



(10) **DE 10 2014 200 627 A1** 2015.07.16

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 200 627.9**

(22) Anmeldetag: **15.01.2014**

(43) Offenlegungstag: **16.07.2015**

(51) Int Cl.: **G01N 21/359 (2014.01)**

G01N 21/39 (2006.01)

G01J 3/42 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch
das Bundesministerium für Wirtschaft und
Technologie, dieses vertreten durch den
Präsidenten der Physikalisch-Technischen
Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	198 39 552	A1
US	6 469 785	B1
US	7 026 165	B2
US	2004 / 0 115 861	A1

(72) Erfinder:

**Buchholz, Bernhard, 38114 Braunschweig, DE;
Ebert, Volker, 38112 Braunschweig, DE**

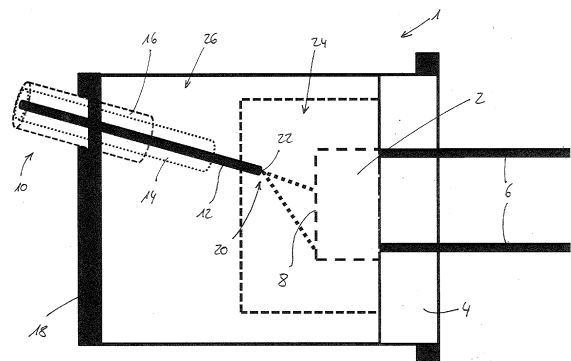
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Detektoranordnung und Spektroskop**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Detektoranordnung (1) zum Leiten elektromagnetischer Strahlung aus einer optischen Faser (10) auf einen Detektor (2), wobei ein Austrittsende (20) der optischen Faser (10) mit einer Austrittsfläche (22) und eine Detektorfläche (8) des Detektors (2) in einem gemeinsamen Gehäuse (18) angeordnet sind. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass das Gehäuse (18) wenigstens so weit mit einem für elektromagnetische Strahlung einer gewünschten Wellenlänge transparenten, nicht-gasförmigen Material (24) gefüllt ist, das elektromagnetische Strahlung, die aus der Austrittsfläche (22) des Austrittsendes (20) der optischen Faser (10) austritt, direkt in das Material (24) eintritt und von dem Material (24) auf die Detektorfläche (8) fällt.

Ferner betrifft die Erfindung ein Spektroskop, insbesondere Gasanalysegerät, mit wenigstens einer Detektoranordnung (1).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Detektoranordnung zum Leiten elektromagnetischer Strahlung aus einer optischen Faser auf einen Detektor, wobei ein Austrittsende der optischen Faser mit einer Austrittsfläche und eine Detektorfläche des Detektors in einem gemeinsamen Gehäuse angeordnet sind.

[0002] Derartige Detektoranordnungen sind heute aus dem Stand der Technik bekannt und werden beispielsweise für Spektroskope und Gasanalysegeräte aber auch im Telekommunikationsbereich eingesetzt.

[0003] In der Gas-Sensorik wird oftmals das sogenannte TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)-Verfahren verwendet. Dabei wird ausgenutzt, dass bestimmte Gase elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlängen absorbieren. Vereinfacht ausgedrückt wird bei der TDLAS-Technik ein Probegas, in dem die gewünschte Gas-Komponente nachgewiesen werden soll, in einem gasgefüllten Messvolumen durchleuchtet. Dazu wird ein sehr gut charakterisierter Laserstrahl, dessen Wellenlänge sich meist im nahen oder mittleren Infrarotbereich befindet, verwendet. Die Wellenlänge des Lasers wird dabei vorzugsweise schrittweise oder kontinuierlich verändert, sodass eine gas- oder molekulspezifische Abschwächung des am Detektor detektierten Lichtes als Messsignal ausgewertet werden kann.

[0004] Der Transport des Lichtes vom Laser zur Messstelle findet häufig mittels Glasfasern oder anderer optischer Fasern statt und geht von einer fasergekoppelten Laserlichtquelle, beispielsweise einem Diodenlaser, der kommerziell beispielsweise im Telekommunikationsbereich erhältlich ist, aus. Der Vorteil eines solchen faserbasierten Spektrometers besteht darin, dass innerhalb der Faser keine gas-spezifische Abschwächung der elektromagnetischen Strahlung stattfinden kann. Sogenannte parasitäre optische Verluste, also Absorptionen, die außerhalb der eigentlichen Messstrecke stattfinden, können so vermieden werden.

[0005] Problematisch ist beispielsweise bei der Messung von niedrigen Wasserdampfkonzentrationen jedoch, dass beispielsweise eine Einkoppelregion zwischen dem Laser und der optischen Faser nicht vollständig wasserfrei ist. Damit wird bereits hier vor der eigentlichen Messstrecke die elektromagnetische Strahlung gasspezifisch geschwächt, was jedoch durch eine Kalibrierung der Messgeräte zum großen Teil ausgeglichen werden kann. Kritisch ist allerdings, dass ein Teil dieser Einkoppelregion dampfdiffusionsoffen ist und somit eine zeitlich variierende Wasserdampfkonzentration enthalten kann. Während dies unter herkömmlichen Laborbedingungen

oder beispielsweise für Telekommunikationszwecke nicht problematisch ist, ist dies in kritischen Anwendungen in Forschung oder Industrie beispielsweise auf Forschungsflugzeugen, wo die Luftfeuchte auf weniger als 1/10.000 der herkömmlichen Luftfeuchte abgesenkt werden kann, sehr problematisch und führt zu großen systematischen Abweichungen. Dies gilt umso mehr beim Spurenfeuchten-Nachweis, wie er beispielsweise in der Gasindustrie oder bei der Halbleiterfertigung notwendig ist. Derartige zeitabhängige parasitäre Effekte können naturgemäß mit einer einmaligen Kalibrierung nicht auf Dauer ausgeglichen werden.

[0006] Analoge Schwierigkeiten treten auch bei der Detektoranordnung auf, bei der die elektromagnetische Strahlung aus einer optischen Faser auf eine Detektorfläche eines Detektors geleitet wird. Auch in diesem Bereich kann es zu parasitären Einflüssen kommen. Dies führt dazu, dass die Einflüsse aus dem Einkoppelbereich nicht separat bestimmt oder gemessen werden können, da immer auch parasitäre Strahlungen und Einflüsse aus der Detektoranordnung mit gemessen werden, die nicht voneinander getrennt werden können. Dies wäre jedoch für eine Bestimmung der Störeinflüsse aus der Einkoppelregion dringend notwendig, damit diese möglichst gut kompensiert und ausgeglichen werden können.

[0007] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Detektoranordnung zum Leiten elektromagnetischer Strahlung aus einer optischen Faser auf einen Detektor so weiterzuentwickeln, dass in der Detektoranordnung selbst keine parasitären Einflüsse entstehen.

[0008] Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe durch eine Detektoranordnung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1, die sich dadurch auszeichnet, dass das Gehäuse wenigstens so weit mit einem für elektromagnetische Strahlung einer gewünschten Wellenlänge transparenten, nicht-gasförmigen Material gefüllt ist, das elektromagnetische Strahlung, die aus der Austrittsfläche des Austrittsendes der optischen Faser austritt, direkt in das Material eintritt und von dem Material direkt auf die Detektorfläche fällt.

[0009] Auf diese Weise ist gewährleistet, dass die elektromagnetische Strahlung auf dem Weg von der optischen Faser zur Detektorfläche keine parasitären Strecken durchlaufen muss, auf denen sie in Kontakt mit störenden Gasen kommen kann, die das Messergebnis beispielsweise eines Spektroskops verfälschen können. Dabei kann als Material ein flüssiges oder ein festes Material verwendet werden, wobei festes Material insbesondere für den Fall, dass das Gehäuse nur teilweise gefüllt ist, den Vorteil hat, dass die Orientierung der Detektoranordnung im Raum frei geändert werden kann, ohne dass die Funktionalität der Detektoranordnung beeinträchtigt würde. Als be-

sonders bevorzugtes festes Material hat sich Epoxidharz herausgestellt. Vorteilhafterweise weist das Material einen optischen Brechungsindex auf, der zumindest bei der gewünschten Wellenlänge auf einen Brechungsindex der optischen Faser angepasst ist, insbesondere um weniger als 5 %, bevorzugt weniger als 3 %, besonders bevorzugt weniger als 1 %, von diesem abweicht. Optimalerweise verfügt das Material zumindest bei der gewünschten Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung über den gleichen Brechungsindex wie die optische Faser.

[0010] Wie bei jedem Übergang von einem optischen Medium in ein anderes optisches Medium kommt es an der Grenzfläche zu Brechungen und zu Reflexionen der elektromagnetischen Strahlung. Dadurch wird einerseits die auf die Detektorfläche geleitete Menge der elektromagnetischen Strahlung reduziert. Andererseits kommt es zu interferometrischen Überlagerungen der elektromagnetischen Strahlung. Beides ist für ein optimales Signal-zu-Rausch-Verhältnis nicht vorteilhaft und beeinträchtigt somit die Detektor- und Spektroskopeigenschaften. Durch eine Anpassung der beiden Brechungsindizes des Materials und der optischen Faser ist es möglich, die Grenzfläche zwischen diesen beiden Materialien "verschwinden" zu lassen. Weisen beide Materialien exakt den gleichen Brechungsindex auf, können Brechungen und Reflexionen der elektromagnetischen Strahlung vollständig vermieden werden. Dadurch werden die Auflösung und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Detektors weiter verbessert.

[0011] Vorzugsweise ist der Teil des Gehäuses, der nicht mit dem Material gefüllt ist, mit einem Füllmaterial, insbesondere einem Epoxidharz ausgefüllt. Dies ist eine einfach herzustellende und kostengünstige Möglichkeit, das Gehäuse vollständig zu füllen, ohne das vollständige Gehäuse mit dem Material, das ggf. sehr kostspielig sein kann, zu füllen. Insbesondere bei der Verwendung flüssiger Materialien ist es von Vorteil, den verbleibenden Teil des Gehäuses ebenfalls auszufüllen, um nicht bei einer Verschwenkung oder Verkippung der Detektoranordnung parasitäre Strecken innerhalb der Detektoranordnung zu generieren.

[0012] Besonders vorteilhaft ist jedoch, wenn das Gehäuse mit dem Material vollständig gefüllt, insbesondere mit dem Material ausgegossen ist. Auf diese Weise werden gegenüber der nur teilweisen Füllung des Gehäuses mit dem Material Arbeitsschritte eingespart und somit das Herstellungsverfahren beschleunigt und die Herstellungskosten gesenkt.

[0013] In einer bevorzugten Ausgestaltung der Detektoranordnung ist die Austrittsfläche des Faseraustrittsendes relativ zu der Detektorfläche geneigt angeordnet. Dies bedeutet, dass die beiden Flächen nicht parallel zueinander verlaufen. Elektromagneti-

sche Strahlung, die aus der Austrittsfläche des Austrittsendes der optischen Faser austritt, trifft folglich auf die Detektorfläche, wobei ein Teil der elektromagnetischen Strahlung reflektiert wird. Würde man die Austrittsfläche und die Detektorfläche parallel zueinander ausrichten, würde ein Großteil dieser reflektierten elektromagnetischen Strahlung auf die Austrittsfläche zurückreflektiert werden. Dabei wird ein Teil der elektromagnetischen Strahlung erneut reflektiert, während ein anderer Teil wieder in die optische Faser eindringt. Beides führt zu interferometrischen Überlagerungen elektromagnetischer Wellen, die für das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit die Auflösung des Detektors nachteilig sind. Durch eine geneigte Anordnung der beiden Flächen relativ zueinander wird ein Großteil dieser Rückreflexion der elektromagnetischen Strahlung in die Faser bzw. auf die Austrittsfläche verhindert. Dadurch werden die Detektorqualität und die Qualität des aufgenommenen Messsignals weiter erhöht.

[0014] Besonders bevorzugt ist ein Neigungswinkel, um den die Austrittsfläche relativ zu der Detektorfläche geneigt ist, wenigstens halb so groß, bevorzugt genau so groß, wie ein Öffnungswinkel, der aus der Austrittsfläche austretenden elektromagnetischen Strahlung. Elektromagnetische Strahlung verlässt die optische Faser nicht als vollständig paralleles Strahlenbündel, sondern weist einen Öffnungswinkel auf. Der Öffnungswinkel kann dabei beispielsweise als der Winkel um die Längsachse der optischen Faser definiert werden, außerhalb dessen die Intensität der Laserstrahlung unterhalb eines bestimmten Grenzwertes, beispielsweise die Hälfte oder der 1/e-te Teil der Maximalintensität ist. Wird nun der Neigungswinkel zwischen der Austrittsfläche und der Detektorfläche größer als die Hälfte dieses Öffnungswinkels gewählt, wird elektromagnetische Strahlung, die innerhalb dieses Öffnungswinkels um die Längsachse der optischen Faser die optische Faser verlässt, durch die Detektorfläche nicht auf die Austrittsfläche zurückreflektiert. Je größer der Neigungswinkel ist, desto kleiner ist der Anteil der elektromagnetischen Strahlung, der von der Detektorfläche direkt zurück auf die Austrittsfläche des Austrittsendes der optischen Faser reflektiert werden kann.

[0015] In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung wird der Neigungswinkel so gewählt, dass die von der Detektorfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung auch nach ggf. mehreren weiteren Reflexionen beispielsweise an einer Innenwand des Gehäuses nicht oder erst nach einer möglichst hohen Anzahl von weiteren Reflexionen wieder auf die Detektorfläche und/oder auf die Austrittsfläche reflektiert wird.

[0016] Vorteilhafterweise weist die optische Faser innerhalb des Gehäuses eine Erstreckungsrichtung

auf, die mit der Detektorfläche einen Winkel einschließt, der ungleich 90° ist. Auch dadurch wird eine Rückreflexion der elektromagnetischen Strahlung von der Detektoroberfläche in die optische Faser weiter erschwert und reduziert und damit die Detektoreigenschaften weiter verbessert.

[0017] Vorteilhafterweise verfügt die Detektorfläche über eine Anti-Reflex-Beschichtung. Dadurch wird der Anteil der elektromagnetischen Strahlung, der von der Detektorfläche reflektiert wird, reduziert.

[0018] Vorteilhafterweise ist die Art und der Aufbau der Anti-Reflex-Beschichtung auf den Brechungsindex des Materials, das zwischen dem Faseraustrittsende und der Detektorfläche des Detektors angeordnet ist und auf den Brechungsindex des Materials der Detektorfläche angepasst. Durch derartige Anpassungen lassen sich die Reflexionen an den jeweiligen Grenzflächen weiter reduzieren.

[0019] Um eine möglichst diffuse Emission der elektromagnetischen Strahlung aus der optischen Faser zu erhalten, wird die Austrittsfläche vorteilhafterweise aufgeraut.

[0020] Insbesondere für den Fall, dass das Gehäuse mit zwei unterschiedlichen Materialien gefüllt ist, ist es von Vorteil, wenn in dem Bereich, der nicht direkt zwischen der Austrittsfläche der optischen Faser und der Detektorfläche liegt, beispielsweise Glasmehl dem zusätzlichen Material, insbesondere dem Epoxidharz, zugesetzt wird. Dadurch werden einerseits die oftmals hochempfindlichen Einzelteile der Detektoranordnung zu einer robusten Einheit verbunden und gleichzeitig die optische Faser auch gegen Zugbelastungen entlastet.

[0021] In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung weist die Erstreckungsrichtung der optischen Faser innerhalb des Gehäuses nicht nur mit der Detektorfläche einen Winkel auf, der ungleich 90° ist, sondern auch mit der Austrittsfläche des Austrittsendes. Gleichzeitig ist die Austrittsfläche gegenüber der Detektorfläche weiterhin geneigt. Auf diese Weise werden die bereits beschriebenen Vorteile der beiden Ausgestaltungen weiterhin verwirklicht und gleichzeitig erreicht, dass austretende elektromagnetische Strahlung, die das Austrittsende durch die Austrittsfläche verlässt, von der optischen Achse und der Erstreckungsrichtung der optischen Faser weggebrochen wird, sodass eine Rückreflexion weiter verringert wird. Insbesondere diese Brechung findet jedoch nur statt, wenn die optischen Brechungsindizes der optischen Faser und des Materials, das das Austrittsende umgibt, unterschiedlich sind.

[0022] Ein erfindungsgemäßes Spektroskop, insbesondere ein Gasanalysegerät, verfügt über wenigstens eine der hier beschriebenen Detektoranordnungen.

Damit lassen sich die parasitären Einflüsse aus anderen Teilen der Vorrichtung bestimmen, ohne dass weitere Störeinflüsse aus der Detektoranordnung das Messergebnis verfälschen würden. Mit Hilfe der beiliegenden Zeichnung wird nachfolgend ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung näher erläutert. Es zeigt

[0023] Fig. 1 – die schematische Schnittdarstellung durch eine Detektoranordnung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0024] Fig. 1 zeigt eine Detektoranordnung **1** gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Sie verfügt über einen Detektor **2**, der an einem Deckel **4** angeordnet ist. Der Detektor **2** ist über zwei Drähte **6** elektrisch kontaktiert. An seiner dem Deckel **4** abgewandten Seite verfügt der Detektor **2** über eine Detektorfläche **8**, auf die elektromagnetische Strahlung trifft.

[0025] Die Detektoranordnung **1** verfügt zudem über eine optische Faser **10**, die im gezeigten Ausführungsbeispiel einen Kern **12**, einen Mantel **14** sowie eine Umhüllung **16** umfasst.

[0026] Die optische Faser **10** ragt in ein Gehäuse **18**, das auch den Detektor **2** mit der Detektorfläche **8** umgibt. Am in Fig. 1 rechten Ende der optischen Faser **10** befindet sich ein Austrittsende **20** mit einer Austrittsfläche **22**. Das Austrittsende **20** mit der Austrittsfläche **22** sowie der Detektor **2** mit der Detektorfläche **8** sind vom Material **24** umgeben, das vorteilhafterweise ein auf den Brechungsindex des Kerns **12** der optischen Faser **10** angepasstes Epoxidharz ist. Der Rest des Gehäuses **18** ist mit einem Füllmaterial **26** ausgefüllt, dem beispielsweise Glasmehl als Verstärkung zugemischt ist und beispielsweise als Faserentlastung für die optische Faser **10** dient. Natürlich kann das Gehäuse **18** auch vollständig mit dem Material **24** ausgefüllt sein.

[0027] Man erkennt in Fig. 1, dass die Austrittsfläche **22** und die Detektorfläche **8** relativ zueinander geneigt ausgebildet sind. Dadurch werden Rückreflexionen der elektromagnetischen Strahlung von der Detektorfläche **8** zurück in die optische Faser **10** verringert. Die optische Faser **10** verfügt über eine Längserstreckungsrichtung, die wie in Fig. 1 dargestellt, mit der Detektorfläche **8** einen Winkel ungleich 90° einschließt. Gleichzeitig hat sich als vorteilhaft herausgestellt, wenn die Austrittsfläche **22** ebenfalls mit der Längserstreckung der optischen Faser **10** einen Winkel ungleich 90° einschließt. Dann kommt es zu der in Fig. 1 dargestellten Brechung der elektromagnetischen Strahlung weg von der optischen Achse und der Längserstreckungsrichtung der optischen Faser **10**.

[0028] Die Austrittsfläche **22** kann vorteilhafterweise aufgeraut sein, um eine diffuse Emission der elektromagnetischen Strahlung aus dem Austrittsende **20** der optischen Faser **10** zu erreichen. Dadurch wird erreicht, dass einerseits ein möglichst großer Bereich der Detektorflächen **8** verwendet wird, sodass es nicht oder weniger zu lokalen Sättigungen der Detektorfläche kommt. Gleichzeitig werden Interferenzen zwischen dem Austrittsende **20** bzw. der Austrittsfläche **22** und der Detektorfläche **8** wirkungsvoll unterdrückt und reduzieren somit prinzipbedingte Fehlerquellen.

[0029] Durch die in **Fig. 1** dargestellte Ausgestaltung wird zudem verhindert, dass durch ggf. vorhandene Leckagen und Diffusionspfade zwischen dem Mantel **14** und der Umhüllung **16** der optischen Faser **10** störende Gase ins Innere des Gehäuses **18** eindringen und so das Messergebnis verfälschen könnten.

Bezugszeichenliste

1	Detektoranordnung
2	Detektor
4	Deckel
6	Draht
8	Detektorfläche
10	optische Faser
12	Kern
14	Mantel
16	Umhüllung
18	Gehäuse
20	Austrittsende der Faser
22	Austrittsfläche der Faser
24	Material
26	Füllmaterial

Patentansprüche

1. Detektoranordnung **(1)** zum Leiten elektromagnetischer Strahlung aus einer optischen Faser **(10)** auf einen Detektor **(2)**, wobei ein Austrittsende **(20)** der optischen Faser **(10)** mit einer Austrittsfläche **(22)** und eine Detektorfläche **(8)** des Detektors **(2)** in einem gemeinsamen Gehäuse **(18)** angeordnet sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gehäuse **(18)** wenigstens so weit mit einem für elektromagnetische Strahlung einer gewünschten Wellenlänge transparenten, nicht-gasförmigen Material **(24)** gefüllt ist, dass elektromagnetische Strahlung, die aus der Austrittsfläche **(22)** des Austrittsendes **(20)** der optischen Faser **(10)** austritt, direkt in das Material **(24)** eintritt und von dem Material **(24)** direkt auf die Detektorfläche **(8)** fällt.

2. Detektoranordnung **(1)** nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Material **(24)** ein festes Material **(24)**, insbesondere ein Epoxidharz, ist.

3. Detektoranordnung **(1)** nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Material **(24)** einen optischen Brechungsindex aufweist, der zumindest bei der gewünschten Wellenlänge auf einen Brechungsindex der optischen Faser **(10)** angepasst ist, insbesondere um weniger als 5 %, bevorzugt weniger als 3 %, besonders bevorzugt weniger als 1 % von diesem abweicht.

4. Detektoranordnung **(1)** nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Teil des Gehäuses **(18)**, der nicht mit dem Material **(24)** gefüllt ist, mit einem Füllmaterial **(26)**, insbesondere einem Epoxidharz, gefüllt ist.

5. Detektoranordnung **(1)** nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gehäuse **(18)** mit dem Material **(24)** vollständig gefüllt, insbesondere mit diesem ausgegossen ist.

6. Detektoranordnung **(1)** nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Austrittsfläche **(22)** des Austrittsendes **(20)** relativ zu der Detektorfläche **(8)** geneigt angeordnet ist.

7. Detektoranordnung **(1)** nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Neigungswinkel, um den die Austrittsfläche **(22)** relativ zu der Detektorfläche **(8)** geneigt ist, wenigstens halb so groß, bevorzugt wenigstens genau so groß ist, wie ein Öffnungswinkel, der aus der Austrittsfläche **(22)** austretenden elektromagnetischen Strahlung.

8. Detektoranordnung **(1)** nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die optische Faser **(10)** innerhalb des Gehäuses **(18)** eine Erstreckungsrichtung aufweist, die mit der Detektorfläche **(8)** einen Winkel einschließt, der ungleich 90° ist.

9. Detektoranordnung **(1)** nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Detektorfläche **(8)** eine Anti-Reflex-Beschichtung aufweist.

10. Spektroskop, insbesondere Gasanalysegerät, mit wenigstens einer Detektoranordnung **(1)** nach einem der vorstehenden Ansprüche.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

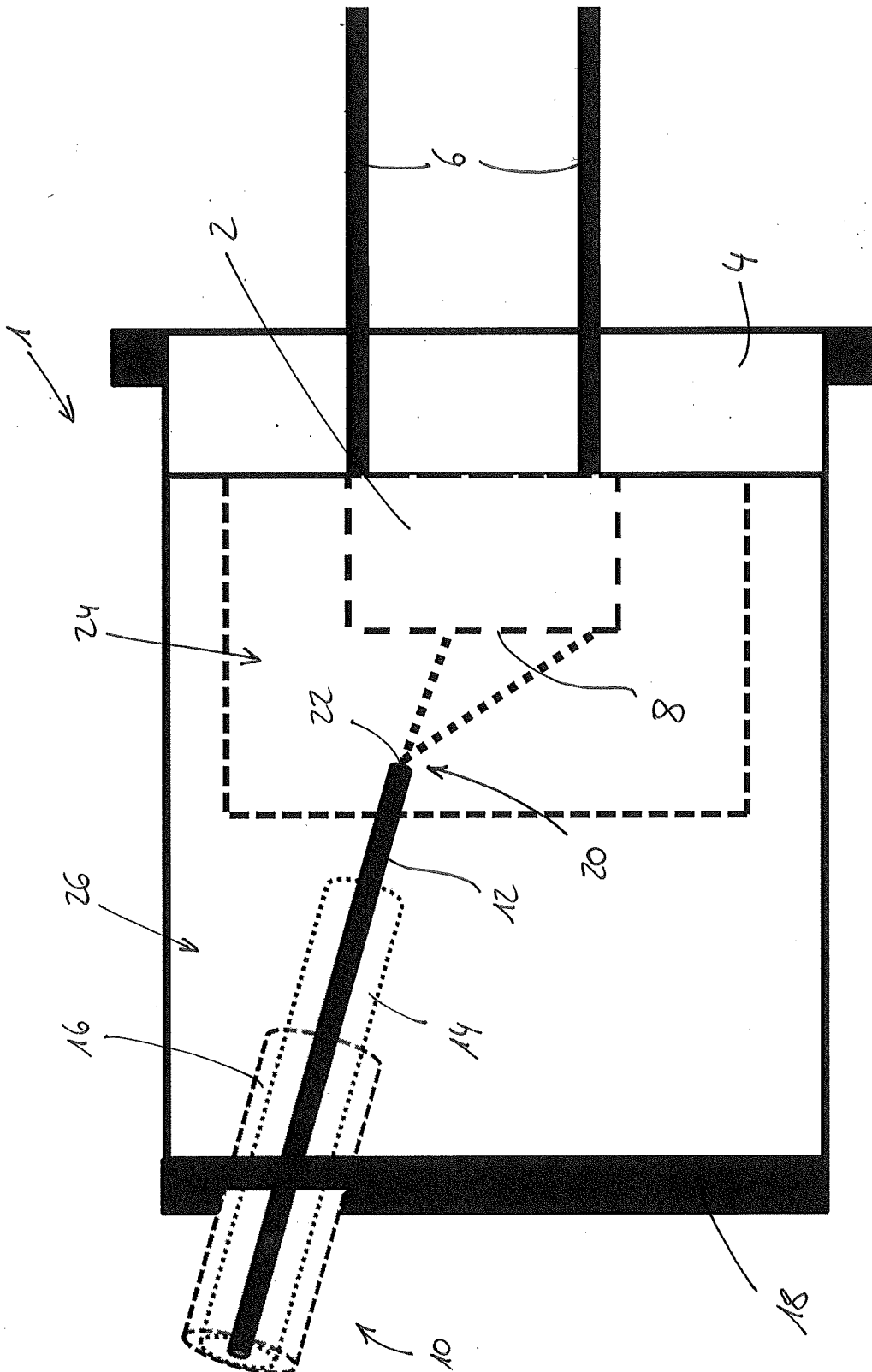


Fig. 1