

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50463/2023
(22) Anmeldetag: 13.06.2023
(43) Veröffentlicht am: 15.09.2024

(51) Int. Cl.: **G01N 21/3504** (2014.01)
G01M 15/10 (2006.01)
G06T 7/62 (2017.01)
G01N 21/17 (2006.01)
G02B 27/54 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
WO 2022266692 A1
DE 102018112479 B3
CN 103017683 A
WO 2015123507 A1
DE 102015217940 A1
US 2018096482 A1

(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)
(72) Erfinder:
Kupper Martin Dr.
8010 Graz (AT)
Imtiaz Hafiz Hashim MSc, BSEE
8020 Graz (AT)
Schaffer Paul Dipl.-Ing. BSc
8010 Graz (AT)
(74) Vertreter:
Patentanwälte Pinter & Weiss OG
1040 Wien (AT)

(54) **Vorrichtung und Verfahren zur Konzentrationsbestimmung eines Stoffes in einem Messvolumen**

(57) Um bei einer Remote Emission Sensing Messung genauere Konzentrationsmessungen eines gasförmigen oder festen Stoffes in einem Messvolumen (V) zu ermöglichen, ist vorgesehen, dass mit der Digitalkamera (5) zeitlich unmittelbar hintereinander zumindest zwei digitale Aufnahmen des Messvolumens (V) gemacht werden, mit der Bildauswerteeinheit (11) die zumindest zwei digitalen Aufnahmen des Messvolumens (V) voneinander abgezogen werden, um ein Differenzbild (20) mit einer Vielzahl von Bildpunkten (b) zu erhalten, wobei in jedem Bildpunkt (b) des Differenzbildes (20) eine Differenz-Lichtintensität vorhanden ist, die Bildauswerteeinheit (11) im Differenzbild (20) zumindest einen Bereich (21) mit Bildpunkten (b) mit Differenz-Lichtintensität bestimmt, in dem die Dichte der Bildpunkte (b) mit Differenz-Lichtintensität größer einer vorgegebenen Minimdichte ist, und die Bildauswerteeinheit (11) die Gesamtdurchtrittsstrecke (x') des Lichtstrahls (6) in diesem zumindest einen Bereich (21) des

Differenzbildes (20) entlang des Strahlenganges des Lichtstrahls (6) bestimmt und mittels der bekannten optischen Eigenschaften der Digitalkamera (5) auf die Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) im Messvolumen (V) umrechnet und die Auswerteeinheit (10) die Konzentration (c) des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) mit der derart bestimmten Gesamtdurchtrittsstrecke (x) ermittelt.

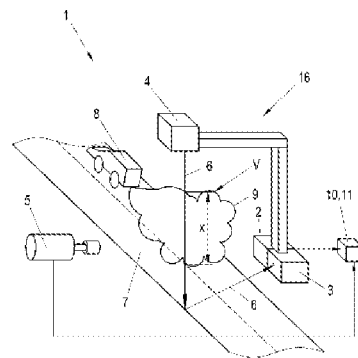


Fig. 1

Zusammenfassung

Um bei einer Remote Emission Sensing Messung genauere Konzentrationsmessungen eines gasförmigen oder festen Stoffes in einem Messvolumen zu ermöglichen, ist vorgesehen, dass mit der Digitalkamera (5) zeitlich unmittelbar hintereinander zumindest zwei digitale Aufnahmen des Messvolumens (V) gemacht werden, mit der Bildauswerteeinheit (11) die zumindest zwei digitalen Aufnahmen des Messvolumens (V) voneinander abgezogen werden, um ein Differenzbild (20) mit einer Vielzahl von Bildpunkten (b) zu erhalten, wobei in jedem Bildpunkt (b) des Differenzbildes (20) eine Differenz-Lichtintensität vorhanden ist, die Bildauswerteeinheit (11) im Differenzbild (20) zumindest einen Bereich (21) mit Bildpunkten (b) mit Differenz-Lichtintensität bestimmt, in dem die Dichte der Bildpunkte (b) mit Differenz-Lichtintensität größer einer vorgegebenen Minimaldichte ist, und die Bildauswerteeinheit (11) die Gesamtdurchtrittsstrecke (x') des Lichtstrahls (6) in diesem zumindest einen Bereich (21) des Differenzbildes (20) entlang des Strahlenganges des Lichtstrahls (6) bestimmt und mittels der bekannten optischen Eigenschaften der Digitalkamera (5) auf die Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) im Messvolumen (V) umrechnet und die Auswerteeinheit (10) die Konzentration (c) des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) mit der derart bestimmten Gesamtdurchtrittsstrecke (x) ermittelt.

Fig. 1

Vorrichtung und Verfahren zur Konzentrationsbestimmung eines Stoffes in einem Messvolumen

Die gegenständliche Erfindung betrifft eine stationäre Messanordnung zur Konzentrationsbestimmung zumindest eines gasförmigen oder festen Stoffes in zumindest einem stationären Messvolumen der Messanordnung, wobei in der Messanordnung zumindest eine Messeinheit vorgesehen ist, einen Lichtstrahl mit vorgegebener Lichtintensität durch das Messvolumen abzustrahlen, und in der Messanordnung zumindest ein Detektor vorgesehen ist, um den Lichtstrahl nach dem zumindest einmaligen Durchtritt durch das Messvolumen zu erfassen, wobei der zumindest eine Detektor ausgebildet ist, eine Abnahme der Lichtintensität des Lichtstrahls aufgrund des zumindest einen gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen zu ermitteln, wobei in der Messanordnung eine Digitalkamera vorgesehen ist und eingerichtet ist, eine digitale Aufnahme des Messvolumens zu machen, und in der Messanordnung eine Bildauswerteeinheit vorgesehen ist und eingerichtet ist, die digitale Aufnahme auszuwerten, um bei teilweisem oder vollständigem Vorhandensein einer Abgaswolke im Messvolumen eine Gesamtdurchtrittsstrecke des Lichtstrahls durch die Abgaswolke im Messvolumen zu bestimmen, und wobei in der Messanordnung eine Auswerteeinheit vorgesehen ist und eingerichtet ist, aus der ermittelten Abnahme der Lichtintensität und der Gesamtdurchtrittsstrecke des Lichtstrahls durch die Abgaswolke eine Konzentration des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen zu ermitteln. Die Erfindung betrifft auch ein entsprechendes Verfahren zur Konzentrationsbestimmung.

Abgase, insbesondere von Verbrennungsvorgängen, wie beispielsweise Abgase von Verbrennungsmotoren oder von Industrieprozessen, enthalten eine Reihe von gasförmigen oder festen Stoffen, oder auch beides, die über Abgase als Abgasemissionen in die Umgebung abgegeben werden. Solche Abgasemissionen sind ein vieldiskutiertes Thema und unterliegen strengen gesetzlichen oder normativen Vorgaben. Die zulässigen Werte von emittierten Stoffen eines bestimmten Emittenten, beispielsweise eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor oder eines Industrieprozesses, sind oftmals über nationale und supranationale Normen bestimmt. Die Messung der Abgasemissionen, insbesondere bei Emittenten im praktischen Einsatz, stellt aber eine hohe Herausforderung dar. Das trifft ganz besonders dann zu, wenn der Emittent während der Abgabe der Abgasemissionen bewegt wird, wie im Beispiel von Fahrzeugen.

Zur Abgasmessung an einem Fahrzeug im Echtbetrieb, beispielsweise im normalen Straßenverkehr, werden heute mobile Emissionsmessgeräte (Portable Emission Measurement System (PEMS)) verwendet. Hierfür muss ein Fahrzeug mit einem mobilen Emissionsmessgerät ausgerüstet werden. Eine solche Abgasmessung ist damit auf eine geringe Anzahl an

ausgerüsteten Testfahrzeugen beschränkt und kann daher kein repräsentatives Abbild von einer Vielzahl von Fahrzeugen im Echtbetrieb, beispielsweise im Straßenverkehr, geben. Abgasmessungen im Rahmen der regelmäßigen Überprüfung des Fahrzeugs in einer Werkstatt sind ebenso wenig repräsentativ, weil solche Überprüfungen nur in großen Zeitabständen durchgeführt werden und die Überprüfung nicht im Echtbetrieb des Fahrzeugs erfolgt.

Daher wird versucht, Abgasmessungen von Fahrzeugen im Echtbetrieb im normalen Verkehr zu ermöglichen. Dieses sogenannte „Remote Emission Sensing“ erfolgt an einer stationären Messstelle, an der sich Fahrzeuge vorbeibewegen. Die Messstelle kann beispielsweise an vorhandener stationärer Infrastruktur, wie Mautstellen, Straßenlaternen, Brücken, oder auch Gebäudefassaden in der Stadt und ähnlichem angebracht werden. Die Messstelle kann aber auch quasistationär sein, indem die Messhardware beispielsweise an eine bestimmte Stelle bewegt wird und dort aufgebaut wird und dann stationär ist. Solche Remote Emission Sensing Abgasmessungen im öffentlichen Raum erlauben die Abgasmessungen an einer Vielzahl von Fahrzeugen und auch an verschiedenen Fahrzeugen. Die Genauigkeit und Aussagekraft einer solchen Remote Emission Sensing Abgasmessung ist aber eingeschränkt.

Bei Remote Emission Sensing Anwendungen wird oftmals eine Lichtquelle, wie ein Laser, verwendet, welche eine charakteristische Wellenlänge oder Wellenlängenbereich(e) emittiert, um einen gasförmigen Stoff im Abgas, wie Kohlenmonoxid oder Stickoxide, nachzuweisen. Ein Lichtdetektor ermöglicht beispielsweise eine Messung der durch Absorption hervorgerufenen Abschwächung des Lichtstrahls, der durch die Abgaswolke gesendet wird, und die Abschwächung des Lichtstrahls ist abhängig von der Abgasemission. Es kann aber auch vorgesehen sein, feste Partikel im Abgas, wie Rußpartikel, als Stoff zu messen. Das kann dann beispielsweise über Messung der Lichtstreuung oder über die Messung der durch Absorption hervorgerufenen Abschwächung des Lichtstrahls realisiert werden.

Die zuverlässige Messung solcher gasförmigen oder festen Stoffe in Abgaswolken kann jedoch zu unterschiedlichen Schwierigkeiten führen. Einerseits sind die Emissionen von Stoffen von unterschiedlichen Verbrennungsmotoren oder auch anderen Energiesystemen, wie Brennstoffzellen, durchwegs unterschiedlich und müssen mit dem gleichen System messbar sein. Auch Unterschiede in der Betriebstemperatur oder Umgebungsbedingungen eines Verbrennungsmotors können Unterschiede in den zu messenden Stoffen nach sich ziehen. Weiters schwankt der zu messende Konzentrationsbereich sehr stark und ist von der zu messenden Fahrzeugklasse (z.B. LKW vs. Motorrad) abhängig. Speziell geringe Konzentrationen bereiten bei der Auswertung Probleme. Bei Verwendung eines Lichtstrahls zur Messung stellt auch die Position des Auspuffrohres in Relation zum Lichtstrahl ein Problem dar, weil die Auspuffrohre unterschiedlicher Fahrzeuge an unterschiedlichen Stellen angeordnet sind. Für eine zuverlässige Bestimmung der Konzentration muss weiters die Länge der Strecke

bekannt sein, in der die Absorption geschieht. Konkret müssen dafür im Fall von Remote Emission Sensing die Abmaße der Abgaswolke in Richtung des Lichtstrahls zum Zeitpunkt der Messung bekannt sein.

5 Damit können mit Remote Emission Sensing zwar Absorptionswerte bestimmt werden, diese sind aber wegen der oben genannten Unterschiedlichkeit schwer bis gar nicht vergleichbar. Insbesondere ist damit keine zuverlässige Bestimmung einer Konzentration eines gasförmigen oder festen Stoffes in einer Abgaswolke möglich.

10 Die gewünschte Konzentrationsmessung ist aber nicht auf bewegte Emittenten beschränkt, sondern kann natürlich auch an stationären Emittenten angewendet werden. Auch bei einem stationären Emittenten, beispielsweise ein Industrieschornstein, über den Abgas an die Umgebung abgegeben wird, bewegt sich eine Abgaswolke durch eine stationäre Messstelle. Damit treten auch bei solchen Anwendungen ähnliche Probleme auf.

15 CN 103712929 A1 beschreibt ein System zur Lokalisierung und Messung einer Abgaswolke mittels optischer Kamera, Infrarotkamera und spektroskopischer Einheit. Dabei misst die optische Kamera die Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Infrarotkamera lokalisiert die Position der Abgaswolke und die spektroskopische Messeinheit wird ausgerichtet, um die Abgaswolke zu messen. Die Offenbarung verbessert zwar das Lokalisieren der Abgaswolke, ermöglicht aber nicht, einen Konzentrationswert eines Abgasbestandteils zu bestimmen, weil die Ausdehnung der Abgaswolke unbekannt ist.

20 EP 3 789 755 offenbart eine Messmethode für Abgaswolken mittels multispektraler Analyse mit einer Mehrzahl an Infrarotkameras. Die IR-Kameras sind über oder neben der Straße angeordnet und könne mittels geeigneter Filter beispielsweise Kohlenmonoxid und/oder Kohlendioxid messen. Die Anordnung hat den Nachteil, dass keine spektroskopische Auswertung genutzt wird und daher die Möglichkeiten der Messungen von Abgaskomponenten limitiert ist. Weiters hat es den Nachteil, dass derartige Methoden sehr geringe Sensitivitäten be-
25 sitzen und weiters auch nicht in der Lage sind, absolute Konzentrationen direkt zu messen.

Aus der WO 2012/266692 A1 ist eine Remote Emission Sensing Messmethode für Abgaswolken bekannt, bei der eine Abgaswolke in einem Messvolumen von einer optischen Bildeinheit (Kamera) aufgenommen wird und aus der aufgenommenen Abbildung eine Durchtrittsstrecke des Lichtstrahls durch die Abgaswolke bestimmt wird. Aus der festgestellten Ab-
30 nahme der Lichtintensität aufgrund der Absorption und der Durchtrittsstrecke kann dann, beispielsweise mit Hilfe des Lambert-Beer'schen Gesetz, die Konzentration eines bestimmten Stoffes in der Abgaswolke bestimmt werden. Die Erfassung der Ausdehnung einer Abgaswolke mittels einer Kamera ist jedoch schwierig, weil die Grenzen der Abgaswolke nur

schwer zu bestimmten sind. Hierzu werden oftmals sogenannten Optical Gas Imaging (OGI) Kameras verwendet, also im Wesentlichen hochsensible Infrarotkameras, die jedoch teuer sind. Die Ausdehnung einer Abgaswolke mit solchen OGI Kameras lässt sich damit auch nur mit geringer Genauigkeit ermitteln. Diese damit verbundene Unsicherheit in der Bestimmung der Ausdehnung der Abgaswolke beeinflusst aber auch die Konzentrationsmessung und be-
 5 einträchtigt damit auch die Genauigkeit der Konzentrationsmessung.

Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, bei einer Remote Emission Sensing Messung genauere Konzentrationsmessungen eines gasförmigen oder festen Stoffes in einem Messvolumen zu ermöglichen.

10 Diese Aufgabe wird durch eine eingangs genannte Vorrichtung erfindungsgemäß durch die Merkmale der Ansprüche 1 und 6 gelöst. Die Erfindung nutzt damit die Schlierenfotografie zur Bestimmung der Ausdehnung einer Abgaswolke in einem Messvolumen entlang des Strahlenganges eines Lichtstrahls. Die Schlierenfotografie ermöglicht eine genauere Bestimmung der Ausdehnung als mit bisherigen Methoden, weil mit der Schlierenfotografie die
 15 Grenzen einer Abgaswolke sehr gut bestimmbar sind. Mit der damit möglichen genaueren Bestimmung der Gesamtdurchtrittsstrecke des Lichtstrahls durch die Abgaswolke, kann auch die Konzentrationsmessung genauer gemacht werden.

In einer bevorzugten Anordnung ist die Digitalkamera auf einen vorgegebenen, vorzugsweise konstanten, Hintergrund gerichtet und das Messvolumen zwischen der Digitalkamera
 20 und dem Hintergrund vorgesehen. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Digitalkamera so ausgerichtet wird, dass die optische Achse der Digitalkamera normal auf den Lichtstrahl und normal auf die Bewegungsrichtung der Abgaswolke ist. Damit kann die Durchtrittsstrecke besonders genau ermittelt werden.

Die Bildauswertung kann sehr einfach erfolgen, wenn die Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt der beiden Aufnahmen voneinander subtrahiert werden, um das Differenzbild zu ermit-
 25 teln.

Um unerwünschte Effekte im Differenzbild, wie Störungen, Rauschen usw., zu vermeiden, werden Differenz-Lichtintensitäten kleiner einem vorgegebenen Schwellwert aus dem Differenzbild eliminiert. Damit verblieben im Differenzbild nur Differenz-Lichtintensitäten, die aus
 30 einer Änderung, beispielsweise aufgrund einer Abgaswolke, in den beiden Aufnahmen hervorgehen.

Die Bildauswertung kann ferner vereinfacht werden, wenn die Differenz-Lichtintensitäten der Bildpunkte im Differenzbild auf einen bestimmten Wert der Lichtintensität normiert werden.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 6 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

Fig.1 eine erfindungsgemäße Messanordnung,
 Fig.2 das Grundprinzip der Schlierenfotografie,
 Fig.3a eine Aufnahme mit der Digitalkamera,
 Fig.3b ein aus Aufnahmen mit der Digitalkamera abgeleitetes Differenzbild,
 Fig.4 und 5 die Bestimmung einer Gesamtdurchtrittsstrecke im Differenzbild und
 Fig.6 eine weitere erfindungsgemäße Messanordnung.

Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Messanordnung 1 an einer stationären Messstelle 16 am Beispiel einer Anwendung im öffentlichen Verkehr. Die Messanordnung 1 ist an einer Fahrbahn 7 angeordnet, entlang der ein Fahrzeug 8 bewegt wird. „Fahrbahn“ ist hierbei breit in Abhängigkeit des Fahrzeugs 8 zu verstehen. Im Falle eines Luftfahrzeuges kann die Fahrbahn beispielsweise eine Start- oder Landebahn oder das Vorfeld des Flughafens sein. Im Falle eines Wasserfahrzeuges kann die Fahrbahn ein Seeweg, ein Hafen oder eine Schleuse sein.

Ein Fahrzeug 8 gibt im Betrieb von einer Emissionsquelle, wie einem Verbrennungsmotor, einer Brennstoffzelle usw., eine Abgaswolke 9 mit Abgas ab, die in Fig.1 stark übertrieben dargestellt ist. Das Ziel ist es, mit der Messanordnung 1 die Konzentration eines festen oder gasförmigen Stoffes im Abgas in der Abgaswolke 9 zu bestimmen.

Das Fahrzeug 8 in Fig.1 ist beispielsweise ein Personenkraftwagen (PKW), Lastkraftwagen (LKW), oder ein einspuriges Fahrzeug wie einem Motorrad, Motorfahrrad und ähnliches.

Wenn sich das Fahrzeug 8 bewegt, wandert die Abgaswolke 9 natürlich mit dem Fahrzeug 8 mit und verflüchtigt sich hinter dem Fahrzeug 8. Es ist daher eine Messung sehr knapp hinter dem Fahrzeug 8 angestrebt.

Im Abgas in einer Abgaswolke 9 können verschiedenste gasförmige und feste (z.B. Partikel) Stoffe enthalten sein. Die Stoffe in einer Abgaswolke 9 können gasförmige Stoffe, wie Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), gasförmige polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und ähnliches sein. Es ist aber auch denkbar, dass im Abgas feste Stoffe, wie Rußpartikel, enthalten sind. Die Stoffe und deren Konzentrationen in der Abgaswolke 9 eines Fahrzeugs sind natürlich abhängig vom Typ des Antriebs oder des Kraftstoffes, vom Verbrennungsmotor, vom Betriebszustand des Verbrennungsmotors, vom Status eines Katalysators oder Abgasnachbehandlungssystems (sofern vorhanden) und weiteren bekannten Einflussfaktoren. Auch das Abgas von Brennstoffzellen

kann bekanntermaßen Schadstoffe beinhalten, beispielsweise CO oder CO₂, welche ebenfalls über die Messanordnung 1 gemessen werden können.

Die Erfindung ist aber nicht auf Anwendungen mit einer bewegtem Emissionsquelle limitiert, wie bei einem Fahrzeug 8, sondern umfasst auch Einsatzmöglichkeiten mit einer stationären Emissionsquelle, die Abgas abgibt. Dabei bewegt sich die Abgaswolke 9 relativ zu einer Messanordnung 1. Ein Beispiel ist eine Abgaswolke aus einem Industrieprozess, die beispielsweise an einem Schornstein abgegeben wird.

„Stationär“ bedeutet daher, dass die Messanordnung 1 oder die Messstelle 16 der Messanordnung oder allgemein das Messvolumen V der Messanordnung 1 zumindest während einer Messung mit der Messanordnung 1 ortsfest ist und sich eine Abgaswolke 9 von einer Emissionsquelle relativ zum stationären Messvolumen V bewegt.

Erfindungsgemäß soll mit der Messanordnung 1 die Konzentration c eines gasförmigen oder festen Stoffes in der Abgaswolke 9 gemessen werden. Die Messanordnung 1 umfasst hierfür eine Messeinheit 4, die einen Lichtstrahl 6 mit bestimmter Lichtstrahlintensität I_0 und in eine bestimmte Richtung abgibt. Der Lichtstrahl 6 wird von einer Lichtquelle 2 bereitgestellt. Der abgegebene Lichtstrahl 6 durchdringt ein Messvolumen V der Messanordnung 1, in dem sich bei Messung die Abgaswolke 9 befindet. Damit durchdringt der Lichtstrahl 6 bei Vorhandensein einer Abgaswolke 9 im Messvolumen V auch die Abgaswolke 9 entlang einer Durchtrittsstrecke x. Die Durchtrittsstrecke x durch eine Abgaswolke 9 ist natürlich abhängig von der Richtung des abgegebenen Lichtstrahls 6 und den Ausdehnungen der Abgaswolke 9. Der von der Messeinheit 4 oder von der Lichtquelle 2 abgegebene Lichtstrahl 6 kann natürlich auch noch geeignet umgelenkt werden, um den Lichtstrahl 6 in gewünschter Richtung durch das Messvolumen V zu leiten.

Der Lichtstrahl 6 wird nach zumindest einmaligem Durchtritt durch das Messvolumen V in einem Detektor 3 erfasst und das erfasste Licht wird in einer Auswerteeinheit 10 ausgewertet, um die Konzentration des interessierenden Stoffes im Abgas zu bestimmen. Der Lichtstrahl 6 wird nach dem Durchdringen des Messvolumens V bedarfsweise geeignet umgelenkt (wie in Fig.1 angedeutet) oder geleitet, um diesen zum Detektor 3 zu leiten. Dabei kann der Lichtstrahl 6 das Messvolumen V nochmals, auch mehrmals, durchdringen, bevor der Lichtstrahl 6 den Detektor 3 erreicht.

Die Auswerteeinheit 10 ist beispielsweise eine mikroprozessorbasierte Hardware, wie ein Computer, auf der entsprechende Auswertesoftware läuft.

Die Lichtquelle 2 kann beispielsweise monochromatisches Licht mit vorgegebener Lichtstrahlintensität I_0 abgeben, beispielsweise ein Laserlicht, welches eine definierte Wellenlänge

(mit einem engen Wellenlängenbereich) mit vorgegebener Lichtstrahlintensität I_0 aufweist. Insbesondere können Laser verwendet werden, es sind aber auch andere Typen von Lichtquellen vorstellbar. Es können mit der Lichtquelle 2 auch verschiedene Wellenlängenbereiche abgedeckt werden. Es ist auch denkbar, dass die Lichtquelle 2 polychromatisches Licht abgibt, wie Licht im Ultraviolett- (UV) oder auch im Infrarotbereich (IR). Ebenfalls ist ein Monochromator in der oder nach der Lichtquelle 2 denkbar, um gezielt Wellenlängen zu selektieren. Die Lichtquelle 2 erzeugt einen Lichtstrahl 6 mit einer bestimmten Lichtstrahlintensität I_0 und zumindest einer Wellenlänge. Der Lichtstrahl 6 kann beispielsweise über einen Lichtleiter, wie ein Glasfaserkabel, ein Spiegelsystem oder ein anderes geeignetes optisches System, zur Messeinheit 4 geleitet werden, aus der der Lichtstrahl 6 abgegeben wird. Die Lichtquelle 2 kann aber auch in der Messeinheit 4 integriert sein und in der Messeinheit 4 den Lichtstrahl 6 erzeugen.

Zur Durchführung der Konzentrationsmessung strahlt die Messeinheit 4 den Lichtstrahl 6 direkt oder indirekt in Richtung des Messvolumens V ab, sodass der Lichtstrahl 6 das Messvolumen V und eine darin teilweise oder vollständig befindliche Abgaswolke 9 durchdringt. Der Lichtstrahl 6 wird nach dem zumindest einmaligen Durchtritt durch das Messvolumen V vom Detektor 3 erfasst.

Die Anordnung der Messeinheit 4, der Lichtquelle 2, des Detektors 3, Auswerteeinheit 10 ist für die Erfindung aber unerheblich.

Üblicherweise wird die Messeinheit 4 über dem Messvolumen V angeordnet sein (wie in Fig.1 oberhalb der Fahrbahn 7), könnte aber genauso seitlich vom Messvolumen V angeordnet sein (beispielsweise in Fig.1 seitlich von der Fahrbahn 7). Wichtig ist lediglich, dass der von der Messeinheit 4 abgegebene Lichtstrahl 6, das Messvolumen V zumindest einmal durchdringt und das Messvolumen V eine Stelle, an der in Verwendung der Messanordnung 1 eine Abgaswolke 9 auftreten kann, umfasst, sodass sich die Abgaswolke 9 zumindest zeitweise im Messvolumen V befindet.

Der Detektor 3 kann unmittelbar den das Messvolumen V durchdringenden Lichtstrahl 6 erfassen. In diesem Fall wäre der Detektor ungefähr gegenüber der Messeinheit 4 angeordnet. Es ist aber auch denkbar, dass der Lichtstrahl 6 reflektiert oder umgelenkt wird und so zum Detektor 3 geleitet wird. Der Lichtstrahl 6 kann sogar mehrmals reflektiert werden und mehrmals durch das Messvolumen V geleitet werden, bevor der Lichtstrahl 6 den Detektor 3 erreicht. Durch das mehrmalige Durchdringen der Abgaswolke 9 durch den Lichtstrahl 6 kann die Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichtstrahls 6 durch eine Abgaswolke 9 im Messvolumen V erhöht werden und damit die Sensitivität der Konzentrationsmessung erhöht werden, weil das Licht entlang des Strahlenganges des Lichtstrahls 6 mehrmals von den gasförmigen

oder festen Stoffen im Messvolumen V beeinflusst wird und damit deutlichere Messsignale möglich sind. Der zum Detektor 3 laufende Lichtstrahl 6 kann auch über die Messeinheit 4 erfasst und zum Detektor 3 geleitet werden.

Der Detektor 3 misst die Lichtstrahlintensität I des erfassten Lichtstrahls 6, die aufgrund Absorption durch einen gasförmigen oder festen Stoff im Messvolumen V gegenüber der Lichtstrahlintensität I_0 des abgegebenen Lichtstrahls 6 abgeschwächt wird. Damit kann beispielsweise eine Absorption $1-(I/I_0)$, kurz als A bezeichnet, oder Transmission I/I_0 einer bestimmten Wellenlänge, oder auch mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen, berechnet werden. Die Transmission und die Absorption A können ineinander umgerechnet werden und können als äquivalent betrachtet werden.

Für feste Stoffe im Messvolumen V kann ein Lichtintensitätsverlust durch eine Lichtstreuung, wie eine Vorwärts- oder Seitwärtsstreuung, verursacht sein. Der Detektor 3 kann beispielsweise auch eine Lichtstreuung an festen Partikeln im Messvolumen V erfassen und daher eine Lichtintensitätsabnahme aufgrund von Streuung messen. Damit kann auch die Größe von festen Partikeln im Detektor 3 abgeschätzt werden.

Auch ist es möglich, ein Spektrum über verschiedene Wellenlängen aufzunehmen, und eine spektroskopische Auswertung durchzuführen, beispielsweise in Form von multivarianten Analysen oder Fingerprinting eines Stoffes. Damit können auch mehrere verschiedene Stoffe gleichzeitig gemessen werden. Das kann auch über geeignete optische Filter oder über Monochromatoren ermöglicht werden.

Die Messung einer Absorption A eines gasförmigen oder festen Stoffes ist bekanntermaßen frequenzabhängig (wellenlängenabhängig) und sollte daher am oder in der Nähe des für jeden Stoff bekannten Absorptionsmaximum stattfinden, um ein verlässliches Ergebnis zu erhalten. Beispielsweise hat CO_2 charakteristische Vibrationsschwingungen bei einer Wellenzahl (Kehrwert der Wellenlänge) von 1388 cm^{-1} (asymmetrische Streckerschwingung) und bei 667 cm^{-1} (Biegeschwingung). Ein Lichtstrahl 6 mit einer solchen Wellenlänge ist daher vorteilhaft für die Messung.

Laut Lambert-Beer'schen Gesetz ist die Absorption A eines Stoffes abhängig von der Gesamtdurchtrittsstrecke x , der Konzentration c des Stoffes und einem Absorptionskoeffizienten k (als bekannter Stoffparameter). Dieser Zusammenhang kann über die Formel

$$\ln \frac{I}{I_0} = k \cdot x \cdot c$$

angegeben werden, wobei „ln“ den natürlichen Logarithmus bezeichnet. Um eine verlässliche Konzentration c eines Stoffes zu bestimmen, ist daher Kenntnis über die Gesamtdurchtrittsstrecke x und der Absorption A erforderlich. Eine Absorption A (oder gleichwertig eine Abnahme der Lichtintensität) kann über den Detektor 3 ermittelt werden.

- 5 Die Abnahme der Lichtstrahlintensität I im vom Detektor 3 erfassten Lichtstrahl 6 ist abhängig von der Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichtstrahls 6 durch eine Abgaswolke 9 im Messvolumen V . Die Gesamtdurchtrittsstrecke x ist aber abhängig von der Ausdehnung der Abgaswolke 9 im Messvolumen V und dem Strahlengang des Lichtstrahls 6 durch die Abgaswolke 9. Je nach Ausführung der Messanordnung 1, beispielsweise Anordnung der Messeinheit 4, Reflexion(en) des Lichtstrahls 6, Anordnung des Detektors 3, kann der Strahlengang unterschiedlich sein, wobei der Strahlengang aber aufgrund der bekannten oder vorgegebenen Messordnung 1 bekannt ist. Die Ausdehnung der Abgaswolke 9 ist aber vorab nicht bekannt und kann bei jeder Messung sehr stark variieren. Damit ist die Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichtstrahls 6 durch eine Abgaswolke 9 im Messvolumen V aber üblicherweise
15 nicht bekannt.

Für eine genaue Konzentrationsmessung eines Stoffes in einer Abgaswolken 9 ist es daher vorteilhaft, Kenntnis über die Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichtstrahls 6 durch die Abgaswolke 9 zu haben.

- Um die Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichts durch die Abgaswolke 9 zu bestimmen, wird
20 erfindungsgemäß ein bildgebendes Verfahren auf Basis der Schlierenfotografie verwendet. Die Schlierenfotografie ist eine bekannte Technik zur Visualisierung von Änderungen im Brechungsindex in einem aufgenommenen Bildbereich. Am Beispiel einer Abgaswolke 9 in einem Messvolumen V ergeben sich die Änderungen im Brechungsindex insbesondere an den Grenzflächen der Abgaswolke 9 zur Umgebung, womit die Schlierenfotografie sehr gut geeignet ist, um die Ausdehnung einer Abgaswolke 9 zu bestimmen. Die Ausdehnung der Abgaswolke 9 wird durch genau diese Grenzflächen bestimmt.
25

- Es sind verschiedene Techniken zur Schlierenfotografie bekannt, die sich im Wesentlichen im Aufbau und den benötigten optischen Geräten, wie Spiegeln, Linsen, Filtern, Blenden, Lichtquelle usw., unterscheiden. Grundsätzlich kann jede Technik der Schlierenfotografie
30 verwendet werden. Für die gegenständliche Anwendung eignet sich besonders das sogenannte Hintergrund-Schlieren Verfahren, weil hierfür praktisch nur eine Digitalkamera 5 und eine Bildauswerteeinheit 11 zur Auswertung der mit der Digitalkamera 5 aufgenommenen Digitalbildern benötigt wird. Auch in anderen möglichen Verfahren der Schlierenfotografie wird eine Digitalkamera 5 und eine Bildauswerteeinheit 11 verwendet, wobei allerdings zusätzliche
35 optische Geräte erforderlich sein können. Die Bildauswerteeinheit 11 kann auch in der

Auswerteeinheit 10 integriert sein, wie in Fig.1 angedeutet, kann aber auch eine separate Auswerteeinheit sein, beispielsweise eine separate mikroprozessorbasierte Hardware, wie ein Computer, auf der Bildauswertesoftware läuft.

Das Grundprinzip des Hintergrund-Schlieren Verfahren wird anhand der Fig.2 erläutert. Die Digitalkamera 5 ist in Fig.2 vereinfacht durch eine Linsenordnung 13, beispielsweise eines Objektivs der Kamera, und einem Bildsensor 12 dargestellt. Aufgrund des Bildsensors 12 und der Linsenordnung 13 ergibt sich ein bestimmter Bildbereich 14 der Digitalkamera 5, der auf den Bildsensor 12 abgebildet wird. Der Bildbereich 14 bildet den, vorzugsweise konstanten, Hintergrund für das Hintergrund-Schlieren Verfahren. Ein Bildpunkt B im Bildbereich 14 wird durch die Linsenordnung 13 auf einen Bildpunkt b am Bildsensor 12 abgebildet. Befindet sich zwischen der Linsenordnung 13 und dem Bildbereich 14 eine Abgaswolke 9, so wird der Bildpunkte B im Bildbereich 14 aufgrund sich durch die Abgaswolke 9 ergebender strahlungsbrechender Dichteunterschiede auf einen anderen Bildpunkt b' am Bildsensor 12 abgebildet. Die Verschiebung des Bildpunktes b auf den Bildpunkt b' am Bildsensor 12 ist somit eine Folge der Abgaswolke 9. Die Verschiebung der Bildpunkte am Bildsensor 12 ist durch direkte Analyse eines mit der Digitalkamera 5 aufgenommenen Bildes nicht identifizierbar. Zur Sichtbarmachung werden zwei Bilder mit der Methode der Schlierenfotografie miteinander verglichen, was kleinste Unterschiede der beiden Bilder kenntlich macht. In der beschriebenen Anwendung für Remote Emission Sensing kann die Verschiebung der Bildpunkte b, b' am Bildsensor 12 auch durch eine Veränderung der Abgaswolke 9, wie Ausbreitung oder Verwehung, während der Messung hervorgerufen werden. Da die Verschiebung der Bildpunkte b, b' über die gesamte Ausdehnung der Abgaswolke 9 passiert, kann somit in weiterer Folge auf die Abmaße der Ausdehnung der Abgaswolke 9 geschlossen werden. Die Verschiebung der Bildpunkte b, b' ist durch den Unterschied im Brechungsindex begründet und kann auf unterschiedliche Eigenschaften der Abgaswolke 9 zurückgeführt werden, wie z.B. Dichte oder Temperatur.

Jeder Bildpunkt b in einer digitalen Aufnahme einer Digitalkamera 5 repräsentiert bekanntermaßen die mit dem Bildsensor 12 am jeweiligen Bildpunkt b während der Belichtungszeit erfasste Lichtintensität.

Für die Durchführung der Schlierenfotografie ist es natürlich erforderlich, dass die beiden mit der Digitalkamera 5 gemachten Aufnahmen, in hinreichend kleinem zeitlichem Abstand gemacht werden, um eine momentane Ausdehnung der Abgaswolke 9 bestimmen zu können. Der zeitliche Abstand ist natürlich von der Anwendung und der Messanordnung 1 abhängig, beispielsweise von der erwarteten Geschwindigkeit oder der Abgaswolke 9, von der Digitalkamera 5, von der verwendeten Methode der Schlierenfotografie usw., und ist geeignet zu wählen. Der Fachmann ist in der Lage, einen geeigneten zeitlichen Abstand, zeitliche

unmittelbar aufeinanderfolgender Aufnahmen festzulegen, beispielsweise anhand von Versuchen oder aufgrund von Erfahrungswerten. Typische zeitliche Abstände werden sich im Mikrosekunden- oder Millisekundenbereich bewegen. Das soll durch die nachfolgenden Überlegungen verdeutlicht werden.

- 5 Wird beispielsweise eine digitale Videokamera als Digitalkamera 5 verwendet, so liegt die Aufnahmezeit bei ungefähr 20 bis 40 fps (Frames per Second). Für die Schlierenfotografie können zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Videoframes herangezogen werden, was einen zeitlichen Abstand der beiden Aufnahmen von 25ms bis 40ms ergäbe. Es könnten aber auch zwei nicht unmittelbar aufeinanderfolgende Videoframes verwendet werden. Bei Verwendung einer Einzelbildkamera als Digitalkamera 5 mit einer typischen Belichtungszeit im 10 100 Mikrosekundenbereich bis 1 Millisekundenbereich oder 10 Millisekundenbereich, ergibt sich daraus der kleinste mögliche zeitliche Abstand zweier unmittelbar hintereinander aufgenommener Aufnahmen. Anhand einer zu erwartenden Geschwindigkeit der Abgaswolke 9, kann auf einen geeigneten zeitlichen Abstand der beiden Aufnahmen geschlossen werden.
- 15 Bewegt sich ein Fahrzeug beispielsweise mit 50km/h, dann würde sich die Abgaswolke 9 bei einem zeitlichen Abstand der beiden Aufnahmen von 1ms ungefähr 14mm weiterbewegen, bei 100µs ungefähr 1,4mm. Damit kann eine hinreichende Genauigkeit in der Ermittlung der Ausdehnung einer Abgaswolke 9 erreicht werden.

Der zeitliche Abstand zweier unmittelbar hintereinander gemachter digitaler Bilder muss aber 20 zumindest so gewählt sein, dass eine sich durch das Messvolumen V bewegend Abgaswolke 9 mit beiden digitalen Bildern abgebildet wird. Je kleiner der zeitliche Abstand gewählt wird, umso genauer kann die Ausdehnung der Abgaswolke 9 ermittelt werden.

Werden mit der Digitalkamera 5 zeitlich unmittelbar aufeinander, worunter insbesondere ein zeitlicher Abstand im 10 Mikrosekunden (10 bis 99µs) bis 100 Millisekundenbereich (100 bis 25 999ms), vorzugsweise im 1 Millisekundenbereich (1 bis 9ms) bis 10 Millisekundenbereich (10 bis 99ms), verstanden wird, zwei Aufnahmen gemacht, so kann aus den beiden digitalen Bildern eine Verschiebung der Bildpunkte b, b' am Bildsensor 12 bestimmt werden.

Das kann beispielsweise dadurch gemacht werden, dass die beiden zeitlich hintereinander aufgenommenen Bilder voneinander abgezogen werden, um ein Differenzbild 20 zu erhalten.

30 „Abziehen“ bedeutet dabei, dass die Unterschiede in den erfassten Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt b (Pixel) des Bildsensors 12 der beiden Aufnahmen ermittelt werden, sodass für jeden Bildpunkt b die Differenz der Lichtintensitäten bestimmt wird. Das Abziehen kann durch einfach Subtraktion, auch als Betrag, der Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt b (Pixel) des Bildsensors 12 der beiden Aufnahmen erfolgen. Es kann aber auch eine Division der

35 Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt b (Pixel) des Bildsensors 12 der beiden Aufnahmen

erfolgen, wobei die größere Lichtintensität an einem Bildpunkt b durch die kleinere Lichtintensität am Bildpunkt b dividiert wird. Auch ein anderer mathematischer Zusammenhang der Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt b (Pixel) des Bildsensors 12 der beiden Aufnahmen, der eine Differenz der Lichtintensitäten liefert, kann als „Abziehen“ verwendet werden. Ist keine

5 Abgaswolke 9 zwischen Linsenordnung 13 und Bildbereich 14, so wird die Differenz der Lichtintensitäten im Differenzbild 20 gleich Null, oder zumindest sehr klein, werden. Für das Hintergrund-Schlieren Verfahren ist damit ein möglichst konstanter Hintergrund vorteilhaft. Das gilt auch für einen Bereich des Bildbereiches 14 dessen Abbildung auf den Bildsensors 12 durch eine Abgaswolke 9 nicht beeinflusst wird. Für einen Bereich des Bildbereichs 14

10 dessen Abbildung auf den Bildsensor 12 aber durch eine Abgaswolke 9 beeinflusst wird, wird sich im Differenzbild 20 eine Differenz der Lichtintensität ergeben, die ausgewertet werden kann.

Im Differenzbild 20 wird es im Falle einer Abgaswolke 9 daher Bereiche mit einer Differenz-Lichtintensität geben, die zur Bestimmung der Ausdehnung der Abgaswolke 9 ausgewertet

15 werden kann. Im Differenzbild 20 kann es aber auch Bereiche mit geringer oder keiner Differenz-Lichtintensität geben, die von Bereichen des Bildbereiches 14 stammen in denen keine Veränderung in dem definierten zeitlichen Abstand der beiden Bilder stattgefunden hat.

Bereiche mit geringer Differenz-Lichtintensität, die durch unvermeidbare Störungen, Rauschen usw. in den Bildern entstehen können, können bedarfsweise durch Bildbearbeitung in

20 der Bildauswerteeinheit 11 entfernt werden, beispielsweise durch Schwellwertbildung. Bei der Schwellwertbildung können Differenz-Lichtintensitäten kleiner einem vorgegebenen Schwellwert aus dem Differenzbild 20 eliminiert werden. Ebenso können bedarfsweise auftretende Störungen größer dem Schwellwert durch Bildbearbeitung in der Bildauswerteeinheit 11 eliminiert werden. Störungen können beispielsweise als Bereich im Differenzbild 20

25 identifiziert werden, in denen eine geringe Dichte an Punkten mit Differenz-Lichtintensität enthalten ist. Im Bereich einer Abgaswolke 9 kann angenommen werden, dass die Dichte der Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität hoch ist, also viele Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität pro Flächeneinheit enthalten ist. In Bereichen mit geringer Dichte an Bildpunkten mit Differenz-Lichtintensität pro Flächeneinheit kann auf Störungseffekte geschlossen

30 werden. Wenn eine bestimmte Dichte an Bildpunkten mit Differenz-Lichtintensität pro Flächeneinheit vorgegeben wird, dann können auch solche Störungen aus dem Differenzbild 20 eliminiert werden. Rauschen kann auch dadurch minimiert werden, indem keine speicher-komprimierten Bilddaten verwendet werden, weder bei den aufgenommenen Bildern, noch beim Differenzbild 20.

35 Zur Verbesserung der Auswertung des Differenzbildes 20 können in der Bildauswerteeinheit 11 neben oder anstatt der oben erwähnten bedarfsweise auch noch weitere oder andere

Bildbearbeitungstechniken angewendet werden, wie beispielsweise zur Kontrasterhöhung, zur Schärfung des Bildes, zur Filterung usw.

Die Auswertung des Differenzbildes 20 kann aber auch durch Methoden der künstlichen Intelligenz erfolgen. Hierzu wird eine künstliche Intelligenz mit Trainings-Differenzbildern trainiert, damit die künstliche Intelligenz in der Lage ist, in erhaltenen Differenzbildern, den Bereich einer Abgaswolke 9 zu identifizieren, beispielsweise indem im Differenzbild 20 Bereiche erkannt werden, in denen die Dichte der Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität hinreichend (im Sinne einer Überschreitung einer vorgegebenen Minimaldichte) hoch ist, also hinreichend viele Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität pro Flächeneinheit enthalten ist.

- 10 Das Hintergrund-Schlieren Verfahren kann auch dadurch verbessert werden, wenn ein vorgegebener konstanter Hintergrund verwendet wird, beispielsweise ein Hintergrund mit einem vorgegebenen Muster.

Im Differenzbild 20 kann natürlich auch eine geteilte Abgaswolke 9 erkannt werden, was sich im Differenzbild 20 in voneinander getrennten Bereichen mit Bildpunkten mit Differenz-Lichtintensität bemerkbar machen wird. In der Regel kann man aber davon ausgehen, dass ein zusammenhängende Abgaswolke 9 vorhanden ist.

Die Auswertung des Differenzbildes 20 wird anhand der Fig.3a und Fig.3b erläutert. In Fig.3a ist ein Teil eines Fahrzeugs 8 zu erkennen, dass sich zwischen einem Bildbereich 14 (im Hintergrund) und einer Digitalkamera 5 (in Fig.3a nicht dargestellt) in einer Bewegungsrichtung R durchbewegt (in Fig.3a von rechts nach links). Das Fahrzeug 8 stößt eine Abgaswolke 9 aus, die in der aufgenommenen Abbildung der Fig.3a nicht erkennbar ist. Es werden mit der Digitalkamera 5 zeitlich unmittelbar hintereinander zwei digitale Aufnahmen gemacht. Die beiden Aufnahmen werden, in der Bildbearbeitungseinheit 11, voneinander abgezogen (beispielsweise subtrahiert), woraus das in Fig.3b dargestellte Differenzbild 20 entsteht. Im Differenzbild 20 entstehen damit Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität, die ausgewertet werden, um im Differenzbild 20 die Abgaswolke 9 zu bestimmen.

Im Ausführungsbeispiel nach Fig.3b wurde auf dieses Differenzbild 20 bereits eine optionale Schwellwertbildung angewendet, sodass Bildpunkte b mit niedriger Differenz-Lichtintensität eliminiert wurden. Die Differenz-Lichtintensitäten der verbliebenen Bildpunkte b wurden auf einen bestimmten Wert einer Lichtintensität, beispielsweise auf den Wert Eins, normiert, was aber nicht unbedingt erforderlich ist. Das ist vorteilhaft, weil dann alle Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität denselben Intensitätswert haben, was die weitere Auswertung erleichtern kann. Die Normierung auf einen vorgegebenen Wert kann aber auch ohne vorherige

Schwellwertbildung oder auch in Zusammenhang mit einem anderen Bildbearbeitungstechnik angewendet werden.

Es sind im Differenzbild 20 helle Bereiche mit hoher Differenz-Lichtintensität und Bereiche mit keiner Differenz-Lichtintensität ersichtlich. Ebenso sind Bereiche mit einer hohen Dichte an Bildpunkten mit hoher Differenz-Lichtintensität (angedeutet durch den Rahmen 21) und Bereiche mit niedriger Dichte an Bildpunkten mit hoher Differenz-Lichtintensität erkennbar. Die Bildbearbeitung des Differenzbildes 20 in der Bildauswerteeinheit 11 kann damit auch die Bestimmung eines Bereiches mit hoher Dichte an Bildpunkten mit hoher Differenz-Lichtintensität umfassen, sodass die weitere Bildbearbeitung auf diesen Bereich eingeschränkt werden kann. Im Bereich mit einer hohen Dichte an Bildpunkten mit hoher Differenz-Lichtintensität kann die Abgaswolke 9 erkannt werden. Für diese Auswertung kann eine bestimmte Minimaldichte an Bildpunkten mit hoher Differenz-Lichtintensität (in Anzahl Bildpunkten pro Flächeneinheit) vorgegeben sein.

Jedem Bildpunkt des Differenzbildes 20 kann damit eine Differenz-Lichtintensität zugeordnet werden. Die Bildauswerteeinheit 11 kann daher mit Bildauswertesoftware im Differenzbild 20 zumindest einen Bereich 21 mit Bildpunkten mit Differenz-Lichtintensität bestimmen, in dem die Dichte der Bildpunkte mit Differenz-Lichtintensität größer einer vorgegebenen Minimaldichte ist. In diesem Bereich 21 befindet sich die Abgaswolke 9 oder der Bereich 21 stellt die Abgaswolke 9 dar. Die Bildauswerteeinheit 11 ermittelt dann die Gesamtdurchtrittsstrecke des Lichtstrahls 6 in Richtung des Strahlenganges des Lichtstrahls 6 im zumindest einen Bereich 21 des Differenzbildes 20. Das ist aber natürlich nur die auf den Bildsensor 12 abgebildete Gesamtdurchtrittsstrecke x' . Mittels der bekannten optischen Eigenschaften der Digitalkamera 5 kann dann einfach auf die Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichtstrahls durch die Abgaswolke 9 im Messvolumen V der Messanordnung 1 umgerechnet werden.

Im Differenzbild 20 ist daher die Gesamtdurchtrittsstrecke x' eines Lichtstrahles 6 durch die abgebildete Abgaswolke 9 zu bestimmen, was ebenfalls mittels der Bildauswerteeinheit 11 erfolgt. Die Ausrichtung und den Strahlengang eines Lichtstrahles 6 bezogen auf das Differenzbild 20 ist aufgrund der bekannten Messanordnung 1, mit der bekannten Anordnung der Digitalkamera 5, des Bildbereichs 14 und der Richtung und dem Strahlengang des Lichtstrahls 6, bekannt. In Fig.4 ist der Lichtstrahl 6 beispielsweise in der Ebene des Differenzbildes 20. Das entspricht beispielsweise die Anordnung einer Messeinheit 4 in Fig.3a oberhalb des Fahrzeugs 8, wobei der Lichtstrahl 6 senkrecht nach unten gerichtet ist.

Es ist damit bekannt, an welcher Stelle oder an welchen Stellen (im Falle von Reflexionen durch die Abgaswolke 9) und mit welcher Richtung der Lichtstrahl 6 im Differenzbild 20 in den Bereich 21 oder die Abgaswolke 9 eintritt und austritt. Die Strecke dazwischen ist dann

die Gesamtdurchtrittsstrecke x' am Bildsensor 12. Das muss noch auf die Gesamtdurchtrittsstrecke x in der realen Welt umgerechnet werden, was aufgrund der bekannten optischen Eigenschaften der Digitalkamera 5 einfach erfolgen kann.

Bezeichnet x' die Gesamtdurchtrittsstrecke am Bildsensor 12 in mm, H die aufgrund der Ausrichtung der Digitalkamera 5 relevante Bildsensordimension (beispielsweise die Höhe des Bildsensors 12) in mm, P_O die Gesamtdurchtrittsstrecke in Pixeln und P_S die Anzahl der Pixel des Bildsensors 12 in der Richtung der relevanten Bildsensordimension, dann kann die Gesamtdurchtrittsstrecke x' am Bildsensor 12 aus dem Zusammenhang $x' = \frac{H \cdot P_O}{P_S}$ ermittelt

werden. Wenn der Lichtstrahl 6 die Abgaswolke 9 mehrmals durchdringt, ergeben sich entsprechende Teilstrecken, die addiert werden. Die Umrechnung in die Gesamtdurchtrittsstrecke x der Abgaswolke 9 in die reale Welt erfolgt mit der bekannten Brennweite f der Digitalkamera 5 und dem bekannten Abstand L der Digitalkamera 5 zur Abgaswolke 9 aus dem Zusammenhang $x = \frac{L \cdot x'}{f}$.

Um die Gesamtdurchtrittsstrecke in Pixeln P_O zu bestimmen können im Differenzbild 20 die Pixel zwischen dem Eintritt des Lichtstrahls 6 in den Bereich 21 oder in die Abgaswolke 9 und dem Austritt des Lichtstrahls 6 aus dem Bereich 21 oder aus der Abgaswolke 9 gezählt werden. Hierfür kann durch Bildbearbeitung ein Rand des Bereiches 21 oder der Abgaswolke 9 im Differenzbild 20 bestimmt werden und alles innerhalb des Randes mit Bildpunkten mit hoher Differenz-Lichtintensität ausgefüllt werden, wie in Fig.5 dargestellt.

Aus den obigen Zusammenhängen ergibt sich auch eine bevorzugte Ausrichtung der Digitalkamera 5. Die Digitalkamera 5 wird vorzugsweise so ausgerichtet, dass die optische Achse der Digitalkamera 5 normal auf den Lichtstrahl 6 und normal auf die Bewegungsrichtung R der Abgaswolke 9 (beispielsweise aufgrund einer Bewegung des Fahrzeugs 8) ist.

Mit einer Digitalkamera 5 kann daher die Ausdehnung der Abgaswolke 9 in einer Ebene ermittelt werden. Werden für das Schlierenverfahren mehrere Digitalkameras 5 verwendet, die das Messvolumen V aus verschiedenen Richtungen aufnehmen, dann kann die Ausdehnung der Abgaswolke 9 auch in alle drei Raumdimensionen ermittelt werden, was die Genauigkeit in der Ermittlung der Ausdehnung erhöhen kann.

Fig.6 zeigt eine andere Messanordnung 1. In diesem Ausführungsbeispiel ist die Messeinheit 4 seitlich eines Messvolumens V angeordnet und strahlt einen Lichtstrahl 6 im Wesentlichen parallel zu einer Fahrbahn 7 ab. Der Lichtstrahl 6 wird an einem Reflektor 15 reflektiert und läuft ebenso im Wesentlichen parallel zur Fahrbahn 7 retour. Der rückgestrahlte Lichtstrahl 6

wird einem Detektor 3 zugeleitet, der den rückgestrahlten Lichtstrahl 6 erfasst und auswertet. Insbesondere wird eine Absorption A ermittelt. Die Absorption A wird in einer Auswerteeinheit 10 verarbeitet, kann aber auch erst in der Auswerteeinheit 10 aus Daten des Detektors 3 ermittelt werden. Mit einer Digitalkamera 5 wird das Messvolumen V aufgenommen und aus
5 zwei zeitlich unmittelbar hintereinander aufgenommenen Bildern die Ausdehnung einer Abgaswolke 9 entlang des Strahlenganges des Lichtstrahls 6 im Messvolumen V ermittelt und daraus eine Gesamtdurchtrittsstrecke x des Lichtstrahls 6 durch die Abgaswolke 9, beispielsweise in einer Bildauswerteeinheit 11, die auch in der Auswerteeinheit 10 integriert sein
10 kann. Die Gesamtdurchtrittsstrecke x wird in der Auswerteeinheit 10 verwendet, um aus der Gesamtdurchtrittsstrecke x und der Absorption A eine Konzentration c eines gasförmigen oder festen Stoffes in der Abgaswolke 9 zu bestimmen, beispielsweise wie oben erläutert.

Patentansprüche

1. Stationäre Messanordnung zur Konzentrationsbestimmung zumindest eines gasförmigen oder festen Stoffes in zumindest einem stationären Messvolumen (V) der Messanordnung (1), wobei in der Messanordnung (1) zumindest eine Messeinheit (4) vorgesehen ist, einen Lichtstrahl (6) mit vorgegebener Lichtstrahlintensität (I_0) durch das Messvolumen (V) abzustrahlen, und in der Messanordnung (1) zumindest ein Detektor (3) vorgesehen ist, um den Lichtstrahl (6) nach zumindest einmaligen Durchtritt durch das Messvolumen (V) zu erfassen, wobei der zumindest eine Detektor (3) ausgebildet ist, eine Abnahme der Lichtstrahlintensität (I_0) des Lichtstrahls (6) aufgrund des zumindest einen gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) zu ermitteln, wobei in der Messanordnung (1) eine Digitalkamera (5) vorgesehen ist und eingerichtet ist, eine digitale Aufnahme des Messvolumens (V) zu machen, und in der Messanordnung (1) eine Bildauswerteeinheit (11) vorgesehen ist und eingerichtet ist, die digitale Aufnahme auszuwerten, um bei teilweisem oder vollständigem Vorhandensein einer Abgaswolke (9) im Messvolumen (V) eine Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (9) durch die Abgaswolke (9) im Messvolumen (V) zu bestimmen, und wobei in der Messanordnung (1) eine Auswerteeinheit (10) vorgesehen ist und eingerichtet ist, aus der ermittelten Abnahme der Lichtstrahlintensität (I_0) und der Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) durch die Abgaswolke (9) eine Konzentration (c) des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) zu ermitteln, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Digitalkamera (5) eingerichtet ist, zeitlich unmittelbar hintereinander zumindest zwei digitale Aufnahmen des Messvolumens (V) zu machen, **dass** die Bildauswerteeinheit (11) eingerichtet ist, die zumindest zwei digitalen Aufnahmen des Messvolumens (V) voneinander abzuziehen, um ein Differenzbild (20) mit einer Vielzahl von Bildpunkten (b) zu erhalten, wobei in jedem Bildpunkt (b) des Differenzbildes (20) eine Differenz-Lichtintensität vorhanden ist, **dass** die Bildauswerteeinheit (11) eingerichtet ist, im Differenzbild (20) zumindest einen Bereich (21) mit Bildpunkten mit Differenz-Lichtintensität zu bestimmen, in dem die Dichte der Bildpunkte (b) mit Differenz-Lichtintensität größer einer vorgegebenen Minimaldichte ist, und die Bildauswerteeinheit (11) eingerichtet ist, die Gesamtdurchtrittsstrecke (x') des Lichtstrahls (6) in diesem zumindest einen Bereich (21) des Differenzbildes (20) entlang des Strahlenganges des Lichtstrahls (6) zu bestimmen und mittels der bekannten optischen Eigenschaften der Digitalkamera (5) auf die Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) im Messvolumen (V) umzurechnen **und dass** die Auswerteeinheit (10) eingerichtet ist, die derart bestimmte Gesamtdurchtrittsstrecke (x) für die Ermittlung Konzentration (c) des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) zu verwenden.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Digitalkamera (5) auf einen vorgegebenen, vorzugsweise konstanten, Hintergrund gerichtet ist und das Messvolumen (V) zwischen der Digitalkamera (5) und dem Hintergrund vorgesehen ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bildauswerteeinheit (11) eingerichtet ist, die Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt (b) der beiden Aufnahmen voneinander zu subtrahieren, um das Differenzbild zu ermitteln.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bildauswerteeinheit eingerichtet ist, Differenz-Lichtintensitäten kleiner einem vorgegebenen Schwellwert aus dem Differenzbild zu eliminieren.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bildauswerteeinheit eingerichtet ist, die Differenz-Lichtintensitäten der Bildpunkte im Differenzbild auf einen bestimmten Wert der Lichtintensität zu normieren.
6. Verfahren zur Konzentrationsbestimmung zumindest eines gasförmigen oder festen Stoffes in zumindest einem stationären Messvolumen (V) einer stationären Messanordnung, wobei eine Messeinheit (4) einen Lichtstrahl (6) mit vorgegebener Lichtstrahlintensität (I_0) durch das Messvolumen (V) abstrahlt und der Lichtstrahl (6) nach zumindest einmaligem Durchtritt durch das Messvolumen (V) von einem Detektor (3) erfasst wird und der Detektor (3) eine Abnahme der Lichtstrahlintensität (I_0) des Lichtstrahls (6) aufgrund des zumindest einen gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) ermittelt, wobei mit einer Digitalkamera (5) eine digitale Aufnahme des Messvolumens (V) gemacht wird und die digitale Aufnahme mit einer Bildauswerteeinheit (11) ausgewertet wird, um bei teilweisem oder vollständigem Vorhandensein einer Abgaswolke (9) im Messvolumen (V) eine Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) durch die Abgaswolke (9) im Messvolumen (V) zu bestimmen, und wobei in einer Auswerteeinheit (10) aus der ermittelten Abnahme der Lichtstrahlintensität (I_0) und der Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) durch die Abgaswolke (9) eine Konzentration (c) des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) ermittelt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit der Digitalkamera (5) zeitlich unmittelbar hintereinander zumindest zwei digitale Aufnahmen des Messvolumens (V) gemacht werden, **dass** mit der Bildauswerteeinheit (11) die zumindest zwei digitalen Aufnahmen des Messvolumens (V) voneinander abgezogen werden, um ein Differenzbild (20) mit einer Vielzahl von Bildpunkten (b) zu erhalten, wobei in jedem Bildpunkt (b) des Differenzbildes (20) eine Differenz-Lichtintensität vorhanden ist, **dass** die Bildauswerteeinheit (11) im Differenzbild (20) zumindest einen eine Abgaswolke (9) im Messvolumen (V) repräsentierenden Bereich (21) mit Bildpunkten (b) mit Differenz-Lichtintensität bestimmt, in dem die Dichte der Bildpunkte (b) mit Differenz-Lichtintensität größer einer vorgegebenen Minimaldichte ist, und die

Bildauswerteeinheit (11) die Gesamtdurchtrittsstrecke (x') des Lichtstrahls (6) in diesem zumindest einen Bereich (21) des Differenzbildes (20) entlang des Strahlenganges des Lichtstrahls (6) bestimmt und mittels der bekannten optischen Eigenschaften der Digitalkamera (5) auf die Gesamtdurchtrittsstrecke (x) des Lichtstrahls (6) im Messvolumen (V) umrechnet
 5 **und dass** die Auswerteeinheit (10) die Konzentration (c) des gasförmigen oder festen Stoffes im Messvolumen (V) mit der derart bestimmten Gesamtdurchtrittsstrecke (x) ermittelt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Digitalkamera (5) auf einen vorgegebenen, vorzugsweise konstanten, Hintergrund gerichtet wird und das Messvolumen (V) zwischen der Digitalkamera (5) und dem Hintergrund angeordnet wird.

10 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bildauswerteeinheit (11) die Lichtintensitäten an jedem Bildpunkt (b) der beiden Aufnahmen voneinander subtrahiert, um das Differenzbild (20) zu ermitteln.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bildauswerteeinheit (11) die Differenz-Lichtintensitäten der Bildpunkte (b) im Differenzbild
 15 (20) kleiner einem vorgegebenen Schwellwert aus dem Differenzbild (20) eliminiert.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bildauswerteeinheit (11) die Differenz-Lichtintensitäten der Bildpunkte (b) im Differenzbild (20) auf einen bestimmten Wert der Lichtintensität normiert.

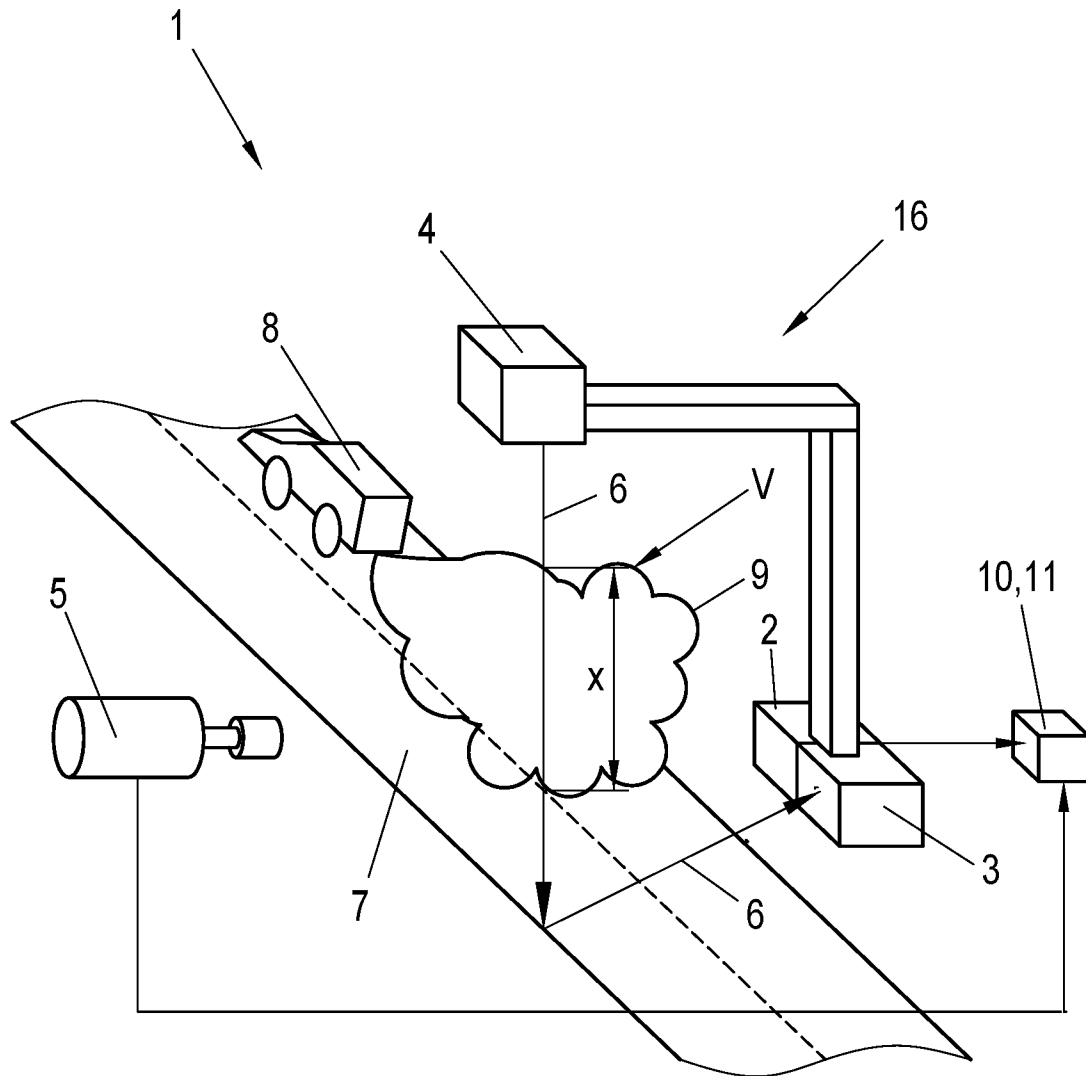


Fig. 1

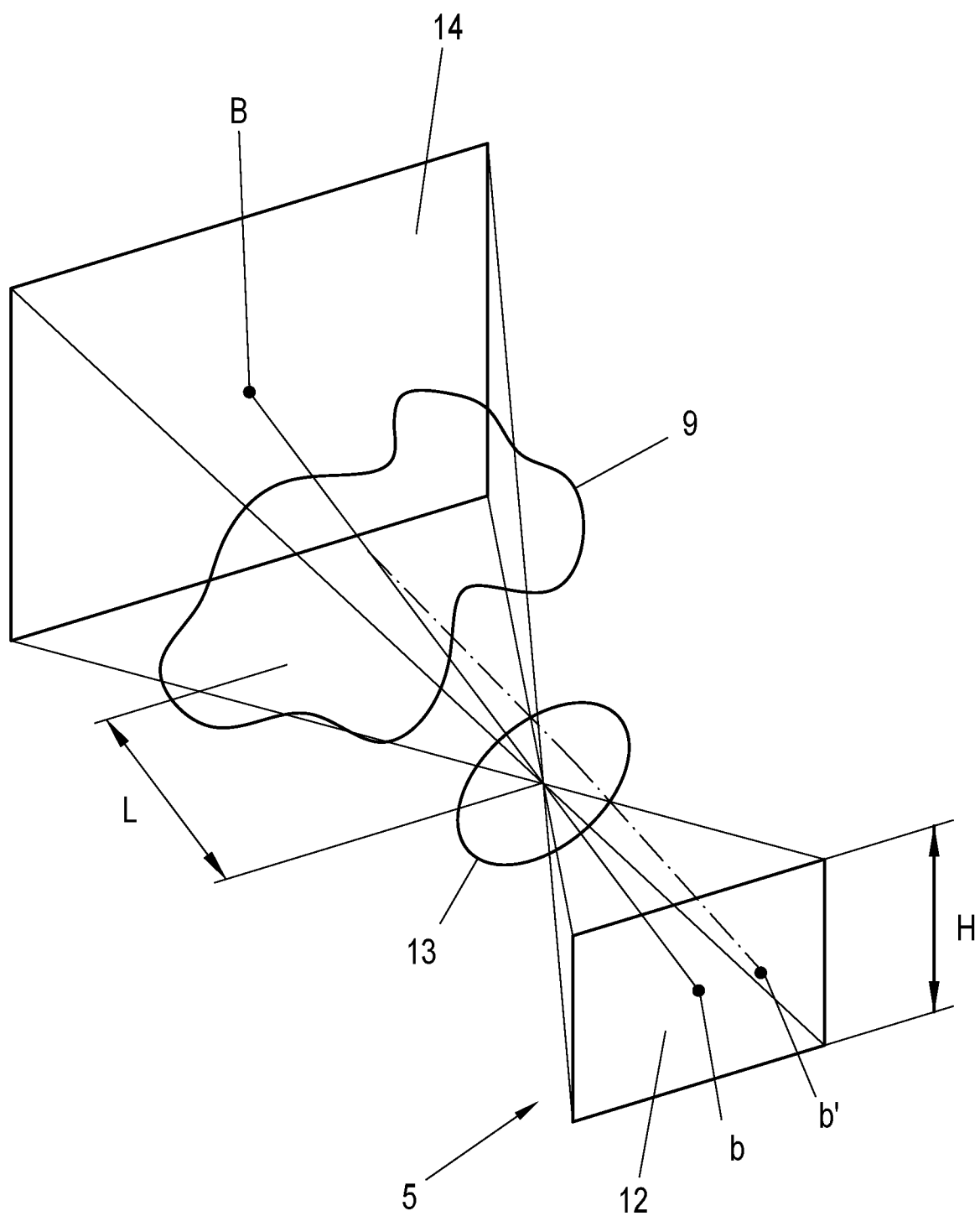


Fig. 2

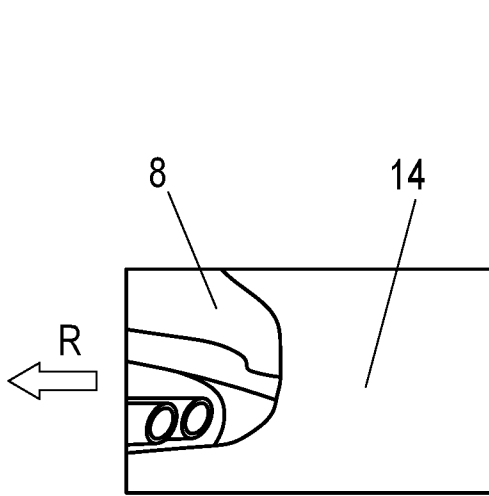


Fig. 3a

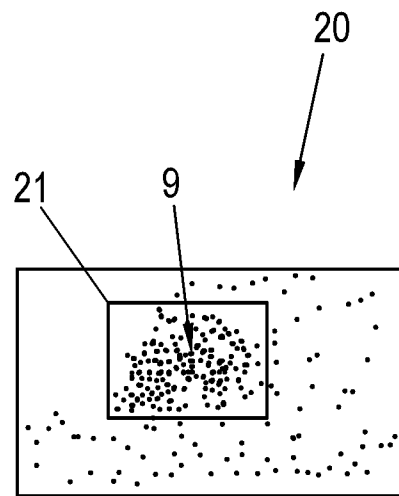


Fig. 3b

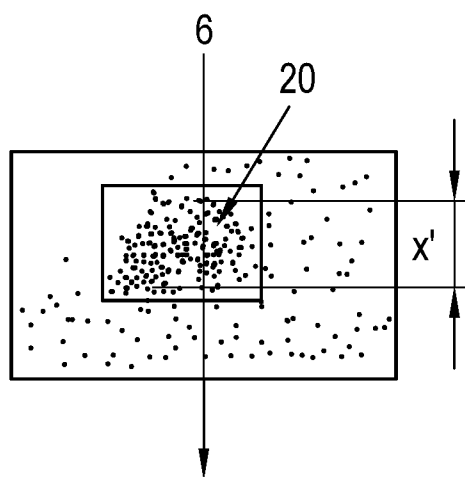


Fig. 4

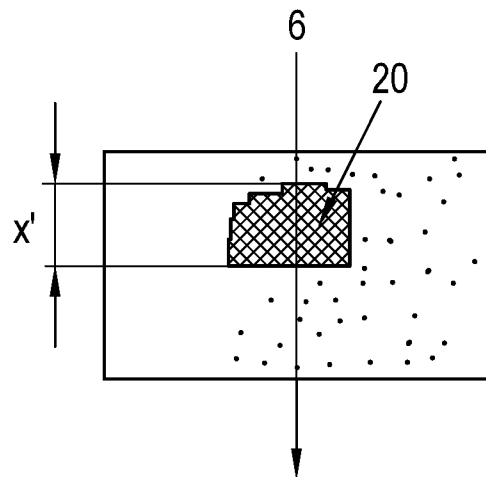


Fig. 5

