



(10) **DE 10 2016 102 430 B3** 2017.08.17

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 102 430.9**  
(22) Anmeldetag: **11.02.2016**  
(43) Offenlegungstag: –  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **17.08.2017**

(51) Int Cl.: **G01N 21/03 (2006.01)**  
**G01N 21/31 (2006.01)**  
**G01N 21/59 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Bundesrepublik Deutschland, vertr. durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE**

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

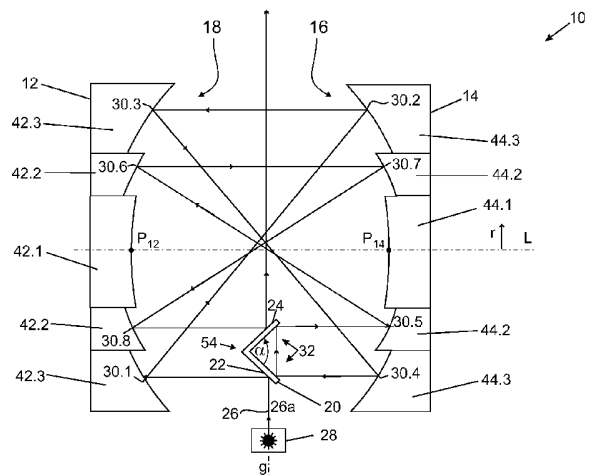
(72) Erfinder:  
**Rubin, Tom, 12163 Berlin, DE; Putzke, Stephan, Dr., 12205 Berlin, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**US 9 250 175 B1**  
**US 2011 / 0 164 251 A1**

(54) Bezeichnung: **Langwegzelle**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Langwegzelle (10), insbesondere Herriott-Zelle, mit einem ersten Spiegel (12) und einem zweiten Spiegel (14). Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass dadurch gekennzeichnet ist, dass der erste Spiegel (12) ein erstes Erstspiegel-Segment (42.1) und zumindest ein zweites Erstspiegel-Segment (42.2), das das erste Erstspiegel-Segment (42.1) radial umgibt, aufweist, wobei sich die Erstspiegel-Segmente (42) in ihren Krümmungen ( $R_{42.1,42.2}$ ) oder Brennweiten unterscheiden, der zweite Spiegel (14) ein erstes Zweitspiegel-Segment (44.1) und zumindest ein zweites Zweitspiegel-Segment (44.2), das das erste Zweitspiegel-Segment (44.1) radial umgibt, aufweist, wobei sich die Zweitspiegel-Segmente (44) in ihren Krümmungen ( $R_{44.1,44.2}$ ) oder Brennweiten unterscheiden, das erste Erstspiegel-Segment (42.1) und das erste Zweitspiegel-Segment (44.1) so einander zugeordnet sind, dass ein Lichtstrahl zwischen beiden hin- und zurückreflektiert wird und dass das zweite Erstspiegel-Segment (42.2) und das zweite Zweitspiegel-Segment (44.2) so einander zugeordnet sind, dass ein Lichtstrahl zwischen beiden hin- und zurückreflektiert wird.



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Langwegzelle gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1. Eine derartige Langwegzelle wird beispielsweise in der Spektroskopie verwendet, um einen Lichtstrahl auf einem möglichst langen Weg durch ein Probenvolumen zu schicken, sodass die Wechselwirkung zwischen dem Lichtstrahl und dem Material im Probenraum besonders intensiv ist.

**[0002]** Aus der US 9 250 175 B1 ist eine gattungsgemäße Langwegzelle bekannt, bei der einer der Spiegel aus einem ersten und einem zweiten Spiegelsegment besteht, wodurch die Anzahl an Reflexionen erhöht werden kann.

**[0003]** In der US 2011/0 164 251 A1 ist eine gattungsgemäße Langwegzelle beschrieben, bei der mittels eines Umlenkspiegels ein zweites Reflexionsmuster erzeugt wird.

**[0004]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine verbesserte Langwegzelle vorzuschlagen. Die Erfindung löst das Problem durch eine Langwegzelle mit den Merkmalen von Anspruch 1.

**[0005]** Eine derartige Langwegzelle hat den Vorteil, dass sie bei vorgegebenem Bauraum eine besonders lange Wegstrecke für den Lichtstrahl bereitstellt. Der Hintergrund ist, dass die Segmente so gebaut werden können, dass der Abstand in Umfangsrichtung von zwei benachbarten Auftreffpunkten im Wesentlichen nicht vom radialen Abstand des Auftreffpunkts (das heißt einer Radialkoordinate) abhängt. So können die Segmente so ausgebildet werden, dass die Auftreffpunkte eng benachbart liegen.

**[0006]** Die Abstände der Auftreffpunkte in Umfangsrichtung hängen nämlich bei gegebenem Spiegelabstand von der Krümmung des jeweiligen Spiegels am jeweiligen Auftreffpunkt des Lichtstrahls ab. Das führt dazu, dass bei Spiegeln mit konstanter Krümmung der Abstand in Umfangsrichtung von benachbarten Auftreffpunkten umso größer wird, je größer der radiale Abstand der Auftreffpunkte ist. Um die zur Verfügung stehende Spiegelfläche optimal auszunutzen, sollten die Auftreffpunkte möglichst dicht beieinander liegen. Das wird durch die sich unterscheidenden Krümmungen bei sphärisch gekrümmten Segmenten erreicht.

**[0007]** Ist zumindest eines der Segmente parabolisch gekrümmt, was eine bevorzugte Ausführungsform darstellt, unterscheiden sich die Segmente entweder dadurch, dass sie parabolisch oder sphärisch gekrümmt sind, oder – wenn zwei Segmente parabolisch gekrümmt sind – in ihren Brennweiten. Besonders günstig ist es, wenn alle Segmente parabolisch gekrümmt sind.

**[0008]** Der radiale Abstand ist der Abstand zu einer optischen Längsachse der Langwegzelle. Wird der Lichtstrahl – was eine bevorzugte Ausführungsform darstellt – zumindest drei Mal zwischen dem ersten Spiegel und dem zweiten Spiegel hin- und zurückreflektiert, so liegen die Auftreffpunkte des Lichtstrahls auf einem Segment vorzugsweise entlang eines Kreises, dessen Mittelpunkt auf der Längsachse liegt.

**[0009]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einem Spiegel eine Vorrichtung verstanden, die zumindest bezüglich einer Wellenlänge einen Reflexionsgrad von zumindest 0,95, insbesondere 0,98 aufweist.

**[0010]** Unter dem Merkmal, dass sich die Segmente in ihren Krümmungen bzw. Brennweiten unterscheiden, wird insbesondere verstanden, dass die Funktion, die die Krümmungen in den Segmenten in Abhängigkeit von der Längsachse beschreibt, an den Grenzen räumlich benachbarter Segmente unstetig ist. Alternativ sind die Segmente gebildet durch ring- oder teilringförmige und/oder sphärische Abschnitte, in denen sich die Krümmungen um zumindest 1 Promille unterscheiden. Unter dem Auftreffpunkt wird der Punkt der höchsten Intensität des Lichtstrahls verstanden. Der Lichtstrahl ist vorzugsweise ein Laserstrahl.

**[0011]** Bei sphärisch gekrümmten Spiegel-Segmenten ist vorzugsweise die Krümmung im radial weiter außen liegenden Segment größer als im radial innen benachbart liegenden Segment. Günstig ist es, wenn die Segmente in ihren Oberflächen nicht bündig ineinander übergehen. Vorzugsweise gilt für zumindest ein Segment, insbesondere für die Mehrheit der Segmente, dass das radial weiter innen liegende Segment am Übergang zwischen beiden Segmenten axial dichter an einem Mittelpunkt der Langwegzelle liegt. So ergibt sich eine kompakte Bauweise.

**[0012]** Bei parabolisch gekrümmten Spiegel-Segmenten unterscheiden sich die Brennweiten vorzugsweise um zumindest ein Promille, insbesondere um zumindest zwei Promille.

**[0013]** Ein Spiegel-Segment ist stets entweder sphärisch gekrümmt, plan oder parabolisch gekrümmt. Die Spiegel sind vorzugsweise so angeordnet, dass sie eine sich fortlaufend wiederholende Selbst-Zentrierung und Fokussierung des Lichtstrahls bewirken und so einer Aufweitung des Lichtstrahls entgegen wirken.

**[0014]** Günstig ist es, wenn zumindest ein Zweitspiegel-Segment plan ist. Plan bedeutet insbesondere ungekrümmt, wobei eine Oberfläche mit einer Krümmung mit einem Krümmungsradius von mehr als einem Kilometer als ungekrümmt betrachtet wird. Vorzugsweise ist die maximale Formabweichung einer

Oberfläche eines Spiegel-Segments in einem Auftreffpunkt kleiner als  $\lambda/2$ , wobei  $\lambda$  die zentrale Vakuum-Wellenlänge des verwendeten Lichtstrahls ist, also die mit der höchsten Intensität.

**[0015]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist der erste Spiegel ein drittes Erstspiegel-Segment, das das zweite Erstspiegel-Segment radial umgibt, auf, wobei sich das dritte Erstspiegel-Segment und das zweite Erstspiegel-Segment in ihren Krümmungen unterscheiden, wobei der zweite Spiegel zumindest ein drittes Zweitspiegel-Segment, das das zweite Zweitspiegel-Segment radial umgibt, aufweist, und wobei sich das dritte Zweitspiegel-Segment und das zweite Zweitspiegel-Segment in ihren Krümmungen unterscheiden. Das dritte Erstspiegel-Segment und das dritte Zweitspiegel-Segment sind so zueinander angeordnet, dass ein in die Langwegzelle eingekoppelter Lichtstrahl zwischen beiden hin- und zurückreflektiert wird. Da der Abstand in Umfangsrichtung auf einem Spiegel-Segment konstanter Krümmung mit zunehmendem radialen Abstand zunimmt, ist es günstig, wenn jeder Spiegel drei oder mehr Spiegel-Segmente aufweist, die zueinander so angeordnet sind, dass ein Lichtstrahl zwischen einander zugeordneten Segmenten hin- und zurückreflektiert wird. Im vorliegenden Fall ist das erste Erstspiegel-Segment dem ersten Zweitspiegel-Segment zugeordnet. Ganz allgemein ist das  $i$ -te Erstspiegel-Segment dem  $i$ -ten Zweitspiegel-Segment zugeordnet, sodass ein in die Langwegzelle eingekoppelter Lichtstrahl zwischen zugeordneten Segmenten hin- und her reflektiert wird.

**[0016]** Vorzugsweise umfasst die Langwegzelle ein Reflexionselement, das eine Einkoppelfläche zum Einkoppeln eines Lichtstrahls in die Langwegzelle und eine Auskoppelfläche zum Auskoppeln des Lichtstrahls aus der Langwegzelle aufweist, wobei die Auskoppelfläche unter einem Versatzwinkel von zumindest  $30^\circ$  zur Auskoppelfläche verläuft. Günstig ist es, wenn die Einkoppelfläche und die Auskoppelfläche nahezu rechtwinklig zueinander verlaufen. Vorzugsweise weicht der Winkel zwischen Einkoppelfläche und Auskoppelfläche um zumindest 10 Winkelsekunden von  $90^\circ$  ab.

**[0017]** Besonders bevorzugt besitzt das Reflexionselement eine erste Reflexionsfläche, die so angeordnet ist, dass ein von der Einkoppelfläche eingekoppelter Lichtstrahl zunächst von einem Spiegel reflektiert wird, insbesondere mehrfach zwischen Spiegelsegmenten hin- und her reflektiert wird, danach auf die erste Reflexionsfläche trifft und im Strahlengang nach der ersten Reflexionsfläche auf ein anderes Spiegel-Segment des gleichen Spiegels trifft. Auf diese Weise kann das Reflexionselement die Lichtstrahlen von einem Spiegel-Segment auf ein benachbartes umlenken.

**[0018]** Günstig ist es, wenn das Reflexionselement zudem eine zweite Reflexionsfläche aufweist, die den Lichtstrahl auf eines der beiden dritten Spiegel-Segmente leitet.

**[0019]** Das Einkoppelement ist vorzugsweise zwischen den Spiegeln angeordnet. Darunter wird insbesondere verstanden, dass das Einkoppelement in dem Raum aller Punkte angeordnet ist, die auf Strecken zwischen dem ersten Spiegel und dem zweiten Spiegel liegen.

**[0020]** Vorzugsweise ist bei transversaler Einkopplung das Reflexionselement so ausgebildet, dass ein von der Auskoppelfläche ausgekoppelter Lichtstrahl in Verlängerung eines mittels der Einkoppelfläche eingekoppelten Lichtstrahls verläuft. Hierunter ist insbesondere zu verstehen, dass ein Abstand zwischen einer ersten Geraden, entlang derer sich der eingekoppelte Lichtstrahl erstreckt, und einer zweiten Geraden, entlang derer sich der ausgekoppelte Lichtstrahl erstreckt, und der in einer Ebene gemessen wird, der senkrecht zur ersten Geraden verläuft und den Auftreffpunkt des eingekoppelten Lichtstrahls auf das Einkoppelement geht, höchstens  $750 \mu\text{m}$  beträgt. Alternativ oder zusätzlich ist der Winkelfehler zwischen der ersten Geraden und der zweiten Geraden kleiner als  $0,5^\circ$ .

**[0021]** Eine derartige Langwegzelle lässt sich, wie oben bereits beschrieben, besonders einfach in den Strahlengang einer Vorrichtung, beispielsweise einer Spektroskopievorrichtung, einsetzen.

**[0022]** Vorzugsweise ist die erste Reflexionsfläche also angeordnet zum Reflektieren des Lichtstrahls, der von einem Segment mit einer ersten Krümmung auf die Reflexionsfläche fällt, auf ein Segment mit einer von der ersten Krümmung verschiedenen zweiten Krümmung.

**[0023]** Vorzugsweise sind die nicht-planen Segmente so gekrümmt, dass ein Abstand in Umfangsrichtung zwischen zwei benachbarten Auftreffpunkten auf dem gleichen nicht-planen Segment sich nur zu höchstens 50% von einem Mittelwert aller Abstände in Umfangsrichtung zwischen zwei benachbarten Auftreffpunkten unterscheidet. In anderen Worten sind die Abstände in Umfangsrichtung zwischen zwei benachbarten Auftreffpunkten zumindest im Wesentlichen gleich. Vorzugsweise ist dieser Mittelwert aller Abstände höchstens zehnmal, insbesondere fünfmal, so groß wie ein mittlerer Strahldurchmesser der Lichtstrahlen in den Auftreffpunkten. Der Strahldurchmesser ist definiert als die Halbwertsbreite (full width at half maximum). So kann eine besonders lange Wegstrecke in der Langwegzelle realisiert werden. Der Strahldurchmesser kann sich ändern und bezieht sich immer auf die Stelle, an der das jeweilige Merkmal gelten soll.

[0024] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die Langwegzelle ein Halteelement, wobei der erste Spiegel und der zweite Spiegel zentral am Halteelement befestigt sind. Unter dem Merkmal, dass die Spiegel zentral am Halteelement befestigt sind, wird verstanden, dass jeder Spiegel einen Zentralbereich hat, der radial innen liegt und der mit dem Spiegel verbunden ist. In anderen Worten verlaufen die Lichtstrahlen radial außerhalb vom Halteelement. Günstig ist es, wenn eine Längsachse der Langwegzellen durch das Halteelement verläuft.

[0025] Günstig ist es, wenn zumindest eines der Erstsiegel-Segmente über zumindest 75%, insbesondere zumindest 90%, seiner Fläche plan ist, zumindest eines der Zweitspiegel-Segmente über zumindest 75%, insbesondere 90%, seiner Fläche plan ist, das plane Erstsiegel-Segment von einem gekrümmten Erstsiegel-Segment umgeben ist und das plane Zweitspiegel-Segment von einem gekrümmten Zweitspiegel-Segment umgeben ist. In diesem Fall wird der Strahl oft zwischen den planen Spiegel-Segmenten hin und her reflektiert, bis der Lichtstrahl auf das gekrümmte Spiegel-Segment trifft.

[0026] Es ist möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass das Erstsiegel-Segment und/oder das Zweitspiegel-Segment einen Wechselabschnitt aufweist. Dieser Wechselabschnitt ist relativ zu dem sonstigen Bereich des Spiegel-Segments so geneigt, dass ein auf den Wechselabschnitt auftreffender Lichtstrahl nicht auf das zugeordnete Spiegel-Segment reflektiert wird, sondern auf ein anderes Spiegel-Segment, beispielsweise ein radial weiter außen liegendes Spiegel-Segment.

[0027] Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, dass die Langwegzelle eine Umsetzvorrichtung aufweist, die außerhalb der konvexen Hülle der Spiegel angeordnet ist. Die konvexe Hülle ist die Menge aller derjenigen Punkte, die auf einer Strecke liegen, für die gilt, dass der Endpunkt der Geraden auf dem ersten Spiegel liegt und der zweite Endpunkt auf dem zweiten Spiegel. Vorzugsweise besitzt dazu zumindest einer der Spiegel ein Loch, sodass der Lichtstrahl auf die Umsetzvorrichtung auftreffen und von diesem durch das gleiche Loch oder ein zweites Loch auf den anderen Spiegel reflektiert werden kann. Dabei wird der Lichtstrahl nicht auf das Spiegel-Segment reflektiert, das demjenigen Spiegel-Segment zugeordnet ist, in dem das Loch ausgebildet ist, sondern auf ein anderes Spiegel-Segment, beispielsweise ein radial weiter außerhalb liegendes Spiegel-Segment.

[0028] Erfindungsgemäß ist zudem eine Spektroskopievorrichtung mit einer Langwegzelle, wie sie oben beschrieben ist.

[0029] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt:

[0030] Fig. 1 einen schematischen Querschnitt durch eine Langwegzelle gemäß einer Ausführungsform der Erfindung,

[0031] Fig. 2 eine schematische Ansicht, die den Pfad des Lichtstrahls illustriert,

[0032] Fig. 3 zeigt eine vierte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Langwegzelle und

[0033] Fig. 4 zeigt eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Langwegzelle, bei der der Wechsel zwischen zwei Segmenten durch ein tortenstückförmiges Teilstück des inneren Segmentes und ein anschließend vom Lichtstrahl getroffenes Teilstück des äußeren Segmentes realisiert wird.

[0034] Fig. 5 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Langwegzelle mit einer Umsetzvorrichtung zum Umsetzen des Lichtstrahls von einem Paar Spiegel-Segmente auf ein zweites Paar Spiegel-Segmente und

[0035] Fig. 6 zeigt in der Teilfigur 6a eine weitere erfindungsgemäße Langwegzelle, bei der das innere Paar einander zugeordneter Spiegel-Segmente plan ist mit einem ersten Teil des Strahlverlaufs, und das Teilbild 6b zeigt schematisch den vollständigen Strahlverlauf.

[0036] Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Langwegzelle **10** in Form einer Herriott-Zelle, die einen ersten Spiegel **12** und einen zweiten Spiegel **14** aufweist. Der erste Spiegel **12** besitzt eine erste Spiegelfläche **16**, der zweite Spiegel **14** besitzt eine zweite Spiegelfläche **18**, die dem ersten Spiegel **12** zugewandt ist. Der erste Spiegel **12** ist im vorliegenden Fall abschnittsweise sphärisch und hat einen ersten Krümmungsradius  $R_{1,2}(r)$ , der für jeden radialen Abstand  $r$  einem zweiten Krümmungsradius  $R_{1,4}(r)$  des zweiten Spiegels entspricht.

[0037] Es ist aber auch möglich, dass einer oder beide Spiegel ganz oder abschnittsweise Parabolspiegel sind. Auch in diesem Fall entspricht vorzugsweise der Krümmungsradius eines Spiegels für jeden radialen Abstand  $r$  dem zweiten Krümmungsradius  $R_{1,4}(r)$  des zweiten Spiegels.

[0038] Die Langwegzelle **10** umfasst ein Reflexionselement **54**, das eine Einkoppelfläche **22** und eine Auskoppelfläche **24** besitzt. Der Abschnitt des Reflexionselements **54**, an dem die Einkoppelfläche **22** und die Auskoppelfläche **24** ausgebildet sind, kann als Einkoppellelement **20** bezeichnet werden.

[0039] Fällt ein Lichtstrahl **26**, insbesondere ein Laserstrahl, der von einem Laser **28** ausgesandt wird, auf die Einkoppelfläche **22**, so reflektiert diese den Lichtstrahl **26** auf den ersten Spiegel **12**. Der Lichtstrahl **26** trifft daher zunächst in einem ersten Auftreffpunkt **30.1** auf den ersten Spiegel **12** auf. Danach reflektiert der erste Spiegel **12** den Lichtstrahl **26** auf einen zweiten Auftreffpunkt **30.2** auf dem zweiten Spiegel **14**, danach trifft der Lichtstrahl **26** auf einen dritten Auftreffpunkt **30.3** und einen vierten Auftreffpunkt **30.4**.

[0040] Der Lichtstrahl **26** ist in anderen Worten mehrfach von den Spiegeln **12**, **14** hin- und zurückreflektiert worden. Danach – oder nach weiteren Reflexionen an den Spiegeln – trifft der Lichtstrahl **26** auf eine erste Reflexionsfläche **32**, die den Lichtstrahl **26** auf einen fünften Auftreffpunkt **30.5** auf der zweiten Spiegelfläche **18** leitet. Im vorliegenden Fall erstreckt sich die erste Reflexionsfläche **32** entlang zweier zueinander senkrecht verlaufender Ebenen.

[0041] Nachdem der Laserstrahl die Auftreffpunkte **30.6**, **30.7** und **30.8** durchlaufen hat, trifft er auf die Auskoppelfläche **24**. Der entstehende ausfallende Lichtstrahl **26b**, der ein Abschnitt des Lichtstrahls **26** ist, verläuft in direkter Verlängerung des einfallenden Abschnitts **26a** des Lichtstrahls **26**. In anderen Worten existiert eine Gerade  $g$ , entlang derer sich sowohl der einfallende Lichtstrahl **26a** als auch der ausfallende Lichtstrahl **26b** erstrecken.

[0042] Es ist zu erkennen, dass die Auskoppelfläche **24** unter einem Versatzwinkel  $\alpha$  zur Einkoppelfläche **22** orientiert ist. Im vorliegenden Fall beträgt  $\alpha = 90^\circ$ , was eine mögliche Ausführungsform beim zweidimensionalen Strahlenverlauf darstellt. Besonders günstig ist es jedoch, wenn der Versatzwinkel beim üblicherweise auftretenden dreidimensionalen Strahlenverlauf um zumindest 10 Bogensekunden von  $90^\circ$  verschieden ist.

[0043] Die Langwegzelle **10** besitzt eine Längsachse  $L$ . Die Längsachse  $L$  verläuft durch die beiden Punkte  $P_{12}$ ,  $P_{14}$ , die sich dadurch auszeichnen, dass ein gedachter Lichtstrahl zwischen diesen beiden Punkten beständig hin- und her reflektiert würde.

[0044] In einem Kreiskoordinatensystem um die Längsachse  $L$  wird die Abstandskoordinate  $r$  von der Längsachse  $L$  aus gemessen. Die  $z$ -Koordinate in diesem Koordinatensystem kann grundsätzlich beliebig gewählt werden, vorzugsweise ist aber  $z = 0$  an dem Punkt der auf der Längsachse  $L$  liegt und der genau zwischen den Punkten  $P_{12}$  und  $P_{14}$  liegt.

[0045] Es sei darauf hingewiesen, dass **Fig. 1** lediglich eine schematische Seitenansicht der Langwegzelle **10** zeigt. Es ist möglich, dass die beiden Spiegel zwischen einander einen größeren Abstand haben.

[0046] Wie **Fig. 1** zeigt, besitzt der erste Spiegel **12** ein erstes Erstspiegel-Segment **42.1**, ein zweites Erstspiegel-Segment **42.2** und ein drittes Erstspiegel-Segment **42.3**. Das zweite Erstspiegel-Segment **42.2** umgibt das erste Erstspiegel-Segment **42.1** radial. Das dritte Erstspiegel-Segment **42.3** umgibt das zweite Erstspiegel-Segment **42.2** radial. Die Segmente **42.1**, **42.2**, **42.3** sind sphärisch gekrümmt und unterscheiden sich in ihren Krümmungen. So ist der Krümmungsradius  $R_{42.1}$  des ersten Erstspiegel-Segments **42.1** größer als der Krümmungsradius  $R_{42.2}$  des zweiten Erstspiegel-Segments **42.2**. Der Krümmungsradius  $R$  ist in der vorliegenden Ausführungsform umso kleiner, je größer der Abstand  $r$  des jeweiligen Segments von der Längsachse  $L$  ist. Es sind aber auch Ausführungsformen möglich, in denen der Krümmungsradius  $R$  zumindest nicht immer kleiner wird, je größer der Abstand  $r$  des jeweiligen Segments von der Längsachse  $L$  ist.

[0047] Jedem Erstspiegel-Segment **42.i** ist ein Zweitspiegel-Segment **44.i** ( $i = 1, 2, \dots$ ) zugeordnet. Der Lichtstrahl **26** wird in der vorliegenden Ausführungsform solange zwischen dem Paar aus Erstspiegel-Segment **42.i** und zugeordnetem Zweitspiegel-Segment **44.i** hin- und her reflektiert, bis es auf eine Reflexionsfläche oder die Auskoppelfläche **24** trifft.

[0048] Der einfallende Lichtstrahl **26a** trifft zunächst auf die Einkoppelfläche **22** und dann nach Durchlaufen der Auftreffpunkte **30.1**, **30.2**, **30.3** und **30.4** auf die erste Reflexionsfläche **32**. Im Strahlengang nach der ersten Reflexionsfläche **32** trifft der Lichtstrahl **26** dann im fünften Auftreffpunkt **30.5** auf den ersten Spiegel **12**. Nach Durchlaufen der Auftreffpunkte **30.6**, **30.7** und **30.8** trifft der Lichtstrahl **26** auf die Auskoppelfläche **24** und wird aus der Langwegzelle **10** ausgekoppelt. Selbstverständlich ist es möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass das Einkoppelement **20** weitere Reflexionsflächen aufweist. In diesem Fall ist es vorteilhaft, wenn der erste Spiegel **12** und/oder der zweite Spiegel **14** zusätzliche Segmente aufweist.

[0049] **Fig. 1** zeigt, dass die erste Reflexionsfläche **32** dazu dient, den Lichtstrahl von einem Segment auf das nächste umzusetzen. Die Segmente sind – was eine bevorzugte Ausführungsform darstellt – so ausgebildet, dass der Lichtstrahl **26** stets zwischen dem gleichen Paar einander zugeordneter Spiegel-Segmente aus Erstspiegel-Segment und Zweitspiegel-Segment hin- und zurückreflektiert wird, bis er auf eine Reflexionsfläche trifft. Danach läuft der Lichtstrahl ausschließlich auf einem zweiten Paar aus Erstspiegel-Segment und Zweitspiegel-Segment, bis er entweder auf die Auskoppelfläche oder eine weitere Reflexionsfläche trifft.

[0050] **Fig. 2** zeigt schematisch den Strahlweg des Lichtstrahls **26**, den dieser zwischen den Segmen-

ten **42.3** und **44.3** zurücklegt. Ein Abstand  $a$  in Umfangsrichtung zwischen benachbarten Auftreffpunkten, beispielsweise zwischen den Auftreffpunkten **30.39.7** oder **30.9** und **30.1**, ist in guter Näherung konstant. Ein radialer Abstand  $r$  ist für jeden Auftreffpunkt im Wesentlichen gleich. In anderen Worten gilt  $r_{30.7} = r_{30.9}$ , wobei zwei Abstände als im Wesentlichen gleich betrachtet wird, wenn sich die Abstände um weniger als 25% unterscheiden.

[0051] Für ein radial weiter innen liegendes Segment, im vorliegenden Fall für das Erstsiegel-Segment **42.2** und das Zweitspiegel-Segment **44.2**, ist der Abstand  $a$  in Umfangsrichtung zwischen benachbarten Auftreffpunkten ebenfalls vorzugsweise im Wesentlichen gleich.

[0052] Die Langwegzelle **10** ist so ausgebildet, dass der Abstand  $a$  in Umfangsrichtung zweier benachbarter Auftreffpunkte größer ist als die doppelte Halbwertsbreite des Lichtstrahls. Vorzugsweise ist dieser Abstand zudem kleiner als das 20-fache, insbesondere als das 10-fache, der Halbwertsbreite. Um diese Randbedingungen unabhängig vom Segment einhalten zu können, unterscheiden sich die Krümmungen der einzelnen Segmente **42.e**, **44.i** für unterschiedliche  $i$ .

[0053] Fig. 2 zeigt, dass die Langwegzelle **10** eine Lichtleitfaser **56** aufweisen kann, bei der der Lichtstrahl **26** vom Laser **28** auf das Einkoppelement **20** zugeführt wird. Günstig ist es, wenn die Lichtleitfaser **56** in einem Auskoppelement **58** endet.

[0054] Fig. 3 zeigt eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Langwegzelle **10**, bei der die Spiegel **12**, **14** wie in Fig. 1 gezeigt aufgebaut sind. Die Langwegzelle **10** umfasst ein Halteelement **46**, an denen die beiden Spiegel **12**, **14** zentral befestigt sind. Es ist zu erkennen, dass der Lichtstrahl **26** durch eine Öffnung **48** im Spiegel **12** in die Langwegzelle **10** eintritt und durch die gleiche Öffnung **48** wieder austritt.

[0055] Eine unabhängige Erfindung ist zudem eine Spektroskopievorrichtung **50**, die den Laser **28**, die Langwegzelle **10** und eine Lichtstrahl-Analysevorrichtung **52** aufweist.

[0056] Fig. 3 zeigt zudem schematisch das Reflexionselement **54**, an dem die Reflexionsflächen **32** und **34** ausgebildet sind. Bei den Ausführungsformen gemäß der Fig. 1 und Fig. 2 ist das Reflexionselement Teil des Einkoppelements **20** (vgl. Fig. 1). Der Übersichtlichkeit halber sind in Fig. 3 die Strahlwege nach Reflexion an der ersten Reflexionsfläche **32** und der zweiten Reflexionsfläche **34** nur schematisch eingezeichnet. Der Lichtstrahl **26** wird in diesem Fall beispielsweise durch ein Loch **59** im Halteelement **46** ausgekoppelt. Alternativ kann die Detektionsvorrich-

tung **52** auch auf dem Halteelement **46** befestigt oder darin enthalten sein.

[0057] Fig. 4 zeigt eine zweite Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Langwegzelle **10**, bei der der Lichtstrahl **26** einen kompletten Umlauf vollführt. Es ist alternativ möglich, dass der Lichtstrahl **26** durch die Öffnung **48** in die Langwegzelle **10** eingekoppelt wird. Das erste Erstsiegel-Segment **42.1** ist gebildet aus einem Wechselabschnitt **60** und einer Spiegelfläche **62**. Die Spiegelfläche **62** ist sphärisch gekrümmt. Das zugeordnete erste Zweitspiegel-Segment **44.1** ist ebenfalls sphärisch gekrümmt und parallel zur Spiegelfläche **62** ausgerichtet. Licht, das auf die Spiegelfläche **62** trifft, wird auf das erste Zweitspiegel-Segment **44.1** reflektiert. Trifft der Lichtstrahl **26** auf den Wechselabschnitt **60**, so wird er auf das zweite Zweitspiegel-Segment **44.2** reflektiert. Vor dort aus wird es auf das zweite Erstsiegel-Segment **42.2** reflektiert. Durch eine zweite Öffnung **64** wird der Lichtstrahl **26** aus der Langwegzelle **10** wieder ausgekoppelt.

[0058] Alternativ ist möglich, dass ein Abschnitt eines Spiegel-Segments, ähnlich wie der Wechselabschnitt **60**, so ausgebildet ist, dass der Lichtstrahl **26** seitlich eingekoppelt werden kann.

[0059] Fig. 5 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Langwegzelle **10**, die eine Umsetzvorrichtung **66** aufweist. Diese Umsetzvorrichtung ist außerhalb des Volumens zwischen den Spiegeln **12**, **14** angeordnet und reflektiert den Lichtstrahl von einem Erstsiegel-Segment auf ein anderes. Die Zahlen benachbart zu den Auftreffpunkten nummerieren die Auftreffpunkte durch, sodass der Strahlverlauf leichter verfolgt werden kann. Es ist zu erkennen, dass der Lichtstrahl **26** durch die Öffnung **48** eingekoppelt und durch die zweite Öffnung **64** ausgekoppelt wird.

[0060] Fig. 6 zeigt in den Teilfiguren 6a und 6b schematisch den Strahlverlauf für eine Langwegzelle **10**, bei der das erste Erstsiegel-Segment **42.1** und das erste Zweitspiegel-Segment **44.1** plan sind und das zweite Erstsiegel-Segment **42.2** und das zweite Zweitspiegel-Segment **44.2** sphärisch gekrümmt sind.

[0061] Fig. 6a zeigt den Fall, dass der Abstand der beiden Spiegel **12**, **14** so groß ist, dass der Strahlengang der einer Herriott-Zelle entspricht.

[0062] Fig. 6b zeigt den Strahlverlauf, wenn der Abstand der beiden Spiegel **12**, **14** so klein ist (hier: ein Drittel des Abstands gemäß Fig. 6a), dass deutlich mehr Reflexionen erfolgen. Die Positionen der Auftreffpunkte auf **44.1** entsprechen den Strahlpositionen im Querschnitt bei  $z = -1/6 D$  (Spiegelabstand aus Fig. 6a). Die Positionen der Auftreffpunkte auf **42.1** entsprechen den Strahlpositionen im Querschnitt bei

$z = +1/6$  D. Die Anzahl der Reflektionen auf den inneren planen Segmenten ist in diesem Fall doppelt so groß wie die auf den äußeren gekrümmten Segmenten. Schiebt man die Spiegel weiter zusammen, so dass der Abstand gleich  $D/(2N + 1)$  ist, wobei N eine natürlich Zahl ist, so ist die Anzahl der Reflektionen auf den inneren planen Segmenten  $2N$  mal größer als auf den äußeren gekrümmten. So ließen sich beispielsweise 100 Reflektionen auf dem äußeren Segment realisieren und bei einem dreizehntel des Spiegelabstandes berechnet für die gewöhnliche Herriott-Zelle oder analog dem dreizehnfachen Krümmungsradius der Spiegel erhielte man  $12 \times 100 = 1200$  Reflektionen auf den planen Spiegeln und somit 1300 Reflektionen insgesamt. Bei einem Spiegelabstand von nur etwa 77 cm erreicht man so eine optische Weglänge von über einem Kilometer, bei gleichzeitiger Erhaltung der Strahleigenschaften und Robustheit wie sie für die gewöhnliche Herriott-Zelle üblich sind.

#### Bezugszeichenliste

10	Langwegzelle
12	erster Spiegel
14	zweiter Spiegel
16	erste Spiegelfläche
18	zweite Spiegelfläche
20	Einkoppelement
22	Einkoppefläche
24	Auskoppefläche
26	Lichtstrahl
26a	einfallender Lichtstrahl
26b	ausfallender Lichtstrahl
28	Laser
30	Auftreffpunkt
32	erste Reflexionsfläche
34	zweite Reflexionsfläche
36	dritte Reflexionsfläche
38	vierte Reflexionsfläche
40	fünfte Reflexionsfläche
42	Erstspiegel-Segment
44	Zweitspiegel-Segment
46	Halteelement
48	Öffnung
50	Spektroskopievorrichtung
52	Lichtstrahl-Analysevorrichtung
54	Reflexionselement
56	Lichtleitfaser
58	Auskoppelement
60	Wechselabschnitt
62	Spiegelfläche
64	Öffnung
66	Umsetzvorrichtung
$\alpha$	Versatzwinkel
a	Abstand
g	Gerade

L	Längsachse
r	Abstandskordinate
R	Krümmungsradius
D	Spiegelabstand Ausgangswert

#### Patentansprüche

- Langwegzelle (10), insbesondere Herriott-Zelle, mit
  - einem ersten Spiegel (12) und
  - einem zweiten Spiegel (14),  
**dadurch gekennzeichnet**, dass
  - der erste Spiegel (12)
    - ein erstes Erstspiegel-Segment (42.1) und
    - zumindest ein zweites Erstspiegel-Segment (42.2), das das erste Erstspiegel-Segment (42.1) radial umgibt, aufweist,
    - wobei sich die Erstspiegel-Segmente (42) in ihren Krümmungen ( $R_{42.1}$ ,  $R_{42.2}$ ) oder Brennweiten unterscheiden,
  - der zweite Spiegel (14)
    - ein erstes Zweitspiegel-Segment (44.1) und
    - zumindest ein zweites Zweitspiegel-Segment (44.2), das das erste Zweitspiegel-Segment (44.1) radial umgibt, aufweist,
    - wobei sich die Zweitspiegel-Segmente (44) in ihren Krümmungen ( $R_{42.1}$ ,  $R_{42.2}$ ) oder Brennweiten unterscheiden,
  - das erste Erstspiegel-Segment (42.1) und das erste Zweitspiegel-Segment (44.1) so einander zugeordnet sind, dass ein Lichtstrahl zwischen beiden hin- und zurückreflektiert wird und dass
  - das zweite Erstspiegel-Segment (42.2) und das zweite Zweitspiegel-Segment (44.2) so einander zugeordnet sind, dass ein Lichtstrahl zwischen beiden hin- und zurückreflektiert wird.
- Langwegzelle (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass
  - der erste Spiegel (12)
    - ein drittes Erstspiegel-Segment (42.3), das das zweite Erstspiegel-Segment (42.2) radial umgibt, aufweist,
    - wobei sich das dritte Erstspiegel-Segment (42.4) und das zweite Erstspiegel-Segment (42.2) in ihren Krümmungen ( $R_{42.3}$ ,  $R_{42.2}$ ) oder Brennweiten unterscheiden,
  - der zweite Spiegel (14)
    - zumindest ein drittes Zweitspiegel-Segment (44.3), das das zweite Zweitspiegel-Segment (44.2) radial umgibt, aufweist,
    - sich das dritte Zweitspiegel-Segment (44.3) und das zweite Zweitspiegel-Segment (44.2) in ihren Krümmungen ( $R_{44.3}$ ,  $R_{44.2}$ ) oder Brennweiten unterscheiden, und dass
  - das dritte Erstspiegel-Segment (42.3) und das dritte Zweitspiegel-Segment (44.3) so einander zugeordnet sind, dass ein Lichtstrahl zwischen beiden hin- und zurückreflektiert wird.

3. Langwegzelle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Reflexionselement (54), das

- eine Einkopffläche (22) zum Einkoppeln eines Lichtstrahls (26) in die Langwegzelle (10) und
- eine Auskopffläche (24) zum Auskoppeln des Lichtstrahls (26) aus der Langwegzelle (10) aufweist,
- wobei die Auskopffläche (24) unter einem Versatzwinkel ( $\alpha$ ) von zumindest  $30^\circ$  zur Einkopffläche (22) verläuft.

4. Langwegzelle (10) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Reflexionselement (54), eine erste Reflexionsfläche (32) aufweist, die so angeordnet ist, dass ein von der Einkopffläche (22) eingekoppelter Lichtstrahl (26)

- zunächst von zumindest einem Spiegel-Segment (44.3) reflektiert wird, insbesondere mehrfach zwischen Spiegel-Segmenten (42.3, 44.3) hin- und zurückreflektiert wird,
- danach auf die erste Reflexionsfläche (32) trifft und
- im Strahlengang nach der ersten Reflexionsfläche (32) auf ein anderes Spiegel-Segment (42.2) des gleichen Spiegels trifft.

5. Langwegzelle (10) nach den Ansprüchen 2 und 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Reflexionselement (54) eine zweite Reflexionsfläche (34) aufweist, die so relativ zur Einkopffläche (22) angeordnet ist, dass ein von der Einkopffläche (22) eingekoppelter Lichtstrahl (26), der von der ersten Reflexionsfläche (32) auf ein Spiegel-Segment reflektiert wurde, auf ein Spiegel-Segment reflektiert wird, auf das er im vorhergehenden Strahlverlauf noch nicht getroffen ist.

6. Langwegzelle (10) nach einem der Ansprüche 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Reflexionsfläche (32) angeordnet ist zum Reflektieren eines Lichtstrahls (26), der von einem Spiegel-Segment mit einer ersten Krümmung ( $R_{42.1}$ ) oder ersten Brennweite auf die Reflexionsfläche (32) fällt, auf ein Segment mit einer von der ersten Krümmung ( $R_{42.1}$ ) verschiedenen zweiten Krümmung ( $R_{42.2}$ ) oder Brennweite.

7. Langwegzelle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- zumindest eines der Erstsiegel-Segmente (42.1) über zumindest 75%, insbesondere zumindest 90%, seiner Fläche plan ist,
- zumindest eines der Zweitspiegel-Segmente (44.1) über zumindest 75%, insbesondere zumindest 90%, seiner Fläche plan ist,
- das plane Erstsiegel-Segment (42.1) von einem gekrümmten Erstsiegel-Segment (42.2) umgeben ist und
- das plane Zweitspiegel-Segment (44.1) von einem gekrümmten Zweitspiegel-Segment (44.2) umgeben ist.

8. Langwegzelle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

- ein Halteelement (46),
- wobei der erste Spiegel (12) und der zweite Spiegel (14) zentral am Halteelement (46) befestigt sind.

9. Langwegzelle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch zumindest einen dritten, planen Spiegel, der so angeordnet ist, dass ein Lichtstrahl (26) alle Spiegel trifft, bevor er die Langwegzelle (10) verlässt.

10. Langwegzelle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Lichtleitfaser (56), die angeordnet ist zum Leiten des Lichtstrahls (26) und die so angeordnet ist, dass der Lichtstrahl (26) in die Langwegzelle (10) einkoppelbar ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen



Anhängende Zeichnungen

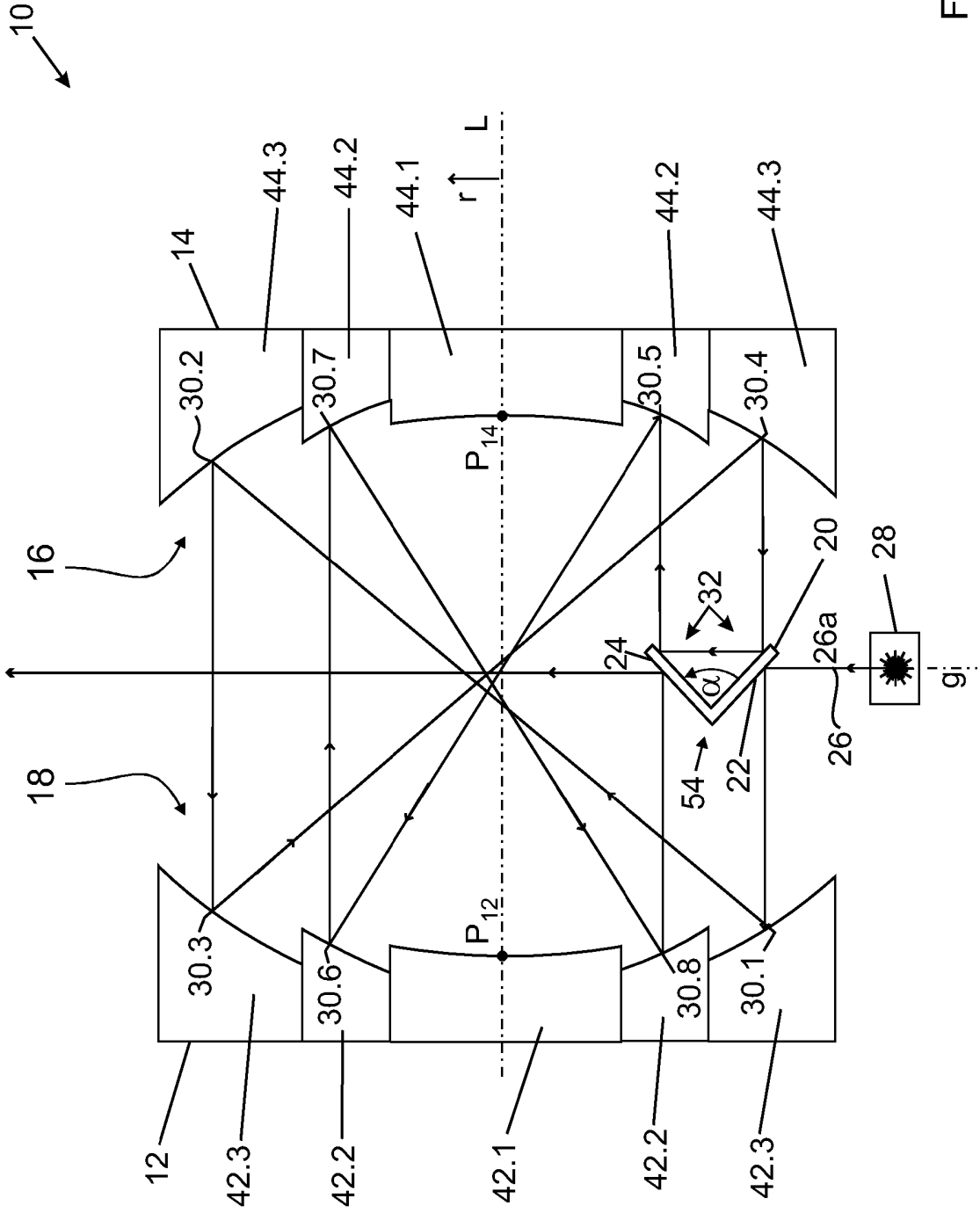


Fig. 1

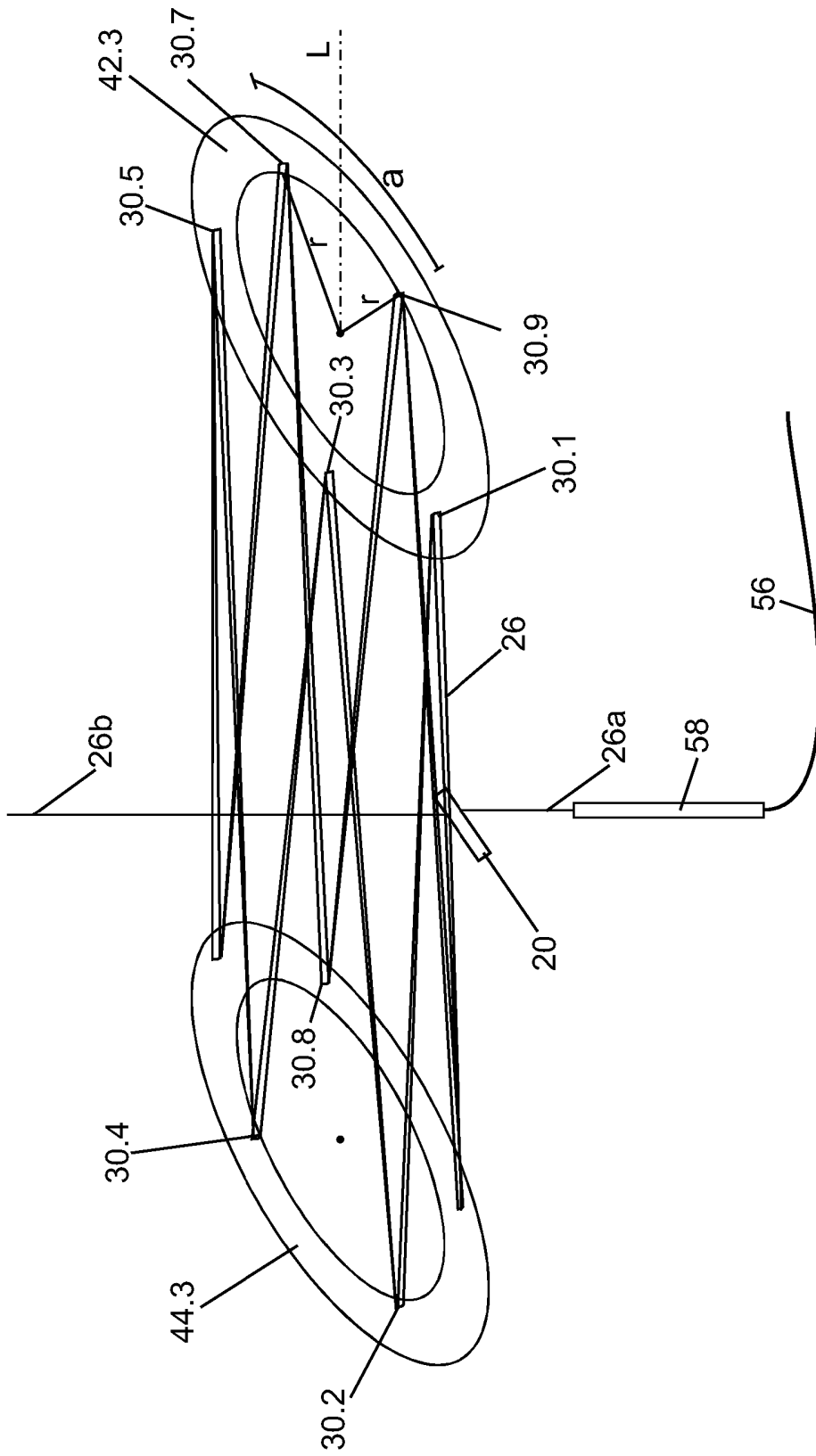


Fig. 2

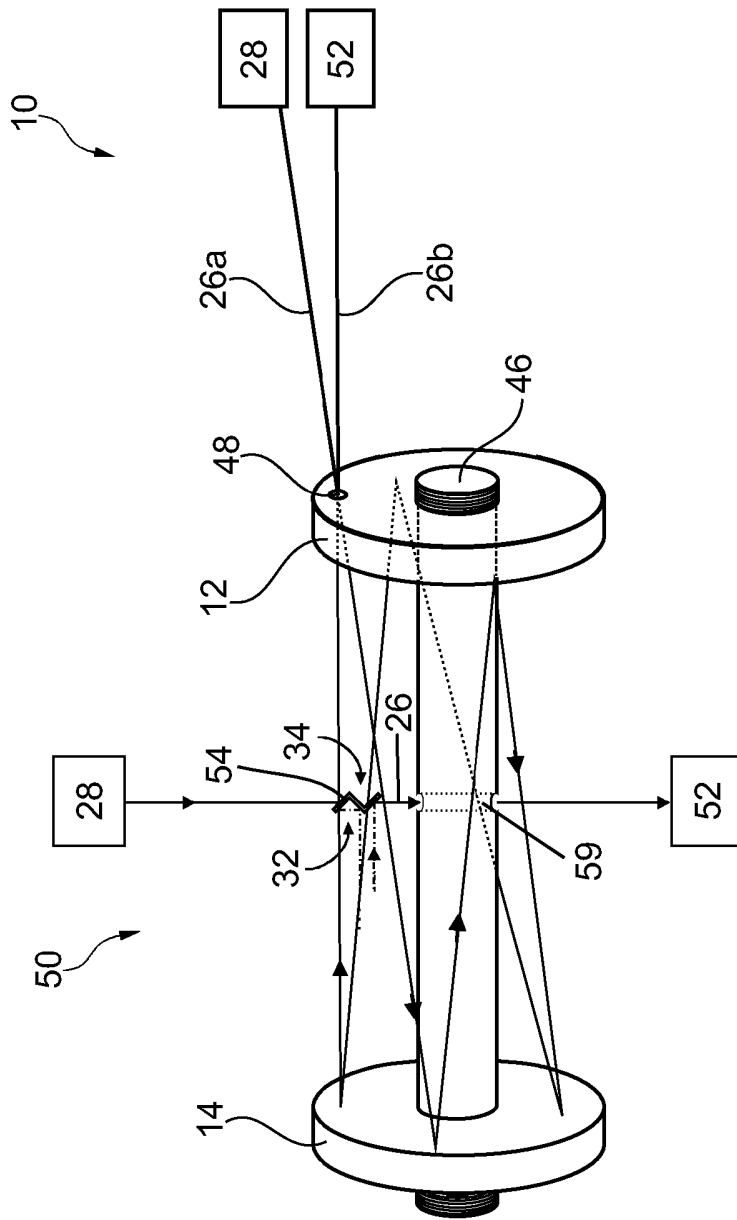


Fig. 3

Bsp. Wechsel der Ringsegmente ohne Koppellemente oder Löcher

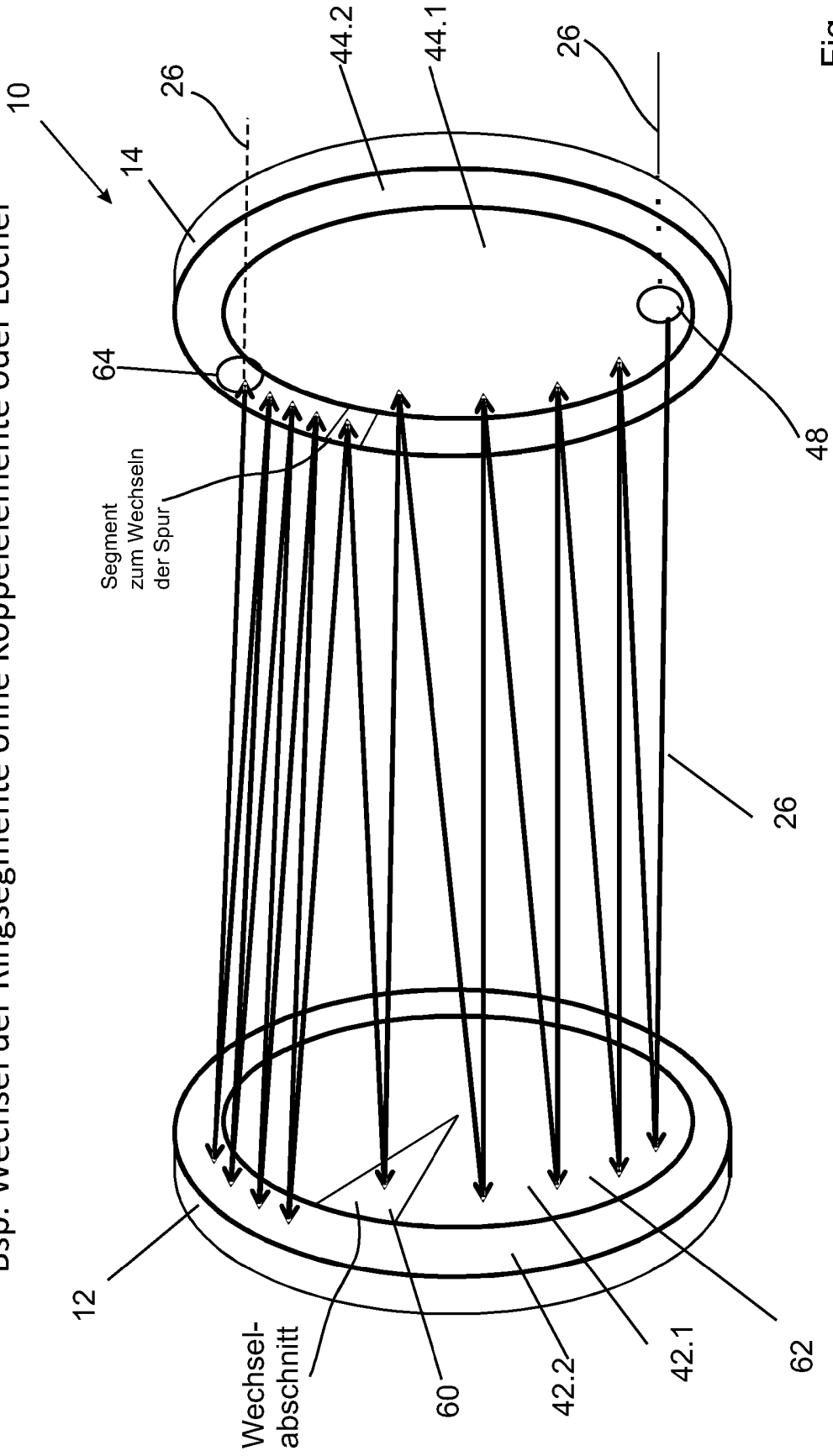


Fig. 4

Bsp. Wechsel der Ringsegmente durch Löcher

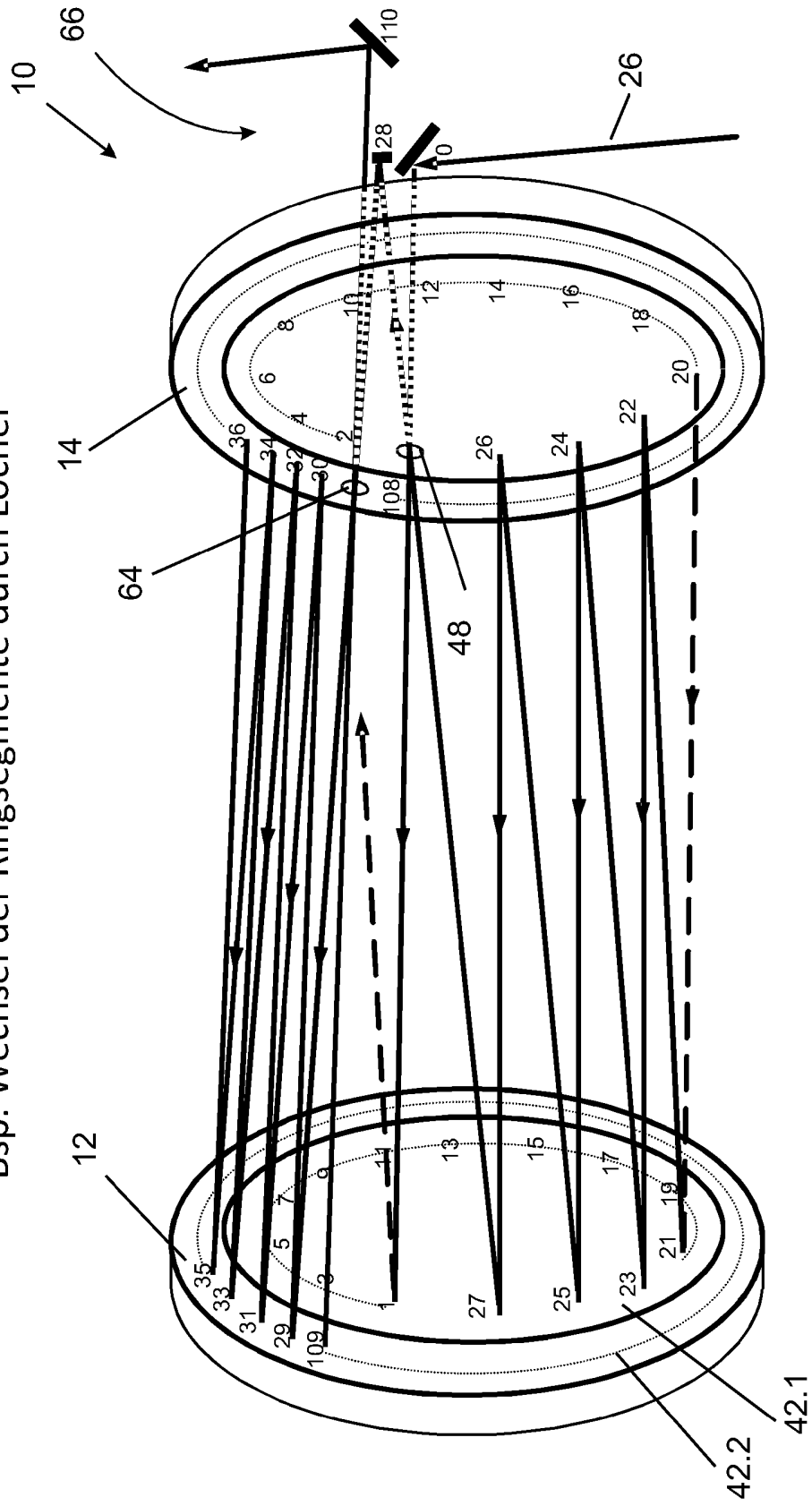


Fig. 5

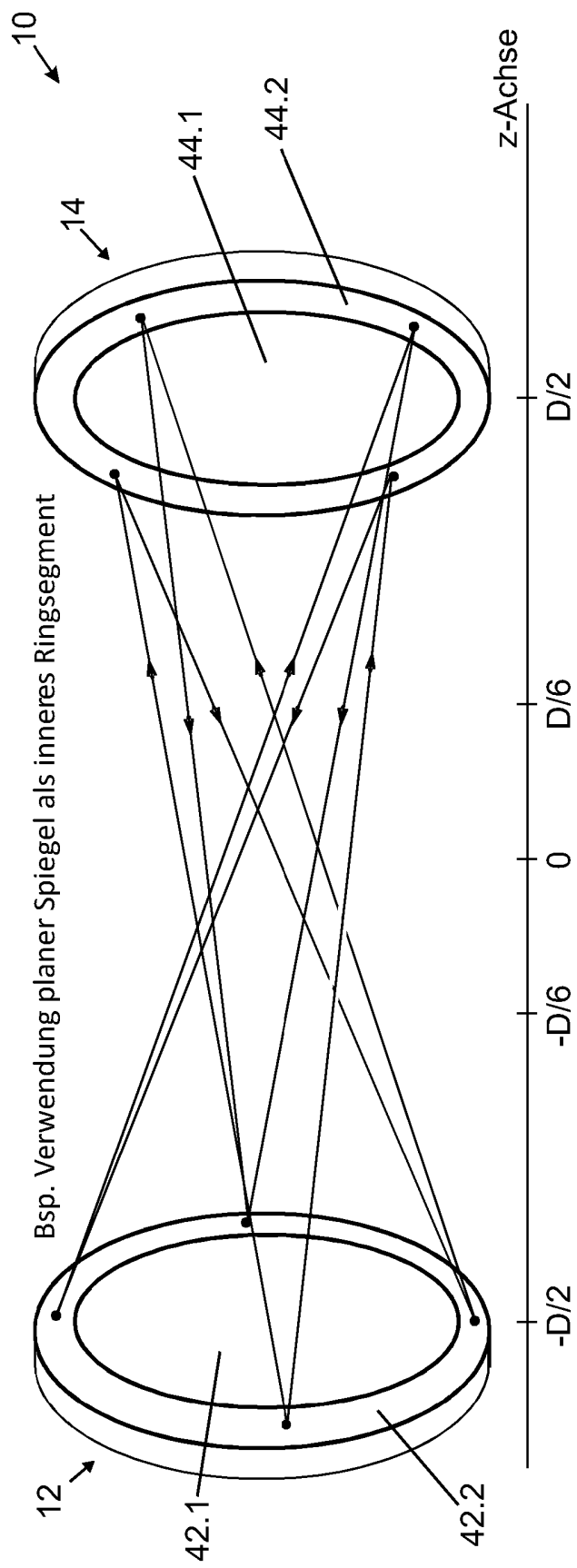


Fig. 6a

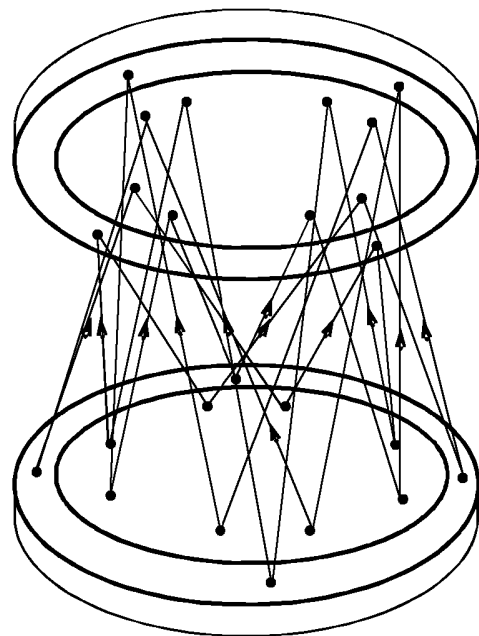


Fig. 6b

Fig. 6