

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 50122/2016 (51) Int. Cl.: **G01N 21/17** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 22.02.2016 **G01N 29/34** (2006.01)
(45) Veröffentlicht am: 15.02.2018

(56) Entgegenhaltungen:
WO 2008026183 A1
EP 2518473 A1
DE 3322870 A1

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

(72) Erfinder:
Harms Klaus-Christoph Dr.
8051 Thal/Graz (AT)
Unger Erich Ing.
8020 Graz (AT)
Schindler Wolfgang Dr.
8043 Graz (AT)

(74) Vertreter:
Patentanwälte Pinter & Weiss OG
Wien

(54) **Verfahren zur Analyse von Komponenten eines Messgases**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Analyse von in einem Messgas enthaltenen Messkomponenten mittels eines photoakustischen Messgeräts (1). Das Messgas (2) wird in einer Messkammer (3) mit elektromagnetischer Strahlung (4) bestrahlt, wobei die elektromagnetische Strahlung (4) zur Erzeugung eines photoakustischen Effekts gemäß einem Anregungssignal (A) mit einer Anregungsfrequenz (F_A) pulsiert. Der photoakustisch erzeugte Schall wird mit einem Schallaufnehmer (5) gemessen und von einer Auswerteeinheit (6) ausgewertet. Dabei wird zumindest ein charakteristischer Parameter der akustischen Eigenschaften der das Messgas (2) enthaltenden Messkammer (3) während der Messung ermittelt und die Anregungsfrequenz (F_A) wird während der Messung in Abhängigkeit von einer Veränderung des charakteristischen Parameters angepasst.

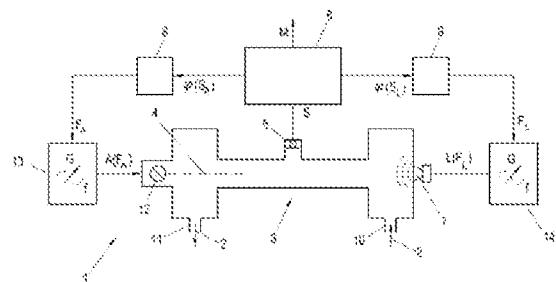


Fig. 1

Beschreibung

VERFAHREN ZUR ANALYSE VON KOMPONENTEN EINES MESSGASES

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Analyse von in einem Messgas enthaltenen Messkomponenten mittels eines photoakustischen Messgeräts, wobei das Messgas in einer Messkammer mit elektromagnetischer Strahlung bestrahlt wird, wobei die elektromagnetische Strahlung zur Erzeugung eines photoakustischen Effekts gemäß einem Anregungssignal mit einer Anregungsfrequenz pulsiert, und wobei der photoakustisch erzeugte Schall mit einem Schallaufnehmer gemessen und von einer Auswerteeinheit ausgewertet wird.

[0002] 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:

[0003] Die zu messenden Komponenten des Messgases (im Folgenden als Messkomponente bezeichnet) 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, deren aktuelle Konzentration durch die photoakustische Einrichtung zeitlich aufgelöst gemessen werden soll, bezeichnet. 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 zu messende Komponente und damit das umgebende Gas durch die Absorption des periodisch eingestrahlten 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.

[0004] Als Messkammer bzw. Messzelle wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung eine speziell ausgeformte Einrichtung bezeichnet, in der sich Messgas befindet und in der dieses zu akustischen Schwingungen und insbesondere zu einer ausgeprägten akustischen Resonanzschwingung angeregt werden kann.

[0005] Als Messgas wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Anmeldung das in der Messkammer vorhandene, bzw. das diese durchströmende Gas bezeichnet. Im Allgemeinen weist dieses eine variierende Zusammensetzung und daher im Allgemeinen variierende charakteristische Parameter der akustisch relevanten Eigenschaften (z.B. Schallgeschwindigkeit, Schallkennimpedanz, Dichte, Viskosität, etc.) auf. Zur Erhöhung der Messempfindlichkeit wird nach dem Stand der Technik die Resonanzüberhöhung des Signals durch die akustische Resonanz einer geeignet ausgeformten Messzelle genutzt. Dazu wird vor der eigentlichen Messung die akustische Resonanzfrequenz der Messzelle mit an sich bekannten Methoden bestimmt, beispielsweise indem die Messzelle sequentiell bei mehreren Frequenzen zu akustischen Schwingungen angeregt und die Frequenz mit maximaler Signalamplitude bestimmt wird. In der Folge wird während der eigentlichen Messung die Pulsationsfrequenz der Lichteinstrahlung so gut wie möglich auf die zuvor bestimmte akustische Resonanzfrequenz der Messzelle abgestimmt.

[0006] Bekannte Messsysteme dieser Art werden häufig sehr spezifisch für Anwendungsfälle mit nur einer Gasart und Messkomponente ausgelegt. Auch werden, um die Resonanzfrequenz der Messzelle möglichst konstant zu halten und den Einfluss der Temperatur zu reduzieren, Messkammer und Messgas im Allgemeinen thermostatisiert und bei konstantem Druck betrieben, was allerdings nicht immer für die Konstanz der akustischen Resonanzfrequenz ausreicht.

[0007] Beim Einsatz solcher bekannten Geräte, beispielsweise zur Messung der im Abgas einer Verbrennungsanlage enthaltenen Rußpartikel, kann aber folgendes Problem auftreten. Insbesondere bei der zeitlich hochaufgelösten Messung beim dynamischen Betrieb mit unterschiedlichen Brennverfahren einer Verbrennungskraftmaschine werden nicht nur rasche Änderungen der zu messenden Partikelkonzentration, sondern auch rasche, manchmal sogar sprunghafte Änderungen der Zusammensetzung des Abgases auftreten.

[0008] Während bestimmte Komponenten, beispielsweise gasförmige Bestandteile des Messgases, nur mit „Licht“ einer sehr engen und genau definierten Wellenlänge photoakustisch angeregt werden können, können andere Komponenten, insbesondere Feststoffe, wie etwa Rußpartikel, über einen sehr breiten Wellenlängenbereich angeregt werden. Bei der Messung solcher Komponenten ist darauf Bedacht zu nehmen, dass die Wellenlänge der elektromagnetischen Anregung in einem Bereich gewählt wird, in dem keine anderen im Messgas enthaltenen Stoffe photoakustisch angeregt werden.

[0009] Zur Kennzeichnung des aktuellen Betriebspunktes und der resultierenden Zusammensetzung des Abgases einer Brennkraftmaschine, eventuell auch für eine Korrektur der Messergebnisse des Abgasmesssystems, könnte das mit Sensoren bestimmbare Verbrennungsluftverhältnis „Lambda“ - auch Luftverhältnis oder Luftzahl genannt - verwendet werden. Aber auch bei konstantem Lambda, beispielsweise bei den auf $\lambda = 1$ geregelten Ottomotoren, kann sich die Zusammensetzung des Abgases ändern. Und, wie die Erfinder in umfangreichen Untersuchungen festgestellt haben und wie aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu erwarten ist, ändern sich mit einer Änderung der Zusammensetzung des Abgases im Allgemeinen mehrere akustische Parameter des Systems, insbesondere auch die akustische Resonanzfrequenz. Und in der Folge ändert sich im Allgemeinen die Empfindlichkeit des photoakustischen Messsystems.

[0010] WO 2008/026183 A1 offenbart einen photoakustischen Gasetektor, wobei ein Laserstrahl einer Lichtquelle mit einem akusto-optischen Modulator in eine Abfolge von Lichtpulsen mit festgelegter Chopping-Frequenz moduliert wird bzw. alternativ die Lichtquelle selbst Lichtpulse mit einer fixen Chopping-Frequenz abgibt. Innerhalb einer optischen Kavität, die über zwei semitransparente Spiegel definiert ist, befindet sich eine Gaszelle. Das die optische Kavität durchstrahlende Licht wird durch einen Photodetektor gemessen. Wenn sich die Transmission ändert, beispielsweise dann, wenn die Laserwellenlänge nicht mehr in Resonanz mit der optischen Kavität ist, wird entweder die Laserwellenlänge angepasst oder es wird die Länge der optischen Kavität durch Verschiebung der Spiegel mittels eines Piezoantriebs angepasst.

[0011] EP 2518473 A1 offenbart einen photoakustischen Sensor, bei dem Druckschwankungen der Umgebung außerhalb einer Messzelle aufgezeichnet werden, insbesondere während eine Lichtquelle des Detektors deaktiviert ist, und die Anregungsfrequenz derart angepasst wird, dass die Beeinflussung durch die Umgebung möglichst reduziert wird.

[0012] Die Erfindung hat das Ziel, ein Verfahren bereitzustellen, das die Nachteile des Standes der Technik vermeiden kann.

[0013] Zur Erreichung dieses Ziels wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, dass zumindest ein charakteristischer Parameter der akustischen Eigenschaften der das Messgas enthaltenden Messkammer während der Messung ermittelt und die Anregungsfrequenz während der Messung in Abhängigkeit von einer Veränderung des charakteristischen Parameters angepasst wird.

[0014] Als „charakteristische Parameter der akustischen Eigenschaften der mit dem Messgas gefüllten Messkammer“ werden Größen bezeichnet, die zur Charakterisierung von Teilen des oder des gesamten Schwingungsspektrums, insbesondere der genutzten Resonanz, herangezogen werden können. Das kann beispielsweise die Resonanzfrequenz sein, oder ein Maß für die Dämpfung (z.B. Dämpfungsfrequenz, Halbwertsbreite, Gütezahl, etc.) der genutzten akustischen Resonanz, etc. Wobei eine Einzelresonanz einfacherweise mithilfe der Lorentzkurve durch ein paar wenige der folgenden Parameter charakterisiert werden kann: Resonanzfre-

quenz, Dämpfungsfrequenz, Modenstärke (= Stärke der Anregung, Durchmesser des Resonanzkreises), Koordinaten (Realteil und Imaginärteil) des Scheitelpunkts des Resonanzkreises, Koordinaten des Resonanzpunkts des Resonanzkreises, Richtungswinkel der Hauptachse vom Scheitel zum Resonanzpunkt des Resonanzkreises (= Referenzphase). Darunter zu verstehen sind auch weitere für das akustische Messsystem relevante Parameter, wie z.B. die Dichte des Messgases, die z.B. für die Kopplung der akustischen Schwingung an den Lautsprecher und/oder an das Mikrofon und damit die Empfindlichkeit des Messsystems betrifft.

[0015] Im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung wird als photoakustische Anregung ein Vorgang bezeichnet, bei dem pulsierende elektromagnetische Strahlung (insbesondere Laserlicht) zur Anregung von akustischen Schwingungen des Messgases in der Messkammer verwendet wird.

[0016] Im Gegensatz dazu wird als Lautsprecher-Anregung ein Verfahren bezeichnet, bei dem ein Schallgeber, beispielsweise ein als „Lautsprecher“ verwendetes (zweites) „Mikrofon“, verwendet wird, um akustische Schwingungen des Messgases in der Messkammer anzuregen, was sowohl alternativ, als auch gleichzeitig zur photoakustischen Anregung erfolgen kann. Während der photoakustischen Messung (beim „Grundton“) kann beispielsweise die Anregung mit dem Lautsprecher beim „Oberton“ erfolgen.

[0017] Wie die Erfinder festgestellt haben, ändert sich mit einer relevanten Änderung der Zusammensetzung des Messgases im Allgemeinen auch seine Schallgeschwindigkeit. In der Folge verschiebt sich die Resonanzfrequenz der genutzten akustischen Resonanz der Messkammer, sodass mit einer zuvor bestimmten Anregungsfrequenz der periodischen Lichteinstrahlung nicht mehr diese Resonanz, sondern ein akustischer Betriebspunkt mit einer anderen, vom akustischen Resonanzspektrum der Messkammer abhängigen Signalüberhöhung angeregt wird. Die dadurch bewirkte Änderung der Messempfindlichkeit wirkt sich unmittelbar auf das Messergebnis aus.

[0018] Als Messergebnis wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Erfindung insbesondere der die Konzentration der Messkomponente anzeigende Wert der zur photoakustisch angeregten Schwingung bei der Resonanzfrequenz der genutzten akustischen Resonanz gehörigen Schwingungsamplitude, abzüglich eines aktuell relevanten Nullwerts, bezeichnet. Dies ist unabhängig davon, ob dieses Ergebnis aus dem Messwert einer Messung direkt bei der Resonanzfrequenz erhalten oder rechnerisch aus dem Messwert einer Messung bei einer Anregungsfrequenz in der Nähe der Resonanzfrequenz ermittelt wird. Statt eines Absolutbetrags kann vorteilhaft der mit einer Funktion des Phasenwinkels gewichtete Realteil abzüglich der entsprechenden Nullwertkomponente verwendet werden. Aufgrund des enthaltenen Vorzeichens wird dadurch eine weitere Mittelung sinnvoll möglich.

[0019] In der Nähe der Resonanzfrequenz F_{RES} befindet sich eine Anregungsfrequenz F_A - im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung - dann, wenn der (absolut genommene) Frequenzabstand weniger als etwa das Vierfache, vorzugsweise weniger als etwa das Einfache der Dämpfungsfrequenz F_D der genutzten Resonanz ausmacht. Bei einem typischen Fall beträgt F_{RES} ungefähr 4 kHz und F_D ungefähr 100 Hz, aber auch wesentlich höhere und niedrigere Werte können mit unterschiedlichen Bauformen und -größen des Messsystems realisiert werden und sind bekannt geworden.

[0020] Auch andere charakteristische Parameter der akustischen Eigenschaften der das Messgas enthaltenden Messkammer haben eine direkte Auswirkung auf das Messergebnis, etwa die Dämpfung oder die Gütezahl der genutzten Resonanz des Systems, sodass ihre Ermittlung und Berücksichtigung neben der im Allgemeinen gegebenen Möglichkeit, sie zur Anpassung der Anregungsfrequenz zu nutzen, auch eine direkte Verbesserung der Messgenauigkeit bewirken kann.

[0021] Aber nicht alle charakteristischen Parameter, die sich mit dem Messgas ändern, haben eine unmittelbare Auswirkung auf das Messergebnis, und auch solche Parameter können zur Anpassung der Anregungsfrequenz verwendet werden. Wesentlich ist, dass während der Mes-

sung der Messkomponente zusätzlich zumindest ein charakteristischer akustischer Parameter ermittelt und zur Anpassung der aktuellen Anregungsfrequenz verwendet wird.

[0022] In vorteilhafter Weise kann nun auf Basis des ermittelten charakteristischen Parameters ein Wert für eine aktuelle akustische Resonanz F_{res} der Messkammer ermittelt und die Anregungsfrequenz F_A auf diesen Wert eingestellt werden. Auf diese Art wird erreicht, dass ein wesentlicher akustischer Parameter des Messsystems, nämlich die Resonanzfrequenz, verfügbar gemacht wird und einerseits für ein optimales Einstellen der Anregungsfrequenz und andererseits zur Berücksichtigung bei der weiteren Auswertung der Messergebnisse genutzt werden kann.

[0023] Die Art der Ermittlung der Resonanzfrequenz hängt in hohem Maß vom gewählten charakteristischen Parameter ab, und dafür können zahlreiche Kennwerte der akustischen Eigenschaften der Messkammer (immer bezogen auf die Messkammer mit dem gerade darin enthaltenen Messgas!) herangezogen werden.

[0024] Neben den weiter unten genauer beschriebenen Verfahren könnte beispielsweise laufend eine Sequenz von mehreren Anregungsfrequenzen in der Nähe der Resonanzfrequenz durchlaufen und die zugehörigen Signalamplituden relativ zu einer Bezugsamplitude (z.B. die mittlere oder die maximale Amplitude) bestimmt werden. Die Frequenz beim Maximum der Relativamplituden kann als Resonanzfrequenz gelten (Maximumdetektor). Die zur Durchführung eines solchen Frequenz-Scans benötigte Zeitdauer steht aber im Gegensatz zur gewünschten hohen zeitlichen Auflösung des Messergebnisses.

[0025] Es könnte auch gleichzeitig zur Anregung mit oder bei der Resonanzfrequenz mit einer Überwachungsfrequenz angeregt und die Signalamplitude überwacht werden. Aufgrund einer Änderung dieser Amplitude kann auf eine Veränderung der akustischen Eigenschaften des Systems geschlossen werden. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die Amplitude bei der Überwachungsfrequenz von der Amplitude der Anregungsfrequenz auseinandergehalten werden kann, was durchaus möglich ist, wie weiter unten ausgeführt wird.

[0026] Im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung wird als Grundton-Anregung eine Anregung bei einer Frequenz nahe der Resonanzfrequenz der genutzten akustischen Resonanz der mit dem Messgas gefüllten Messkammer bezeichnet. Dies ist unabhängig von der Art der Anregung. Während der eigentlichen Messung kann beispielsweise beim Grundton die photoakustische Anregung durch den Laser erfolgen.

[0027] Als Oberton-Anregung wird eine Anregung bei einem Oberton der Grundton-Schwingung, insbesondere bei der doppelten Frequenz, bezeichnet. Auch dies ist unabhängig von der Art der Anregung. Während der eigentlichen Messung kann beispielsweise die Anregung beim Oberton akustisch durch den Schallgeber erfolgen.

[0028] Eine veränderte Zusammensetzung des Messgases kann auch zu einer Veränderung der akustischen Dämpfung der zur Messung genutzten Messkammerresonanz und damit zu einer anderen Resonanzgüte und Resonanzüberhöhung führen, was ebenfalls eine Änderung der resultierenden Messempfindlichkeit bewirkt.

[0029] Darüber hinaus kann eine veränderte Zusammensetzung des Messgases auch zu einer Veränderung der Massendichte und damit der spezifischen akustischen Impedanz (Schallkennimpedanz) des Messgases führen. Letztere ist durch das Produkt aus aktueller Massendichte und Schallgeschwindigkeit gegeben und ist ein wesentlicher Parameter der Übertragungsfunktion bzw. der Empfindlichkeit des Schallaufnehmers. Und das Produkt aus der Massendichte und dem Quadrat der Schallgeschwindigkeit des Messgases ist ein Maß für seine adiabatische Kompressibilität und damit für die wirksame pneumatische „Federkonstante“ des Messkammerolumens. Diese charakterisiert die bei gegen Null gehenden Frequenzen, weit unterhalb der ersten Resonanzfrequenz der Messkammer bei Werten von z.B. kleiner als 100 Hz, gegebene Nullpunktsempfindlichkeit der Resonanzkurve, deren Maximalwert bei der Resonanzfrequenz im Wesentlichen durch das Produkt aus Nullpunktsempfindlichkeit und Resonanzgüte bestimmt ist. Diese Begriffe sind dem Fachmann aus der Theorie elektromagnetischer oder akustischer

Resonanzsysteme bekannt.

[0030] Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist es möglich, die Auswirkung einer geänderten Messgaszusammensetzung auf die akustischen Eigenschaften und insbesondere die Empfindlichkeit des Messsystems in Echtzeit zu erkennen und bei der Messung und ihrer Auswertung zu berücksichtigen.

[0031] Im Zuge der eigentlichen Messung wird dazu laufend der zumindest eine charakteristische Parameter der akustischen Eigenschaften der mit dem Messgas gefüllten photoakustischen Messkammer bestimmt und bei der Einstellung bzw. Regelung der Anregungsfrequenz berücksichtigt. Diese Berücksichtigung erfolgt insbesondere durch ein laufendes Nachführen (Nachstellen) der Anregungsfrequenz, sodass die Messkammer ständig bei Frequenzen nahe der, durch die Änderung der Zusammensetzung des Messgases bedingten, sich verändernden akustischen Resonanz betrieben wird.

[0032] Unabhängig davon und gegebenenfalls zusätzlich kann diese Berücksichtigung auch durch eine numerische Korrektur der Messwerte, bzw. der aktuell anzuwendenden Messempfindlichkeit, erfolgen. Beispielsweise kann als charakteristischer Parameter der Wert der aktuellen Resonanzüberhöhung bzw. Resonanzgüte verwendet werden und in Relation zu der bei der ursprünglichen Kalibrierung des Systems gegebenen Resonanzüberhöhung gesetzt werden. Oder es kann der Abstand der aktuellen Anregungsfrequenz von der aktuellen Resonanzfrequenz benutzt werden, um einen Wert zu bestimmen, der im Fall der Anregung bei der Resonanzfrequenz gemessen worden wäre, was mithilfe der mathematischen Beschreibung der Resonanz durch beispielsweise die Lorentzkurve (siehe unten) möglich ist. Mithilfe dieser Theorie kann auch laufend ein aktueller Scheitelpunkt des Resonanzkreises der genutzten Resonanz ermittelt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

[0033] Zur Ermittlung des zumindest einen charakteristischen Parameters der akustischen Eigenschaften der mit dem Messgas gefüllten photoakustischen Messkammer und zu seiner Berücksichtigung können mehrere an sich bekannte signalanalytische Verfahren und physikalische Zusammenhänge genutzt und miteinander kombiniert werden. Auch wenn die erfindungsgemäß zur Anwendung kommenden Verfahrensschritte grundsätzlich auch analog realisiert werden können, können insbesondere die für die digitale Realisierung maßgeblichen Fachgebiete berücksichtigt werden, nämlich insbesondere das Abtast-Theorem (Nyquist-Shannon Sampling-Theorem) zur Vermeidung einer Signalverfälschung (Aliasing) beim Digitalisieren (Abtasten) und Nachabtasten (Dezimation) des Signals, die Theorie rekursiver und nicht-rekursiver digitaler Filter bestimmten Filtertyps, die Synchron-Demodulation (Synchron-Detektion) zur frequenz- und phasenselektiven Bestimmung von im Signal enthaltenen Signalkomponenten, die Theorie zur sogenannten Nachlaufsynchronisation (Phase-Locked-Loop, PLL), die Theorie der unter anderem in der Nachrichten- und Regelungstechnik verwendeten Ortskurven (Nyquist-Diagramm), die als Lorentzkurve bekannt gewordene, auch Cauchy- oder Breit-Wigner-Verteilung genannte Theorie zur näherungsweise Beschreibung der tatsächlich auftretenden Resonanzphänomene, insbesondere in der Akustik und allgemein in der Spektroskopie und Physik, und die Mathematik der Nullstellensuche durch beispielsweise ein mehrdimensionales Newton-Verfahren oder der numerischen Regressionsanalyse (Least Squares Fitting) quadratischer Kurven (Quadratic Curve Fitting).

[0034] Im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung wird vorausgesetzt, dass der Fachmann mit diesen und weiteren theoretischen Grundlagen der Akustik und Signalanalyse, sowie deren digitalen und analogen Anwendungen vertraut ist.

[0035] In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung kann die Anpassung der Anregungsfrequenz F_A mithilfe zumindest eines Reglers erfolgen.

[0036] Um den zumindest einen charakteristischen Parameter der akustischen Eigenschaften der mit dem Messgas gefüllten photoakustischen Messkammer im Verfahrensablauf berücksichtigen zu können braucht es im Allgemeinen einen oder auch mehrere zugehörige Referenzwerte, die insbesondere als Sollwerte für geschlossene Regelkreise dienen können. Die

Identifikation dieser Werte kann vorteilhafterweise noch vor der eigentlichen Messung in einer eigenen Sequenz erfolgen, sodass für die eigentliche Messung eine hohe zeitliche Auflösung erreicht werden kann; oder sie geschieht laufend zwischen den einzelnen Messungen, wenn dafür genügend Zeit und gerätetechnische Kapazität vorhanden ist. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird daher vor der Messung und/oder während der Messung zumindest ein von den akustischen Eigenschaften des aktuellen Messgases weitgehend unabhängiger Referenzwert des akustischen Verhaltens des Messsystems als Sollwert für zumindest einen charakteristischen Parameter ermittelt.

[0037] Als Referenzwert in diesem Zusammenhang wird ein das akustische Verhalten des Messsystems charakterisierender Wert verstanden, der völlig oder weitgehend unabhängig von den akustischen Eigenschaften des in der Messkammer befindlichen Messgases ist. Ein solcher Wert ist beispielsweise der oben als Referenzphase bezeichnete Richtungswinkel der Hauptachse vom Scheitel zum Resonanzpunkt des Resonanzkreises. In einer bevorzugten Ausführung ist das ungefähr die Phasenlage des Mikrofonsignalanteils bei der Resonanzfrequenz relativ zur Phase der optoakustischen Anregung bei der Resonanzfrequenz. In Analogie dazu ist ein anderer solcher Referenzwert die Phasenlage des Mikrofonsignalanteils beim Oberton relativ zur Phase der Anregung beim Oberton. Darüberhinaus kann es weitere als Referenzwert zu verwendende Größen geben, beispielsweise diverse Maße für die akustischen Verluste bzw. die Dämpfung des Systems, wenn diese im Wesentlichen von der Geometrie der Messkammer und der angeschlossenen Rohre und Schläuche und nur zu einem relativ geringeren Teil von den akustischen Eigenschaften des Messgases bestimmt sind.

[0038] In vorteilhafter Weise kann der charakteristische Parameter die auf die Phase des Anregungssignals bezogene Phase eines Messsignals sein, wobei das Messsignal der im Mikrofonsignal enthaltene und mit der Anregungsfrequenz angeregte Signalanteil des Mikrofonsignals ist. Diese Phase φ wird aus den in der Bezugsphasenlage („Realteil“, „in phase part“) und in Quadratur („Imaginärteil“, „quadrature part“) stehenden Anteilen der bei der Anregungsfrequenz auftretenden Komponente des Mikrofonsignals S gemäß der folgenden Formel bestimmt:

[0039]
$$\varphi = \arctan (\text{Imaginärteil} / \text{Realteil}) \quad (I)$$

[0040] Die bei der Anregungsfrequenz auftretende Komponente des Mikrofonsignals S wird hierin auch als Messsignal S_A bezeichnet.

[0041] Als Mikrofonsignal wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung das vom Messsystem erfasste und ausgewertete Signal bezeichnet. Erst die Auswertung generiert daraus weitere Größen.

[0042] Als Messsignal wird hierin der zu einer bestimmten Frequenz (insbesondere dem Grundton und/oder dem Oberton) gehörende Anteil des Mikrofonsignals bezeichnet. Dieser kann von einem Synchrondemodulator, der synchron - also bei derselben Frequenz und mit bekannter und festen Phasenbeziehung - zum Anregungssignal betrieben wird, bestimmt und als Realteil und Imaginärteil dargestellt werden, sodass daraus ein zugehöriger Absolutbetrag (Amplitude) und eine Phase berechnet werden können. In einer spezifischen Ausführungsform können vom Synchrondemodulator gleichzeitig beide Signalanteile bestimmt werden, d.h. sowohl der Grundton- als auch der Obertonanteil.

[0043] Im Zusammenhang mit einem System zur photoakustischen Messung der Messkomponente (insbesondere Ruß) kann im engeren Sinn als „Messsignal“ der Anteil des Mikrofonsignals bezeichnet werden, der die gleiche Frequenz wie die photoakustische Anregung durch den Laser hat. Diese liegt immer in einem Bereich nahe der Resonanzfrequenz der genutzten Resonanz der mit dem Messgas gefüllten Messkammer („Grundton“), sodass die Resonanzüberhöhung eine Verstärkung des Messsignals bewirkt.

[0044] Mithilfe dieses charakteristischen Parameters kann die angestrebte Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz vorteilhaft realisiert werden, da der Wert der aktuellen Phase φ dann mit einem unabhängig davon bestimmten Sollwert φ_{soll} der Phase übereinstimmt, wenn die Anregungs- und Analysefrequenz F_A mit einer unabhängig davon bestimmten Soll-Frequenz

$F_{A,soll}$ übereinstimmt. Es ist daher möglich, die Anregungsfrequenz F_A mit einem analogen oder digitalen Regler so einzustellen, dass die Abweichung des Istwertes φ vom Sollwert φ_{soll} der Phase minimiert und die Anregungsfrequenz F_A zur Sollfrequenz $F_{A,soll}$ hingeführt wird.

[0045] Für den Regler, bzw. den Regelalgorithmus, ist es vorteilhaft, wenn Phasen in der Nähe von $\pm 180^\circ$ und entsprechende Phasensprünge, die gemäß obenstehender Formel aufgrund der Tangens- bzw. Arcus-Tangens-Funktion möglich sind, vermieden werden, und zwar sowohl beim Sollwert φ_{soll} , als auch beim Istwert φ der Phase, als auch bei ihrer Differenz. Das gelingt in vorteilhafter Weise, wenn Real- und Imaginärteil des Messsignals S_A mithilfe einer Drehmatrixoperation so um dem Winkel des Sollwerts der Phase gedreht bzw. transformiert werden, dass der gedrehte bzw. transformierte Sollwert der Phase Null ist. Dadurch stellt der aus dem Ergebnis der Transformation berechnete transformierte Istwert der Phase (bis auf das Vorzeichen) auch die Abweichung vom neuen Sollwert (Null) dar.

[0046] Weiters ist es vorteilhaft, wenn vor oder während der eigentlichen Messungen ein typischer Wert der Steilheit $k' = (\Delta F_A / \Delta \varphi)$ oder $k = (\Delta F_A / \Delta \tan(\varphi))$ des Zusammenhangs zwischen einer Änderung der Anregungsfrequenz F_A und der Phase φ bestimmt und dieser vom Regler, bzw. vom Regelalgorithmus, als Parameter verwendet wird. Auf diese Art kann der funktions-tüchtige Frequenzbereich der Regelung vergrößert werden, auch über etwaige von Nebenresonanzen bewirkte Extrema im Phasenverlauf, bei denen im Verlauf der Steilheit k Singularitäten auftreten, hinaus.

[0047] Für den Regler, bzw. den Regelalgorithmus, wird bevorzugt ein Proportionalregler eingesetzt, aber auch andere Regelungsverfahren sind vorstellbar, zum Beispiel Regler mit einem Integralanteil.

[0048] In vorteilhafter Weise kann aus dem Mikrofonsignal S die Resonanzfrequenz F_{RES} einer ausgeprägten akustischen Resonanz als Sollfrequenz $F_{A,soll}$ ermittelt und dem Regler direkt als Führungsgröße für die Anregungsfrequenz F_A vorgegeben werden.

[0049] Ein besonders günstiger Fall liegt vor, wenn als Sollfrequenz $F_{A,soll}$ die Resonanzfrequenz F_{RES} einer ausgeprägten akustischen Resonanz angestrebt wird, denn diese Resonanzfrequenz kann laufend aus den Messergebnissen bestimmt und könnte sogar direkt, in einem einzigen Regelungsschritt, eingestellt werden. Möglich ist das, weil die Frequenzabhängigkeit der Resonanzkurve in der Nähe der Resonanzfrequenz näherungsweise mit nur 3 Parametern durch die Lorentzkurve dargestellt werden kann, und die Frequenzabhängigkeit des zugehörigen Phasenverlaufs durch eine sehr einfache Formel mit nur 2 Parametern (Resonanzfrequenz F_{RES} und Dämpfungsfrequenz F_D) gegeben ist. Abgesehen von diversen systembedingten Phasendrehungen durch andere akustische Resonanzen des Systems und durch analoge und digitale Teilsysteme gilt für den durch den reaktiven und dissipativen Anteil der Lorentzkurve gegebenen Phasenwinkel Ψ folgender Zusammenhang:

[0050]
$$\tan(\Psi) = (F_{RES} - F_A) / F_D \quad (II)$$

[0051] Dabei bezeichnen F_{RES} die Resonanzfrequenz der betrachteten Resonanz, F_A die aktuelle Anregungsfrequenz, und F_D die Dämpfungsfrequenz. Letztere charakterisiert die bei dieser Resonanz wirksame Dämpfung des Systems und hat den halben Wert der sogenannten Halbwertsbreite der Resonanzkurve (FWHM: Full Width Half Maximum), und mit ihr kann die Resonanzgüte Q gemäß der folgenden Formel berechnet werden:

[0052]
$$Q = F_{RES} / (2 * F_D) \quad (III)$$

[0053] Wenn also die Dämpfungsfrequenz F_D oder ein äquivalenter Dämpfungsparameter der akustischen Resonanz in hinreichender Genauigkeit bekannt ist, kann laufend aus der aktuellen Anregungsfrequenz F_A und dem zugehörig bestimmten Phasenwinkel Ψ die Resonanzfrequenz F_{RES} bestimmt und als Sollfrequenz $F_{A,soll}$ der Frequenzregelung vorgegeben werden.

[0054] In vorteilhafter Weise kann aus der Änderung des Messsignals S eine aktuelle Dämpfungsfrequenz F_D und/oder eine Güte Q der Resonanz ermittelt werden.

[0055] Außerdem zeigt obige Formel, dass die Dämpfungsfrequenz F_D in der Nähe der Reso-

nanzfrequenz, wo $\tan(\Psi)$ und damit Ψ kleine Werte von ungefähr Null aufweisen, gleich ist wie der negative Wert der Steilheit $k = (\Delta F_A / \Delta \tan(\varphi))$ des Zusammenhangs zwischen einer Änderung der Anregungsfrequenz F_A und dem Tangens der Phase φ . Das wiederum kann besonders vorteilhaft genutzt werden, indem als Stellgröße, bzw. als aktuelle Frequenz, nicht direkt die Sollfrequenz $F_{A,soll}$ eingestellt wird, sondern durch Frequenzen angenähert wird, die ungefähr alternierend geringfügig unter- oder oberhalb der Sollfrequenz $F_{A,soll}$ liegen. Bei manchen Systemen ist ein solches Konzept der Frequenzeinstellung sogar vorteilhaft umsetzbar, wenn nämlich als frequenzbestimmendes Bauteil ein digitaler Zähler für die erforderliche Anzahl von Schwingungsperioden eines unveränderlichen Referenzoszillators mit vergleichsweise hoher Frequenz eingesetzt wird.

[0056] Wenn man nun eine solche Frequenzvariation mit Werten knapp ober- und unterhalb der Sollfrequenz als ein laufend erzeugtes ΔF_A betrachtet und mit der als Phase messbaren Antwort $\Delta\varphi$ oder $\Delta \tan(\varphi)$ des Systems in Beziehung setzt, kann man auf diese Art laufend $(\Delta F_A / \Delta \tan(\varphi))$ und in der Folge die Dämpfungsfrequenz F_D sowie die aktuelle Güte Q der Resonanz und damit die Resonanzüberhöhung bestimmen.

[0057] Eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung sieht daher vor, dass die Stellgröße für die Regelung der Anregungsfrequenz alternierend geringfügig unterhalb und oberhalb einer Sollfrequenz vorgegeben wird, und eine dadurch bewirkte Änderung der Phase des Messsignals ausgewertet wird.

[0058] Vorzugsweise können Glättungsfilter verwendet werden, da sich die Güte einer Resonanz im Allgemeinen nur wenig und nur langsam ändert. Beispielsweise kann $(\Delta F_A / \Delta\varphi)$ oder F_D mit einem Tiefpass 1. Ordnung geglättet werden, wobei es vorteilhaft ist, die Grenzfrequenz so festzulegen, dass die zugehörige Zeitkonstante des Filters etwa der typischen Dauer der Befüllung der Messkammer mit dem Messgas entspricht, beispielsweise 0,3 Sekunden.

[0059] Eine stabile optische Anregung der akustischen Resonanz ist dann möglich, wenn die Fähigkeit des Messgases zur Lichtabsorption in ausreichend hohem Maß gegeben ist, also wenn das Messgas einen ausreichend großen Anteil der Messkomponente enthält. Unter dieser Voraussetzung werden die oben genannten Verfahrensmerkmale zur Nachführung der Anregungsfrequenz hin zur Sollfrequenz, insbesondere zur Resonanzfrequenz der genutzten Resonanz, und gegebenenfalls zur Bestimmung der aktuellen Resonanzüberhöhung, vorteilhaft angewandt werden können. Wenn aber diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, wenn also z.B. keine lichtabsorbierenden Partikel im Messgas enthalten sind, würde das Verfahren versagen und es bräuchte eine weitere Möglichkeit zur Anregung der akustischen Resonanz.

[0060] Dieser zuletzt genannte Fall tritt zum Beispiel ein, wenn die Resonanzfrequenz der akustischen Resonanz unabhängig von der eigentlichen Messung, gegebenenfalls vor der eigentlichen Messung, und mit zum Beispiel Frischluft in der Messkammer, bestimmt werden soll. Für diesen Fall ist üblicherweise ein Schallgeber, der ein Lautsprecher oder ein als Schallgeber verwendetes Mikrophon sein kann, vorgesehen, der von der Elektronik mit zum Beispiel einem Rauschsignal (für die Auswertung mithilfe der Fourier-Transformation) oder einfacherweise mit einem Signal vorgegebener Frequenz angesteuert wird. In letzterem Fall wird die Frequenz über einen Bereich der erwarteten Resonanzfrequenz durchgestimmt („Frequenzlauf“, „frequency scan“) und als gesuchte Resonanzfrequenz wird jene Frequenz bestimmt, bei der ein Maximum des vom Schallgeber erzeugten Schalls am Ort des Mikrofons und damit im Mikrofonsignal auftritt.

[0061] Während der eigentlichen Messung sollte der Schallgeber natürlich deaktiviert sein, da ja als Messsignal nur das durch die lichtabsorbierende Messkomponente optisch angeregte Schallsignal der akustischen Resonanz verwendet werden kann, und eine Störung dieses Signals durch andere Schallquellen vermieden werden muss.

[0062] Erstaunlicherweise konnte aber festgestellt werden, dass im Fall der optischen Anregung der akustischen Resonanzfrequenz der Messzelle bei einer geringen oder verschwindend kleinen Konzentration der Messkomponente im Messgas die Messung nicht gestört wird, wenn

gleichzeitig durch den Lautsprecher eine andere Frequenz, insbesondere die doppelte Frequenz, akustisch angeregt wird.

[0063] Eine vorteilhafte Ausführungsform der gegenständlichen Erfindung sieht daher vor, dass das Messgas in der Messkammer zumindest zeitweise während der Messung über einen Schallgeber akustisch angeregt wird.

[0064] In bevorzugter Weise kann dabei die akustische Anregung über den Schallgeber erfolgen, wenn ein von der Auswerteeinheit ermittelter Messwert M unter einen Grenzwert G_M fällt.

[0065] Weiters kann die akustische Anregung gemäß einem Lautsprechersignal L mit einer Lautsprechersignalfrequenz F_L erfolgen, wobei die Lautsprechersignalfrequenz F_L sich von der Anregungsfrequenz F_A unterscheidet.

[0066] In vorteilhafter Weise kann dabei die Lautsprechersignalfrequenz F_L im Wesentlichen einer Obertonfrequenz der Anregungsfrequenz F_A und insbesondere der doppelten Anregungsfrequenz F_A entsprechen.

[0067] Vorzugsweise kann der charakteristische Parameter auf Basis eines Regelsignals S_L ermittelt werden, wobei das Regelsignal S_L der im Mikrofonsignal S enthaltene und von der Lautsprechersignalfrequenz F_L angeregte Signalanteil des Mikrofonsignals S ist.

[0068] In vorteilhafter Weise kann die auf die Phase des Lautsprechersignals bezogene Phase des Regelsignals S_L als Istwert für die Regelung der Anregungsfrequenz F_A und der Lautsprechersignalfrequenz F_L verwendet werden.

[0069] Da auch das vom Lautsprecher angeregte Signal anderer Frequenz vom Mikrofon aufgenommen wird und seine Phasenlage analysiert werden kann, ist es somit möglich, die Frequenznachführung bei diesem anderen „Ton“, vorteilhafterweise einem „Oberton“, in gleicher Weise wie beim „Grundton“, d.h. bei der Resonanzfrequenz der genutzten akustischen Resonanz, durchzuführen:

[0070] • Unabhängig von der eigentlichen Messung, und gegebenenfalls davor, wird mit dem Lautsprecher die ausgewählte andere Frequenz („Ton“), insbesondere ein „Oberton“ und besonders vorteilhaft die doppelte Frequenz der zuvor bereits bestimmten Resonanzfrequenz („Grundton“) der akustischen Resonanz akustisch angeregt.

[0071] • Die Phase der bei dieser anderen Frequenz gelegenen Frequenzkomponente des Mikrofonsignals wird als zugehörige Sollphase dieser Frequenzkomponente bestimmt.

[0072] • Während der eigentlichen Messung wird einerseits der Grundton optisch angeregt, als Komponente des Mikrofonsignals analysiert und zur Bestimmung des aktuellen Messergebnisses (Konzentration der Messkomponente im Messgas) ausgewertet.

[0073] • Während der eigentlichen Messung wird andererseits mit dem Lautsprecher Schall der anderen Frequenz akustisch angeregt und als Komponente des Mikrofonsignals in Bezug auf seine Phasenlage analysiert.

[0074] • Die Abweichung dieser Ist-Phase von der zuvor bestimmten Soll-Phase wird zur Frequenznachführung verwendet, und zwar vorteilhafterweise in gleicher Art wie oben für den Grundton beschrieben.

[0075] 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.

[0076] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines photoakustischen Messgeräts 1, das einen geschlossenen Regelkreis zur Frequenznachführung aufweist. In Fig. 1 sind die folgenden Teilsysteme des Messgeräts 1 beispielhaft dargestellt:

[0077] Eine Messkammer 3 mit Einlass 10 und einem Auslass 11 für das Messgas 2.

- [0078]** • Eine Lichtquelle 12 für die periodische Abgabe von elektromagnetischer Strahlung 4 in Form von Lichtpulsen, denen zufolge Schall in der Messkammer 3 durch die Messkomponente im Messgas 2 optisch angeregt wird, insbesondere die dafür vorgesehene akustische Resonanz.
- [0079]** • Gegebenenfalls ein Schallgeber 7, beispielsweise ein Lautsprecher, zur akustischen Anregung von Schall in der Messkammer 3
- [0080]** • Ein Schallaufnehmer 5, beispielsweise ein Mikrofon, zur Detektion des Schalls in der Messkammer 3.
- [0081]** • Eine Auswerteeinheit 6 zur Auswertung des Mikrofonsignals S und zur Ermittlung und Bereitstellung von Ausgangswerten, wobei die Auswerteeinheit 6 beispielsweise zur Ausführung der folgende Funktionalitäten geeignet sein kann:
- zur Ansteuerung der Lichtquelle 12 und (gegebenenfalls) des Schallgebers 7
 - zur Ermittlung eines Messwerts M, der beispielsweise für die Konzentration der Messkomponente charakteristisch ist
 - zur Ermittlung von Reglerparametern für die Frequenznachführung
 - zur Berechnung weiterer Messergebnisse
 - zur allgemeinen Gerätesteuerung und -überwachung
- [0082]** • Ein Regler 8 zur Regelung der Anregungsfrequenz F_A eines Signalgebers 13 für die Lichtquelle 12.
- [0083]** • Einen Regler 9 zur Regelung der Lautsprechersignalfrequenz F_L eines Signalgebers 14 für den Schallgeber 7.
- [0084]** Dem Messeffekt liegt die Absorption des eingestrahlt Lichts, beispielsweise Laserlicht, durch die im Messgas 2 befindliche Messkomponente zugrunde. Das Licht wird gemäß einem Anregungssignal A (dieses kann beispielsweise eine Sinussignalform, eine Rechtecksignalfom oder eine andere geeignete periodische Signalfom aufweisen) mit der Anregungsfrequenz F_A eingebracht. Die periodisch zugeführte Lichtenergie bewirkt eine periodische Erwärmung und Ausdehnung des Messgases 2 in der Messkammer 3, was eine periodische Druckerhöhung und damit die Erzeugung einer Schallwelle zur Folge hat. Diese „optisch angeregte Schallwelle“ durchläuft die Messkammer 3, die so zu akustischen Schwingungen angeregt wird, welche vom Schallaufnehmer 5 als Mikrofonsignal S detektiert werden und deren Schwingungsamplitude ein Maß für die Konzentration der in der Messkammer 3 vorhandenen Komponente des Messgases 2 darstellt.
- [0085]** Um die Verstärkung des Messsignals S_A (d.h. der im Mikrofonsignal S enthaltene und von der Anregungsfrequenz F_A angeregte Signalanteil des Mikrofonsignals S) durch die Resonanzüberhöhung bei einer akustischen Resonanz nützen zu können, muss natürlich die Anregung bei oder in der Nähe der zugehörigen Resonanzfrequenz F_{RES} (beim sogenannten „Grundton“) erfolgen. Die Resonanzfrequenz wird unabhängig von der eigentlichen Messung, gegebenenfalls davor, folgendermaßen bestimmt:
- [0086]** a. Das Schallsignal wird bei mehreren Frequenzen, bevorzugt durch ein Durchstimmen der Frequenz („Frequenz-Scan“) im Bereich der erwarteten Resonanzfrequenz, auf optische Art angeregt, und aus den zur Anregungsfrequenz F_A gehörigen Komponenten des Mikrofonsignals S wird die Frequenz bestimmt, bei der die gesuchte hohe oder maximale Amplitude bzw. Messempfindlichkeit auftritt. Außerdem wird bei dieser Frequenz die Phase 9 des Messsignals S_A bestimmt, um in der Folge, bei den eigentlichen Messungen, auf einfache Art die signifikante Komponente des Mikrofonsignals S bestimmen zu können und weiters den Wert dieser Phase φ als Sollwert für die Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz F_A nützen zu können.

[0087] b. Diese Art der Bestimmung der Resonanzfrequenz F_{RES} und der zum Grundton gehörigen Sollphase gelingt natürlich nur dann, wenn aufgrund einer ausreichend großen Menge der Messkomponente in der resonanten Messkammer 3 ausreichend viel Lichtenergie im Messgas 2 absorbiert wird. Um die Resonanzfrequenz F_{RES} auch bei einer verschwindend geringen Konzentration der Messkomponente bestimmen zu können, wird zur „akustischen Anregung“ ein elektroakustischer Wandler verwendet, der Schallwellen nach Art eines Lautsprechers anregen kann. Zur Bestimmung der Resonanzfrequenz („Grundton“) werden so wie bei der optischen Anregung auch mit dem Lautsprecher mehrere Frequenzen angeregt und aus den zur Anregungsfrequenz F_A gehörigen Komponenten des Mikrofonsignals wird die Frequenz F_{RES} bestimmt, bei der die gesuchte hohe oder maximale Amplitude auftritt.

[0088] Mit dem Schallgeber 7 kann aber unabhängig von einer etwaigen optischen Anregung bei der Resonanzfrequenz F_{RES} der zu nutzenden akustischen Resonanz („Grundton“) auch ein weiteres Schallsignal, das hierin als Lautsprechersignal L bezeichnet wird, mit einer Lautsprechersignalfrequenz F_L angeregt werden. Ein auf diese Art elektro-akustisch angeregter Schall sollte deutlich im Mikrofonsignal identifiziert werden können und sollte keine Störung der für die eigentliche Messung benötigten optisch angeregten Schallsignale darstellen. Die Erfinder haben herausgefunden, dass dieses Kriterium überraschender Weise erfüllt werden kann - zumindest bei geringen Konzentrationen der Messkomponente -, wenn die akustische Schallanregung mit dem Schallgeber 7 bei einer solchen bestimmten Lautsprechersignalfrequenz F_L erfolgt, die von der Frequenz F_A der photoakustischen Anregung ausreichendweit entfernt ist, sodass die zu den beiden Frequenzen gehörigen Signalanteile des Mikrofonsignals voneinander gut separiert werden können, und wenn das akustisch angeregte Lautsprechersignal L eine wesentlich vom Spektrum der akustischen Resonanzen der Messkammer 3 bestimmte stabile Phasenlage aufweist.

[0089] Besonders bewährt hat es sich, wenn zur optischen Anregung bei der Resonanzfrequenz F_{RES} („Grundton“) der genutzten akustischen Resonanz die akustische Anregung über den Schallgeber 7 bei der doppelten Frequenz („Oberton“) erfolgt. Demgemäß wird mit dem Schallgeber 7 nach der Ermittlung der Resonanzfrequenz („Grundton“) vorteilhafterweise auch die doppelte Frequenz („Oberton“) akustisch angeregt und die zugehörige Phase als Sollwert für die Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz F_A bestimmt.

[0090] Bei der eigentlichen Messung wird nun die Anregungsfrequenz F_A der optischen Anregung durch die Nachlaufregelung laufend so eingestellt, dass die gemessene Ist-Phase φ des Messsignals S mit der zuvor bestimmten Soll-Phase φ_{soll} verglichen und die Abweichung minimiert wird. Dabei ist es für den Regelalgorithmus vorteilhaft, wenn die Signale zur Vermeidung von Phasensprüngen um $\pm 90^\circ$ bzw. $\pm 180^\circ$ so mithilfe einer Drehmatrixoperation transformiert werden, dass die transformierte Soll-Phase den Wert Null und der Wert der transformierten Ist-Phase den gegen Null strebenden Abstand vom Sollwert angibt.

[0091] Dieses Verfahren zur Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz F_A kann somit erfolgreich und in gleicher Art angewendet werden:

[0092] • bei einer hohen Konzentration der Messkomponente in Bezug auf die Soll- und Ist-Phase des Grundton-Signals, oder

[0093] • bei einer niedrigen Konzentration der Messkomponente in Bezug auf die Soll- und Ist-Phase des Oberton-Signals.

[0094] Die Frequenz F_A des Anregungssignals A wird häufig von der Frequenz eines hochfrequenten Referenzsignals durch ganzzahliges Unterteilen abgeleitet, zum Beispiel durch Zählen der erforderlichen Anzahl von Schwingungsperioden des Taktgebers, der das hochfrequente Referenzsignal abgibt. In diesem Fall wird die gewünschte Anregungsfrequenz nur ungenau (d.h. auf einen durch den Systemtakt des Taktgebers und einen ganzzahligen Teiler vorgegebenen Wert) eingestellt, was aber auch vorteilhaft genutzt werden kann, in dem etwa alternierend die jeweils höhere oder niedrigere Periodenanzahl programmiert wird, woraus eine ständig

geringfügig schwankende Anregungsfrequenz resultiert.

[0095] In der Folge wird auch die aus dem Mikrofonsignal S bestimmte zugehörige Phase φ des Messsignals S_A schwanken. Zu einer aktuellen Differenz der Anregungsfrequenz ΔF kann also eine zugehörige Differenz der Phasen $\Delta\varphi$ und daraus ein Differenzen-Quotient $\Delta F/\Delta\varphi$ bzw. $\Delta F/\Delta\tan(\varphi)$ bestimmt werden. Dieser Wert charakterisiert die Steilheit der von der Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz F_A genutzten Kennlinie und kann als solche vorteilhaft genutzt werden. Darüber hinaus steht dieser Wert im Fall der Grundton-Resonanz auch für die Dämpfung und damit für den Gütefaktor der Resonanz und die aktuell wirksame Resonanzüberhöhung.

[0096] Vorteilhafterweise kann für die Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz anstelle des aktuellen Werts von $\Delta F/\Delta\varphi$ auch ein im Wesentlichen konstant gehaltener Wert einer typischen Steilheit verwendet werden. Auf diese Art wird der Frequenzbereich, in dem die Regelung funktioniert, nicht auf einen monoton steigenden bzw. fallenden Bereich der Regelungs-Kennlinie (Phase in Abhängigkeit von der Frequenz, bzw. umgekehrt) begrenzt, sondern dieser Bereich wird vergrößert bis nahe zum nächsten Schnittpunkt der Kennlinie mit dem Sollwert der Phase.

[0097] Indem alle Komponenten des Messgeräts 1 mit dem selben Referenzsignal vom selben Taktgeber betrieben werden, kann somit auf eine gemeinsame Basis bei der Ermittlung der Phasen zurückgegriffen werden.

[0098] Für die Nachlaufregelung der Anregungsfrequenz F_A können verschiedene Verfahren aus den zahlreichen in der Regelungstechnik bekannten in Frage kommenden Verfahren gewählt werden. Auch wenn die hierin, im Zusammenhang mit der gegenständlichen Erfindung beschriebenen Systeme kein eigentliches Phase-Locked-Loop-System darstellen, können solche in der zugehörigen Fachliteratur beschriebene Systeme vom Fachmann analog angewendet und im Zusammenhang mit der gegenständlichen Erfindung vorteilhaft verwendet werden.

[0099] Ein für die Regelung vorteilhaft geeigneter Regler ist ein einfacher Proportionalregler, mit dem keine zusätzlichen Phasenverschiebungen und Gruppenlaufzeiten eingebracht werden.

BEZUGSZEICHENLISTE :

photoakustisches Messgerät (1)
Messgas (2)
Messkammer (3)
elektromagnetischer Strahlung (4)
Schallaufnehmer (5)
Auswerteeinheit (6)
Schallgeber (7)
Regler (8, 9)
Einlass (10)
Auslass (11)
Lichtquelle (12)
Signalgeber (13) für die Lichtquelle
Signalgeber (14) für den Schallgeber

Variablen:

Anregungssignal (A)
Anregungsfrequenz (F_A)
akustische Resonanzfrequenz (F_{RES})
Mikrofonsignal (S)
Messsignal (S_A) (d.h. angeregter Signalanteil)
Phase (φ) des angeregten Signalanteils S_A
Lautsprechersignal (L)
Lautsprechersignalfrequenz (F_L) (ca. $2 \times F_A$)
Messwert (M)
Grenzwert (G_M)

Patentansprüche

1. Verfahren zur Analyse von in einem Messgas enthaltenen Messkomponenten mittels eines photoakustischen Messgeräts (1), wobei das Messgas (2) in einer Messkammer (3) mit elektromagnetischer Strahlung (4) bestrahlt wird, wobei die elektromagnetische Strahlung (4) zur Erzeugung eines photoakustischen Effekts gemäß einem Anregungssignal (A) mit einer Anregungsfrequenz (F_A) pulsiert, und wobei der photoakustisch erzeugte Schall mit einem Schallaufnehmer (5) gemessen und von einer Auswerteeinheit (6) ausgewertet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein charakteristischer Parameter der akustischen Eigenschaften der das Messgas (2) enthaltenden Messkammer (3) während der Messung ermittelt und die Anregungsfrequenz (F_A) während der Messung in Abhängigkeit von einer Veränderung des charakteristischen Parameters angepasst wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf Basis des ermittelten charakteristischen Parameters ein Wert für eine aktuelle akustische Resonanzfrequenz (F_{RES}) der Messkammer (3) ermittelt und die Anregungsfrequenz (F_A) auf diesen Wert eingestellt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anpassung der Anregungsfrequenz (F_A) mithilfe zumindest eines Reglers (8) erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor der Messung und/oder während der Messung zumindest ein von den akustischen Eigenschaften des aktuellen Messgases weitgehend unabhängiger Referenzwert des akustischen Verhaltens des Messsystems als Sollwert für zumindest einen charakteristischen Parameter ermittelt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der charakteristische Parameter die auf die Phase des Anregungssignals (A) bezogene Phase (φ) eines Messsignals (S_A) ist, wobei das Messsignal (S_A) ein in einem vom Schallaufnehmer (5) detektierten Mikrofonsignal (S) enthaltener und mit der Anregungsfrequenz (F_A) angeregter Signalanteil des Mikrofonsignals (S) ist.
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass Real- und Imaginärteil des Messsignals (S_A) mithilfe einer Drehmatrixoperation so um dem Winkel eines Sollwerts (φ_{soll}) der Phase gedreht bzw. transformiert werden, dass der gedrehte bzw. transformierte Sollwert der Phase Null ist.
7. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus einem vom Schallaufnehmer (5) detektierten Mikrofonsignal (S) die Resonanzfrequenz (F_{RES}) einer ausgeprägten akustischen Resonanz als Sollfrequenz ($F_{A,soll}$) ermittelt und dem Regler (8) als Führungsgröße für die Anregungsfrequenz (F_A) vorgegeben wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus einer Änderung eines Messsignals (S_A), welches Messsignal (S_A) ein in einem vom Schallaufnehmer (5) detektierten Mikrofonsignal (S) enthaltener und mit der Anregungsfrequenz (F_A) angeregter Signalanteil des Mikrofonsignals (S) ist, eine aktuelle Dämpfungsfrequenz (F_D) und/oder eine Güte (Q) der Resonanz ermittelt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Stellgröße für die Regelung der Anregungsfrequenz (F_A) alternierend geringfügig unterhalb und oberhalb einer Sollfrequenz ($F_{A,soll}$) vorgegeben wird, und eine dadurch bewirkte Änderung ($\Delta\varphi$) der Phase (φ) des Messsignals (S_A), welches Messsignal (S_A) ein in einem vom Schallaufnehmer (5) detektierten Mikrofonsignal (S) enthaltener und mit der Anregungsfrequenz (F_A) angeregter Signalanteil des Mikrofonsignals (S) ist, ausgewertet wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Messgas (2) in der Messkammer (3) zumindest zeitweise während der Messung über einen Schallgeber (7) akustisch angeregt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die akustische Anregung über den Schallgeber (7) erfolgt, wenn ein von der Auswerteeinheit (6) ermittelter Messwert (M) unter einen Grenzwert (G_M) fällt.
12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die akustische Anregung gemäß einem Lautsprechersignal (L) mit einer Lautsprechersignalfrequenz (F_L) erfolgt, wobei die Lautsprechersignalfrequenz (F_L) sich von der Anregungsfrequenz (F_A) unterscheidet.
13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lautsprechersignalfrequenz (F_L) im Wesentlichen einer Obertonfrequenz der Anregungsfrequenz (F_A) und insbesondere der doppelten Anregungsfrequenz (F_A) entspricht.
14. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der charakteristische Parameter auf Basis eines Regelsignals (S_L) ermittelt wird, wobei das Regelsignal (S_L) der im vom Schallaufnehmer (5) detektierten Mikrofonsignal (S) enthaltene und von der Lautsprechersignalfrequenz (F_L) angeregte Signalanteil des Mikrofonsignals (S) ist.
15. Verfahren nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die auf die Phase des Lautsprechersignals bezogene Phase des Regelsignals (S_L) als Istwert für die Regelung der Anregungsfrequenz (F_A) und der Lautsprechersignalfrequenz (F_L) verwendet wird.

Hierzu 1 Blatt Zeichnungen

1/1

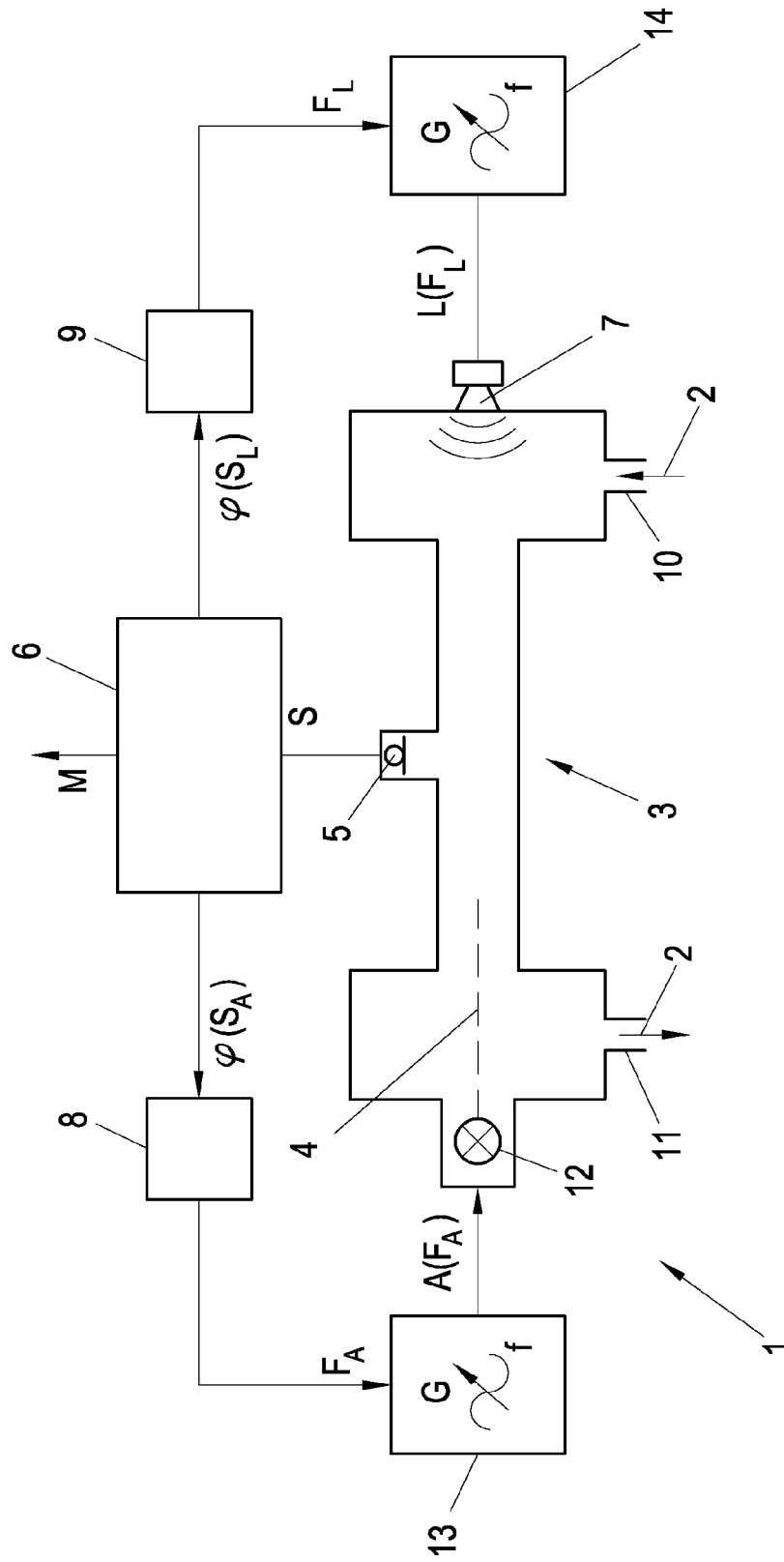


Fig. 1