eine Drift der Mikrofonempfindlichkeit stattgefunden hat.

[00119] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann darüber hinaus eine verbesserte Bestimmung und Berücksichtigung der vom Relativdruck in der Messkammer abhängigen Mikrofon- und Lautsprecherempfindlichkeit realisiert werden.

[00120] Am Beginn des Betriebszustands PAUSE und des Betriebszustands STANDBY führt das Gerät selbständig eine Bewertung des Nullwerts durch. Im Fall einer Grenzwertüberschreitung wird eine Warnung ausgegeben, dass die optischen Fenster gereinigt werden müssen.

[00121] Bei der Funktion KALIBRIERÜBERPRÜFUNG (SPAN CHECK) wird die gesamte Sensorempfindlichkeit (die Intensität des Laserstrahls sowie die Empfindlichkeit des Mikrofons) mit Hilfe eines Absorberfensters überprüft.

[00122] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann darüber hinaus eine verbesserte Bestimmung und Berücksichtigung der vom Relativdruck in der Messkammer abhängigen Mikrofonempfindlichkeit realisiert werden.

[00123] Die Funktion entspricht dem "Span Check" mit Kalibriergasen bei Gasanalysatoren und bedeutet eine Überprüfung der korrekten Kalibrierung des Messgeräts. Sie sollte je nach Einsatz zwischen einmal pro Woche und einmal pro Monat durchgeführt werden.

[00124] Eine für den Einsatz auf Prüfständen geeignete robuste Realisierung der ursprünglichen Idee, einen optischen Absorber fallweise ins akustische Resonanzrohr einzubringen und damit die Resonanz photoakustisch anzuregen, ist nicht möglich, da der Absorber mikroskopisch kleine Abmessungen besitzen müsste, um die akustischen Eigenschaften der Resonanzzelle nicht zu stören. Außerdem müsste die Absorption weniger als 1 % sein, um ein Signal innerhalb des Messbereichs des erfindungsgemäßen Messgeräts 1, z.B. als „AVL Micro Soot Sensor Plus“ bezeichnet, zu erzeugen.

[00125] Hingegen hat es sich bewährt, ein Objekt mit großer Absorption außerhalb des Resonanzrohres in einem photoakustisch weniger empfindlichen Bereich der Messzelle nahe dem Eintritts- oder Austrittsfenster des Laserstrahls einzufügen. Die Befestigung des Absorbers erfolgt direkt am Messzellenfenster, was ein einfaches, robustes und zuverlässiges Einsetzen ermöglicht. Allerdings ist es - bedingt durch Fertigungstoleranzen von Absorber und Messzelle - nicht vorgesehen, die Absorberfenster verschiedener Geräte untereinander zu tauschen. Das bedeutet, dass ein Absorberfenster ausschließlich zusammen mit einer ganz bestimmten Messzelle verwendet wird. Der Absorptions- oder Standardwert dieser Einheit wird im Zuge der Werkskalibrierung bestimmt und in der Firmware gespeichert, und nur diese Einheit wird zur Kalibrierüberprüfung eines bestimmten Geräts verwendet.

[00126] Die Kalibrierüberprüfung kann nach der Aufwärmphase durchgeführt werden. Dazu wird der Laser aktiviert und der mit dem Absorberfenster erhaltene Wert und seine Abweichung vom Referenzwert werden angezeigt. Die Wiederholbarkeit dieser Kalibrierüberprüfung beträgt ungefähr 5 %, und solange der angezeigte Wert innerhalb dieses Limits mit dem Referenzwert übereinstimmt, sind keine weiteren Schritte nötig. Bei einer größeren Abweichung soll die Kalibrierüberprüfung wiederholt werden, um statistische Ausreißer ausschließen zu können. Bei einer systematischen Abweichung zwischen 10 % und 50 % kann der Benutzer den neu ermittelten Kalibrierfaktor in das Gerät übernehmen, und bei jeder Abweichung, die größer als 10 % ist, sollte eine erneute Messwert-Kalibrierung in Betracht gezogen werden.

[00127] Die Funktion LINEARITÄTSTEST dient einerseits zur Überprüfung der Linearität zwischen der Antwort des Mikrofons und der Aktivierungsleistung des eingebauten Lautsprechers, um die korrekte Funktion des Sensormoduls in der Messzelle sicherzustellen, und andererseits zur Überprüfung der Linearität zwischen Laserleistung und Strom oberhalb des Schwellwerts für die Laseraktivität der Laserdiode.

[00128] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann darüber hinaus eine verbesserte Bestimmung und Berücksichtigung der vom Relativdruck in der Messkammer abhängigen Mikrofon- und Lautsprecherempfindlichkeit realisiert werden.

[00129] Bei der Linearitätsüberprüfung des Mikrofons wird der Lautsprecher in der Messzelle sequentiell mit einer Leistung von 10 bis 100 % der Leistung betrieben, die während des Resonanzfrequenz Scans verwendet wird. Die Antwort des Mikrofons wird aufgezeichnet, und eine lineare Regression zwischen der Lautsprecherleistung und dem Mikrofonsignal wird berechnet. Der angezeigte Regressionskoeffizient sollte über 0,95 liegen. Kleinere Regressionskoeffizienten deuten auf Fehler von Lautsprecher oder Mikrofon hin. Ist die Integrität von Lautsprecher und Mikrofon nicht gewährleistet, muss die Messzelle ersetzt werden.

[00130] Damit die Linearitätsüberprüfung des Lasers mit einem reproduzierbaren Signal durchgeführt werden kann, wird das Absorberfenster installiert. Der Laser wird mit Strömen von 10 bis 120 % jener Differenz betrieben, die zwischen dem Schwellwert des Stroms für Laseraktivität und dem Nominalstrom für 1 W im Standardbetrieb liegt. Die Antwort des Mikrofons wird aufgezeichnet, und eine lineare Regression zwischen Strom und Mikrofonsignal wird berechnet. Der angezeigte Regressionskoeffizient sollte über 0,95 liegen. Kleinere Regressionskoeffizienten deuten auf Fehler von Laser oder Lasertreiber hin. In diesem Fall müssen Laser und/oder Lasertreiber ersetzt werden.

BEZUGSZEICHEN:

Messgerät 1

Messkomponente 2

Messgas 3

Messkammer 4

Schallaufnehmer 5

Auswerteeinheit 6

Anregestrahlung 7

Absorber 8

Messgaspumpe 9

Schallgeber 10

Anregevorrichtung 11

Ermittlungseinheit 12

Druckmesseinheit 13

Steuereinheit 14

Drosselventil 15

Umschaltventil 16

Entnahmestelle 17

Abgasleitung 18

Konditioniereinheit 19

Einlassventil 20

Messeigenschaft C

Koeffizient K_n

Umgebungsdruck P_U

Messkammerdruck P_M

Ermittlungsdruck P_E

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Messgeräts (1), welches zur Messung einer Messeigenschaft (C) einer Messkomponente (2) in einem Messgas (3) geeignet ist, wobei das Messgas (3) in einer Messkammer (4) photoakustisch angeregt wird, der dabei erzeugte Schall mit einem Schallaufnehmer (5) aufgenommen wird und das aufgenommene Signal in einer Auswerteeinheit (6) zur Ermittlung der Messeigenschaft (C) ausgewertet wird, wobei die Auswerteeinheit (6) die ermittelte Messeigenschaft (C) mittels einer Korrekturfunktion korrigiert, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Ermittlung zumindest eines Parameters der Korrekturfunktion zumindest einmal ein Ermittlungsdruck (P_E) in der Messkammer (4) eingestellt wird, der Absolutdruck (P) in der Messkammer (4) bei diesem Ermittlungsdruck (P_E) ermittelt wird, bei diesem Absolutdruck (P) zumindest eine Ermittlungsmessung bei einer Ermittlungsanregung durchgeführt wird, und der zumindest eine Parameter anhand des Absolutdrucks (P) und des Ermittlungsmessergebnisses (C_E) der Ermittlungsmessung ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Ermittlungsdruck (P_E) als ein Relativdruck zum Umgebungsdruck (PU) definiert ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Ermittlungsanregung eine in der Anregungsstärke reproduzierbare und von der Messkomponente unabhängige akustische Ermittlungsschwingung angeregt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ermittlungsanregung akustisch mittels eines Schallgebers (10) erzeugt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ermittlungsanregung photoakustisch erzeugt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ermittlungsanregung mittels eines in einem Strahlengang einer zur Erzeugung des photoakustischen Effekts verwendeten elektromagnetischen Anregestrahlung (7) angeordneten Absorbers (8) erzeugt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Ermittlungsdruck (P_E) in der Messkammer (4) von einer Pumpvorrichtung, vorzugsweise von der im Messgerät (1) vorhandenen Messgaspumpe (9), erzeugt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Parameter der Korrekturfunktion ein Koeffizient (K_n) einer Polynomfunktion erster, zweiter oder höherer Ordnung ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Polynomfunktion den Term

$$K_0 + K_1 * ((P - P_0) / P_0) + K_2 * ((P - P_0) / P_0)^2$$

enthält, wobei P der Absolutdruck in der Messkammer ist, P_0 der Referenzdruck bei Normbedingungen, vorzugsweise 1013 mbar, ist, und K_0 , K_1 und K_2 Koeffizienten der Polynomfunktion sind.

10. Messgerät (1) zur Messung einer Messeigenschaft (C) einer Messkomponente (2) in einem Messgas (3), wobei das Messgerät (1) eine Messkammer (4), zumindest eine Anregevorrückung (11) zur photoakustischen Anregung des Messgases (3) in der Messkammer (4), einen Schallaufnehmer (5) und eine Auswerteeinheit (6) aufweist, wobei mit der Auswerteeinheit (6) das vom Schallaufnehmer (5) aufgenommene Signal zur Ermittlung einer Messeigenschaft (C) auswertbar und die Messeigenschaft (C) mittels einer Korrekturfunktion korrigierbar ist, und wobei an der Messkammer (4) eine Druckmesseinheit (13) zur Ermittlung des Absolutdrucks (P) in der Messkammer (4) vorgesehen ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Messgerät eine Ermittlungseinheit (12) aufweist, mit der zur Ermittlung

von zumindest einem Parameter der Korrekturfunktion ein Ermittlungsdruck (P_E) in der Messkammer (4) einstellbar, der Absolutdruck (P) bei diesem Ermittlungsdruck (P_E) ermittelbar und bei diesem Absolutdruck (P) zumindest eine Ermittlungsmessung bei einer Ermittlungsanregung durchführbar ist, wobei zumindest ein Parameter der Korrekturfunktion aus zumindest dem gemessenen Absolutdruck (P) und dem Ermittlungsmessergebnis (C_E) der Ermittlungsmessung mit der Ermittlungseinheit (12) ermittelbar ist.

11. Messgerät (1) nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass an der Messkammer (4) ein Schallgeber (10) zur akustischen Ermittlungsanregung angeordnet ist.
12. Messgerät (1) nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Ermittlung des zumindest einen Parameters der Korrekturfunktion ein Absorber (8) in einem Strahlengang der zur Erzeugung des photoakustischen Effekts verwendeten elektromagnetischen Anregestrahlung (7) angeordnet ist.
13. Messgerät (1) nach einem der Ansprüche 10 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Messgerät (1) eine Pumpvorrichtung, vorzugsweise eine Messgaspumpe (9) aufweist, mittels der der Ermittlungsdruck in der Messkammer (4) einstellbar ist.
14. Messgerät (1) nach einem der Ansprüche 10 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ermittlungseinheit (12) dazu eingerichtet ist, den zumindest einen Parameter der Korrekturfunktion vor jedem Prüflauf erneut zu ermitteln.

Hierzu 1 Blatt Zeichnungen

1/1

