



(10) **DE 10 2009 015 507 B4** 2010.12.23

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 015 507.4**

(22) Anmeldetag: **02.04.2009**

(43) Offenlegungstag: **21.10.2010**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **23.12.2010**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01B 11/26** (2006.01)

Innerhalb von drei 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.d.d.  
Bundesministerium für Wirtschaft und  
Technologie, d.vertr.d.d. Präsidenten der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116  
Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:

**GRAMM, LINS & PARTNER GbR, 38122  
Braunschweig**

(72) Erfinder:

**Geckeler, Ralf, Dr., 38112 Braunschweig, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

<b>DE</b>	<b>199 26 546</b>	<b>C2</b>
<b>DE</b>	<b>36 43 723</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>67 41 364</b>	<b>B2</b>
<b>US</b>	<b>37 90 284</b>	<b>A</b>
<b>JP</b>	<b>09-0 54 102</b>	<b>AA</b>

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Messen eines Rollwinkels und Rollwinkelmessvorrichtung**

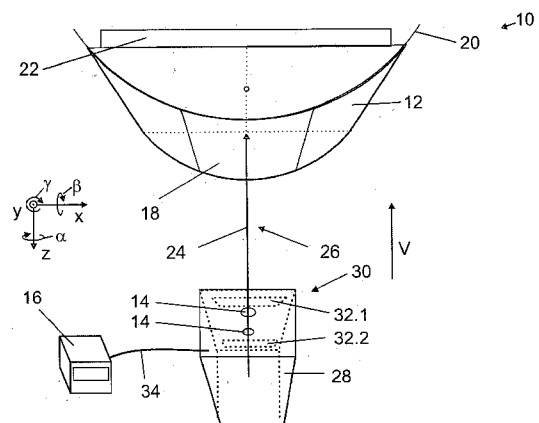
(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Messen eines Rollwinkels ( $\alpha$ ), mit den Schritten

(a) Richten eines ersten Lichtstrahls (24) auf einen ersten Ort (36) eines teilzylinderförmigen Abschnitts (18) eines Reflektors (12), so dass ein erster Reflexions-Lichtstrahl (38) entsteht, der unter einem ersten Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) verläuft,

(b) Richten zumindest eines zweiten Lichtstrahls (26) auf einen vom ersten Ort (36) verschiedenen zweiten Ort (40) des teilzylinderförmigen Abschnitts (18), so dass ein zweiter Reflexions-Lichtstrahl (42) entsteht, der unter einem zweiten Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verläuft,

(c) Bewegen des Reflektors (12) entlang einer Linearführung (44) mit einer Führungsfläche, wobei der erste Lichtstrahl (24) und der zweite Lichtstrahl (26) so auf den Reflektor (12) gerichtet werden, dass eine Veränderung des Rollwinkels ( $\alpha$ ) dazu führt, dass sich der erste Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) vergrößert und sich der zweite Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verkleinert,

(d) Messen zumindest einer Größe aus der eine Änderung des ersten Reflexionswinkels ( $\lambda_1$ ) und des zweiten Reflexionswinkels ( $\lambda_2$ ) herleitbar...



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen eines Rollwinkels. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung eine Rollwinkelmessvorrichtung.

**[0002]** Der Rollwinkel muss beispielsweise bei Werkzeugmaschinen gemessen werden und gibt eine Verdrehung einer Führung um die Verschieberichtung an.

**[0003]** Aus der DE 199 26 546 C2 ist ein Verfahren bekannt, bei dem ein Lichtstrahl aus linear polarisiertem Licht von einer feststehenden Lichtquelle auf das zu bewegendende Objekt gerichtet wird. Am zu bewegendenden Objekt ist ein Analysator angeordnet, der die Intensität des Lichtstrahls in einer vorgegebenen Polarisationsrichtung misst. Ändert sich der Rollwinkel, so ändert sich der Winkel zwischen Polarisator und Analysator und die vom Detektor erfasste Intensität verändert sich ebenfalls. Auf diese Weise kann der Rollwinkel gemessen werden. Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass dies relativ aufwändig ist und zur Durchführung besonders qualifiziertes Personal erfordert.

**[0004]** Aus der JP 09 054 102 AA sind eine Rollwinkelmessvorrichtung für ein Reibkraftmikroskop und ein zugehöriges Kalibrierverfahren bekannt, bei dem zwei Lichtstrahlen auf eine verspiegelte Zylindermantelfläche reflektiert werden. Aus der Differenz der Reflexionswinkel wird auf den Rollwinkel geschlossen.

**[0005]** Aus der DE 36 43 723 A1 sind ein Verfahren und eine Anordnung zur optischen Messung des Rollwinkels eines bewegten Maschinenteils bekannt. In der Druckschrift beschrieben wird das Projizieren einer vollständigen Ebene auf einen verspiegelten Zylinder, so dass in einem einzigen Aufbau die Rollwinkelmessung in zueinander senkrechten Verfahrenrichtungen möglich. Nachteilig hieran ist der hohe apparative Aufwand. Durch die Notwendigkeit einer Lichtebene ist zudem die Messgenauigkeit begrenzt.

**[0006]** Aus der US 6,741,364 B2 ist ein Verfahren zum Bestimmen des Rollwinkels zwischen zwei relativ zueinander beweglichen Objekten bekannt, bei dem ein Laserstrahl auf eine Linse oder ein Prisma gerichtet wird. Nachteilig hieran ist, dass das Verfahren für Höchstpräzisionsmessungen nur wenig geeignet ist.

**[0007]** Aus der US 3,790,284 A ist ein Interferometersystem zur Messung des Rollwinkels bekannt. Obwohl mit einem solchen System sehr hohe Genauigkeiten erzielbar sind, ist das System für eine Messung unter Werkstattbedingungen, beispielsweise in einer Werkzeugmaschine, nur wenig geeignet.

**[0008]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, den Rollwinkel mit einer hohen Genauigkeit und einem einfachen Messaufbau zu messen.

**[0009]** Die Erfindung löst das Problem insbesondere durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1. Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch eine Rollwinkelmessvorrichtung zum Messen des Rollwinkels mit den Merkmalen von Anspruch 5.

**[0010]** Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass sie die Messung des Rollwinkels mit einer besonders hohen Genauigkeit erlaubt. So ist es möglich, den teilzylinderförmigen Abschnitt mit einer hohen Genauigkeit zu fertigen, so dass aus der Änderung der Reflexionswinkel mit hoher Genauigkeit auf den Rollwinkel geschlossen werden kann. Vorteilhaft ist zudem, dass die Krümmung des teilzylinderförmigen Abschnitts und eine Änderung des Rollwinkels zu einer großen Änderung der Reflexionswinkel führt. Das erhöht die Genauigkeit bei der Messung des Rollwinkels.

**[0011]** Es ist ein weiterer Vorteil, dass der Rollwinkel mit der Erfindung besonders einfach gemessen werden kann.

**[0012]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem teilzylinderförmigen Abschnitt insbesondere jeder Abschnitt des Reflektors verstanden, dessen Kontur dadurch beschrieben werden kann, dass eine gekrümmte Kurve entlang einer erzeugenden Strecke verschoben wird. Dies entspricht der allgemeinen Definition eines Zylinders, der ein Kreiszyylinder sein kann, es aber nicht sein muss.

**[0013]** Unter dem Errechnen des Rollwinkels wird insbesondere verstanden, dass ein absoluter Wert für den Rollwinkel errechnet wird. Anderenfalls wird lediglich eine Veränderung des Rollwinkels bestimmt.

**[0014]** Unter dem Reflektor wird insbesondere jedes Bauteil verstanden, das die Lichtstrahlen zurückwirft.

Dabei handelt es sich bevorzugt um einen Spiegel.

**[0015]** Der erste Reflexionswinkel wird beispielsweise als der Winkel gemessen, den der erste Reflexions-Lichtstrahl zum ersten Lichtstrahl hat. Günstig ist, wenn der erste Reflexionswinkel in einem Koordinatensystem gemessen wird, dessen eine Achse senkrecht auf einer Verschieberichtung des Reflektors steht. Vorteilhaft ist, wenn beide Reflexionswinkel in einer Ebene gemessen werden, welche dadurch definiert wird, dass sie zum einen senkrecht auf der Ebene steht, welche die Lichtstrahlen enthält und zum anderen einen der beiden Lichtstrahlen beinhaltet.

**[0016]** Bevorzugt wird der Rollwinkel aus einer Reflexionswinkeldifferenz aus dem ersten Reflexionswinkel und dem zweiten Reflexionswinkel berechnet. Das hat den Vorteil, dass sich Fehlereinflüsse auf die Reflexionswinkel gegenseitig kompensieren. Die Bestimmung des Rollwinkels aus der Reflexionswinkeldifferenz ist daher besonders genau und wenig fehleranfällig.

**[0017]** Erfindungsgemäß ist der Abschnitt teilzylinderförmig. In diesem Fall lässt sich aus der Änderung der Reflexionswinkel besonders einfach der Rollwinkel errechnen. Prinzipiell kann der Abschnitt aber jede beliebige Kontur haben, sofern sie lokal in einer Umgebung des ersten Orts und des zweiten Orts durch eine Parabel angenähert werden kann.

**[0018]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform werden der erste Lichtstrahl und der zweite Lichtstrahl so auf den teilzylinderförmigen Abschnitt gerichtet, dass zu Beginn der Messung der erste Reflexionswinkel dem zweiten Reflexionswinkel entspricht. Günstig ist es, wenn das Verfahren dann so fortgeführt wird, dass der erste Reflexionswinkel dem Negativen des zweiten Reflexionswinkels entspricht. Auf diese Weise lassen sich besonders genaue Messwerte für den Rollwinkel erhalten. Besonders günstig ist es, wenn beide Reflexionswinkel möglichst klein sind, also im Wesentlichen  $0^\circ$  betragen.

**[0019]** Erfindungsgemäß wird der Reflektor beispielsweise entlang einer Linearführung mit einer Führungsfläche bewegt, wobei der erste Lichtstrahl und der zweite Lichtstrahl bevorzugt so auf den Reflektor gerichtet werden, dass eine Verbindungsstrecke durch den ersten Ort und den zweiten Ort durch die Führungsfläche verläuft. Das führt dazu, dass ein Verkippen des Reflektors um den zu messenden Rollwinkel dazu führt, dass sich der zweite Reflexionswinkel auf entgegengesetzte Weise ändert wie der erste Reflexionswinkel. Das heißt in anderen Worten, dass sich der erste Reflexionswinkel vergrößert, wohingegen sich der zweite Reflexionswinkel verkleinert. Auf diese Weise bleiben Fehler, die durch eine mathematische Näherung des teilzylinderförmigen Abschnitts als parabelförmig entstehen, klein, so dass der Rollwinkel besonders genau berechnet werden kann.

**[0020]** Vorteilhaft ist zudem, wenn die Lichtstrahlen so auf den Reflektor gerichtet werden, dass die Verbindungsstrecke zwischen erstem Ort und zweitem Ort im Wesentlichen parallel zu der erzeugenden Strecke der Kontur des Reflektors verläuft. Im Wesentlichen parallel bedeutet, dass kleine Abweichungen, beispielsweise von unter  $3^\circ$  tolerabel sind.

**[0021]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines exemplarischen Ausführungsbeispiels mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

**[0022]** Fig. 1 eine schematische Ansicht einer erfindungsgemäßen Rollwinkelmeßvorrichtung zum Messen eines Rollwinkels zu Beginn einer Messung,

**[0023]** Fig. 2 eine Ansicht der Rollwinkelmeßvorrichtung gemäß Fig. 1 von der Seite,

**[0024]** Fig. 3 die Rollwinkelmeßvorrichtung gemäß Fig. 1 für den Fall, dass sich der Rollwinkel geändert hat,

**[0025]** Fig. 4 eine schematische Ansicht der Situation gemäß Fig. 3 zum Berechnen des Rollwinkels,

**[0026]** Fig. 5 eine Draufsicht auf die zur Berechnung notwendigen Koordinatensysteme aus Blickrichtung der Lichtquelle und

**[0027]** Fig. 6 eine Ansicht eines Koordinatensystems zur Berechnung des Rollwinkels.

**[0028]** Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Rollwinkelmeßvorrichtung **10**, die einen Reflektor **12**, eine Lichtquelle **14** und eine Auswerteeinheit **16** umfasst.

**[0029]** Der Reflektor **12** besitzt einen teilkreiszyylinderförmigen Abschnitt **18**. Der teilkreiszyylinderförmige Abschnitt **18** kann durch einen Schmiegekreis **20** beschrieben werden, der beispielsweise einen Radius von 10 mm hat.

**[0030]** Der Reflektor **12** ist an einer schematisch eingezeichneten Komponente **22** befestigt, die in eine Verschieberichtung  $V$  entlang einer in **Fig. 2** eingezeichneten Führung (Bezugszeichen **44**) verschoben werden kann. Die Lichtquelle **14** ist so angeordnet, dass sie bei einer derartigen Bewegung ortsfest bleibt.

**[0031]** Die Lichtquelle **14** ist ausgebildet, um einen ersten Lichtstrahl **24** und einen in **Fig. 1** vom ersten Lichtstrahl **24** verdeckten zweiten Lichtstrahl **26** auf den Reflektor **12** zu richten. Die Lichtstrahlen **24**, **26** werden beispielsweise von Leuchtdioden erzeugt. Die Lichtquelle **14** ist Teil einer Messeinheit **28**.

**[0032]** Die Messeinheit **28** umfasst zudem eine Winkelmessvorrichtung **30**, die einen ersten Winkelmesser **32.1** und einen zweiten Winkelmesser **32.2** aufweist. Die Winkelmesser **32.1**, **32.2** sind mit der Auswerteeinheit **16** über ein Datenkabel **34** verbunden.

**[0033]** **Fig. 2** zeigt die Rollwinkelmessvorrichtung **10** von der Seite. Es ist zu erkennen, dass der erste Lichtstrahl **24** in einem ersten Ort **36** auf den Reflektor **12** auftrifft, so dass ein erster Reflexions-Lichtstrahl **38** entsteht. Der zweite Lichtstrahl **26** trifft in einem zweiten Ort **40** auf den Reflektor **12** und es entsteht ein zweiter Reflexions-Lichtstrahl **42**.

**[0034]** Der erste Winkelmesser **32.1** ist so angeordnet, dass er vom ersten Reflexions-Lichtstrahl **38** getroffen wird, wohingegen der zweite Winkelmesser **32.2** so angeordnet ist, dass er vom zweiten Reflexions-Lichtstrahl **42** getroffen wird. Dazu kann vorgesehen sein, dass der Reflektor **12** auf einer seiner der Komponente **22** zugewandten Seite leicht angeschrägt ist.

**[0035]** **Fig. 2** zeigt zudem schematisch eine Führung **44**, auf deren Führungsfläche  $F$  die Komponente **22** in Verschieberichtung  $V$  geführt verschoben werden kann.

**[0036]** **Fig. 3** zeigt den Fall, dass beim Verschieben entlang der Führung die Komponente **22** und damit der Reflektor **12** um einen Rollwinkel  $\alpha$  verkippen. Es ändern sich dadurch die Reflexionswinkel  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , die von den Winkelmessern **32.1**, **32.3** gemessen werden. Aus diesen Winkeländerungen kann, wie im Folgenden gezeigt wird, der Rollwinkel  $\alpha$  bestimmt werden. Die Winkeländerungen werden im Folgenden nicht, wie es auch möglich wäre, als  $\Delta\lambda_1$ ,  $\Delta\lambda_2$  bezeichnet, sondern auch als  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , da die Ausgangswinkel jeweils als null gesetzt werden, um die Rechnung übersichtlicher zu machen.

**[0037]** Die im Folgenden durchgeführten Rechnungen beziehen sich jeweils auf zwei Lichtstrahlen und damit zwei Reflexions-Lichtstrahlen. Selbstverständlich ist es aber auch möglich, dass mehr als zwei Lichtstrahlen verwendet werden, wobei der Rollwinkel dann durch Mittelung der einzelnen erhaltenen Ergebnisse berechnet wird.

**[0038]** **Fig. 4** zeigt schematisch einen Querschnitt durch den Reflektor **12**, um die Berechnung des Rollwinkels  $\alpha$  aus den von den Winkelmessern **32.1**, **32.1** (**Fig. 3**) gemessenen Winkeln zu erläutern.

**[0039]** Der Reflektor **12** hat eine Oberfläche, die in dem eingezeichneten Koordinatensystem folgendermaßen definiert ist oder angenähert werden kann:

$$z' = -k \cdot x'^2 \quad (1),$$

und zwar unabhängig von  $y'$ , das heißt, dass die Oberfläche des Reflektors **12** sich einfach durch Translation des Profils gemäß Formel (1) in Richtung  $y'$  ergibt.

**[0040]** Der Normalenvektor  $\hat{n}'$ ,  $|\hat{n}'| = 1$ , im ersten Ort **36** ergibt sich dann, unter Verwendung von  $\partial z'/\partial x' = -2kx'$  gemäß Formel (1), zu

$$\hat{n}' = \left( (2kx')^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} 2kx' \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

wieder unabhängig von  $y'$ , das heißt,  $\hat{n}' = f(x')$ .

**[0041]** Der Reflektor **12** mit dem Oberflächenprofil gemäß Formel (1) kann auch durch einen Abschnitt eines Zylinders approximiert werden. In diesem Fall gilt

$$k = \frac{1}{2R}, \quad (3),$$

wobei  $R$  der Radius des Zylinders in der  $x'$ - $z'$ -Ebene gemäß Abb. 1 ist.

**[0042]** Fig. 4 zeigt schematisch den Auftreffpunkt  $\vec{r}_1$ , an dem der erste Reflexions-Lichtstrahl **38** auf den ersten Winkelmesser **32.1** trifft.

**[0043]** Fig. 5 zeigt das Koordinatensystem  $x$ - $y$ - $z$  für das Winkelmesssystem, sowie das Koordinatensystem  $x'$ - $y'$ - $z'$  des um den Rollwinkel  $\alpha$  (Rotation um die  $z(=z')$ -Achse) rotierten Reflektors. Es sind auch die beiden Orte  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$  für die Zweipunkt-Winkelmessung des ersten Reflexions-Lichtstrahls **38** und des zweiten Reflexions-Lichtstrahl **42** eingezeichnet.

**[0044]** Gezeigt sind das nicht rotierte Koordinatensystem  $x$ - $y$ - $z$  für das Winkelmesssystem, sowie der um den Rollwinkel  $\alpha$  (Rotation um die  $z(=z')$ -Achse) rotierten Reflektor mit seinem Koordinatensystem  $x'$ - $y'$ - $z'$ . Die beiden Koordinatensysteme können durch folgende Transformationsgleichungen ineinander übergeführt werden:

$$\vec{r}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad (4a),$$

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}. \quad (4b):$$

**[0045]** Das Verfahren beruht auf der Differenzbildung zwischen Winkelmessungen an den zwei verschiedenen Orten **36**, **40** auf dem Reflektor **12**, siehe Fig. 2. Die beiden Orte  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$  für die Zweipunkt-Winkelmessung sind im Koordinatensystem  $x$ - $y$ - $z$  der Winkelmesser **32.1**, **32.2** ortsfest und durch folgende Gleichungen gegeben:

$$\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (5a)$$

und

$$\vec{r}_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r \\ z_2 \end{pmatrix}, \quad (5b),$$

wobei  $z_1$  und  $z_2$  die  $z$ -Koordinaten der Orte **36**, **40** (Fig. 2) sind, welche nicht bekannt sein müssen.

**[0046]** Im Koordinatensystem  $x'$ - $y'$ - $z'$  des um den Rollwinkel  $\alpha$  rotierten Reflektors **12** (Fig. 3) ergeben sich folgende Koordinaten für die Orte  $\vec{r}'_1$  und  $\vec{r}'_2$  der Zweipunkt-Winkelmessung gemäß der Formeln (5a) und (5b):

$$\vec{r}'_1 = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = r \cdot \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (6a)$$

und

$$\vec{r}'_2 = \begin{pmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{pmatrix} = r \cdot \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ z_2 \end{pmatrix}. \quad (6b).$$

[0047] Diese folgen aus den Transformationsgleichungen (4a) und (4b) zwischen den Koordinatensystemen. Die Normalenvektoren  $\hat{n}'_1$  und  $\hat{n}'_2$  der Reflektoroberfläche in den Orten **36**, **40**, welche von den beiden Messstrahlen gemäß der Formel (6a) und (6b) getroffen werden, ergeben sich (im Koordinatensystem x'-y'-z' des Reflektors) aus (2) zu

$$\hat{n}'_1 = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} 2kr \sin \alpha \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ und} \quad (7a)$$

und

$$\hat{n}'_2 = \left( (-2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} -2kr \sin \alpha \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} -2kr \sin \alpha \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7b).$$

[0048] Die Normalenvektoren können über die Transformationsgleichungen (4a) und (4b) ins Koordinatensystem x-y-z des Winkelmesssystems rotiert werden:

$$\hat{n}_1 = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} 2kr \sin \alpha \cos \alpha \\ 2kr \sin^2 \alpha \\ 1 \end{pmatrix} = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} kr \sin(2\alpha) \\ 2kr \sin^2 \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8a)$$

bzw.

$$\hat{n}_2 = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} -2kr \sin \alpha \cos \alpha \\ -2kr \sin^2 \alpha \\ 1 \end{pmatrix} = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1/2} \begin{pmatrix} -kr \sin(2\alpha) \\ -2kr \sin^2 \alpha \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8b)$$

mit der Relation  $2\sin\alpha\cos\alpha = \sin 2\alpha$ .

[0049] Wird ein Messstrahl mit normiertem Richtungsvektor  $\hat{u}$  an einem Oberflächenpunkt des Reflektors mit dem Normalenvektor  $\hat{n}$  reflektiert, so ergibt sich der normierte Richtungsvektor  $\hat{u}_r$  des reflektierten Strahls gemäß

$$\hat{u}_r = \hat{u} - 2\langle \hat{u}\hat{n} \rangle \hat{n}, \quad (9),$$

wobei  $\langle \hat{u}\hat{n} \rangle$  das Vektorprodukt (inneres Produkt) symbolisiert.

[0050] Nach Reflexion der beiden von der Messeinheit **28** ausgehenden Lichtstrahlen **24**, **26** (Messstrahlen) an den Orten **36**, **40** (Oberflächenpunkte des Reflektors **12**) mit den Normalenvektoren  $\hat{n}'_1$  und  $\hat{n}'_2$  gemäß (8a) und (8b) ergeben sich folgende normierte Richtungsvektoren  $\hat{u}_{1r}$  bzw.  $\hat{u}_{2r}$ :

$$\hat{u}_{1r} = \hat{u} - 2\langle \hat{u}\hat{n}_1 \rangle \cdot \hat{n}_1 = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1} \begin{pmatrix} 2kr \sin 2\alpha \\ 4kr \sin^2 \alpha \\ 1 - (2kr \sin \alpha)^2 \end{pmatrix} \quad (10a)$$

und

$$\hat{u}_{2r} = \hat{u} - 2\langle \hat{u}\hat{n}_2 \rangle \cdot \hat{n}_2 = \left( (2kr \sin \alpha)^2 + 1 \right)^{-1} \begin{pmatrix} -2kr \sin 2\alpha \\ -4kr \sin^2 \alpha \\ 1 - (2kr \sin \alpha)^2 \end{pmatrix}, \quad (10b)$$

mit dem normiertem Richtungsvektor  $\hat{u}$  der beiden von der Messeinheit **28** ausgehenden Lichtstrahlen **24**, **26** von

$$\hat{u} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (11).$$

**[0051]** **Fig. 6** zeigt das Koordinatensystem x-y-z der Messeinheit **28** mit speziell definierten polaren Koordinaten  $\lambda$  und  $\delta$ . Es gilt

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \lambda \cos \delta \\ \sin \delta \\ \cos \lambda \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (12).$$

**[0052]** Dabei entspricht  $\lambda$  dem Auslenkungswinkel des reflektierten Messstrahls in der x-z-Ebene der horizontalen Messachse des Winkelmessgeräts,  $\delta$  entspricht dem Strahlauslenkungswinkel senkrecht zu dieser Ebene.

**[0053]** Aus der Transformationsgleichung (12) ergibt sich folgende Relation für die polare Koordinate  $\lambda$  eines vom Reflektor zurückgeworfenen Strahls mit normiertem Richtungsvektor  $\hat{u}_r$ :

$$\tan \lambda = \frac{\hat{u}_r|_{x\text{-Komponente}}}{\hat{u}_r|_{z\text{-Komponente}}}. \quad (13).$$

**[0054]** Damit folgt aus den Formeln (10a) und (10b)

$$\tan \lambda_1 = (1 - (2kr \sin \alpha)^2)^{-1} 2kr \sin 2\alpha \quad (14a)$$

bzw.

$$\tan \lambda_2 = -(1 - (2kr \sin \alpha)^2)^{-1} 2kr \sin 2\alpha = -\tan \lambda_1 = \tan(-\lambda_1) \quad (14b).$$

**[0055]** Damit ergibt sich die Reflexionswinkeldifferenz  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  zu

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = 2 \arctan[(1 - (2kr \sin \alpha)^2)^{-1} 2kr \sin 2\alpha] \quad (15)$$

und schließlich

$$\tan\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) = \tan\left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2}\right) = \left(1 - (2kr \sin \alpha)^2\right)^{-1} 2kr \sin 2\alpha \quad (16).$$

**[0056]** Die Differenzbildung  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  eliminiert die Fehlereinflüsse der Reflektorneigung in Pitch (Rotation um die x'-Achse), die auch als Nicken bezeichnet werden kann, und Yaw (Rotation um die y'-Achse), was auch

als Gieren bezeichnet werden kann, nahezu vollständig, wie auch die Einflüsse von Translationen des Reflektors. Damit ist die Reflexionswinkeldifferenz  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  der Winkelauslenkungen der Reflexions-Lichtstrahlen **38, 42** in der x-z-Ebene der horizontalen Messachse der Messeinheit **28** eine eindeutige Funktion des Rollwinkels  $\alpha$  des Reflektors **12**.

**[0057]** Mit der Approximation  $\alpha \ll \pi$  für kleine Winkel folgen  $\sin\alpha \approx \alpha$  und  $\sin 2\alpha \approx 2\alpha$ . Mit  $(2kr\sin\alpha)^2 \ll 1$  folgt

$$\frac{\Delta\lambda}{2} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \approx 4kr\alpha \approx 2 \frac{r}{R} \alpha, \quad (17)$$

mit dem Radius R des Zylinders, der die parabolische Reflektoroberfläche approximiert. Für kleine Winkel  $\alpha$  ist die gemessene Differenz  $\lambda_1 - \lambda_2$  der Winkelauslenkungen der reflektierten Messstrahlen in der x-z-Ebene der horizontalen Messachse des Winkelmessgeräts also eine Funktion erster Ordnung im Rollwinkel  $\alpha$  des Reflektors.

**[0058]** Im Folgenden wird gezeigt, dass der Rollwinkel  $\alpha$  des Reflektors **12** mit der vorliegenden Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens unabhängig von zusätzlichen Drehungen und Translationen bestimmt werden kann, wie die

- Kippung des Reflektors in Pitch,  $\beta$  (Rotation um die x'-Achse, Nicken)
- Kippung des Reflektors in Yaw,  $\gamma$  (Rotation um die y'-Achse, Gieren)
- laterale Verschiebung  $\Delta x$  des Reflektors in x' und die
- laterale Verschiebung  $\Delta y$  des Reflektors in y'.

**[0059]** Diese Fehlereinflüsse werden nahezu vollständig eliminiert.

**[0060]** Hierfür wurde die Strahlführung mittels Raytracing exakt gerechnet und das Verfahren virtuell realisiert. Für die Monte-Carlo-Simulationen wurden folgende realistische Parameter angenommen (variable Parameter wurden in den angegebenen Intervallen gleich verteilt):

- Roll  $\alpha$ , Pitch  $\beta$ , Yaw  $\gamma$ :  $\pm 1000$  aresec
- laterale Verschiebungen  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ :  $\pm 1$  mm
- Zylinderradius Reflektor R: 1.0 m
- halber Abstand Messorte r: 15 mm

**[0061]** Bei den ersten beiden Parameterbereichen wurden relativ große Werte angenommen, um die Grenzen des Verfahrens besser austesten zu können.

**[0062]** Fig. 7 zeigt die Differenz zwischen dem im virtuellen Experiment vorgegebenen Rollwinkel  $\alpha$  des Reflektors und dem gemäß Näherungsgleichung (16) aus den simulierten Messdaten bestimmten Rollwinkel. Für die oben angenommenen Parameterbereiche beträgt die Standard-Unsicherheit  $u_\alpha$  der Rollwinkelbestimmung, bedingt durch die Einflüsse der zusätzlichen Drehungen und Translationen des Reflektors, lediglich 0,007 aresec. Diese sind damit für die praktische Realisierung des Verfahrens unerheblich.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Rollwinkelmessvorrichtung
<b>12</b>	Reflektor
<b>14</b>	Lichtquelle
<b>16</b>	Auswerteeinheit
<b>18</b>	Abschnitt
<b>20</b>	Schmiegekreis
<b>22</b>	Komponente
<b>24</b>	erster Lichtstrahl
<b>26</b>	zweiter Lichtstrahl
<b>28</b>	Messeinheit
<b>30</b>	Winkelmessvorrichtung
<b>32</b>	Winkelmesser
<b>34</b>	Datenkabel
<b>36</b>	erster Ort
<b>38</b>	erster Reflexions-Lichtstrahl
<b>40</b>	zweiter Ort



<b>42</b>	zweiter Reflexions-Lichtstrahl
<b>44</b>	Führung
<b>F</b>	Führungsfläche
<b>V</b>	Verschieberichtung
<b><math>\alpha</math></b>	Rollwinkel
<b><math>\lambda</math></b>	Reflexionswinkel
<b><math>\Delta\lambda</math></b>	Reflexionswinkeldifferenz

### Patentansprüche

- Verfahren zum Messen eines Rollwinkels ( $\alpha$ ), mit den Schritten
  - Richten eines ersten Lichtstrahls (**24**) auf einen ersten Ort (**36**) eines teilzylinderförmigen Abschnitts (**18**) eines Reflektors (**12**), so dass ein erster Reflexions-Lichtstrahl (**38**) entsteht, der unter einem ersten Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) verläuft,
  - Richten zumindest eines zweiten Lichtstrahls (**26**) auf einen vom ersten Ort (**36**) verschiedenen zweiten Ort (**40**) des teilzylinderförmigen Abschnitts (**18**), so dass ein zweiter Reflexions-Lichtstrahl (**42**) entsteht, der unter einem zweiten Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verläuft,
  - Bewegen des Reflektors (**12**) entlang einer Linearführung (**44**) mit einer Führungsfläche, wobei der erste Lichtstrahl (**24**) und der zweite Lichtstrahl (**26**) so auf den Reflektor (**12**) gerichtet werden, dass eine Veränderung des Rollwinkels ( $\alpha$ ) dazu führt, dass sich der erste Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) vergrößert und sich der zweite Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verkleinert,
  - Messen zumindest einer Größe aus der eine Änderung des ersten Reflexionswinkels ( $\lambda_1$ ) und des zweiten Reflexionswinkels ( $\lambda_2$ ) herleitbar ist und
  - Errechnen des Rollwinkels ( $\alpha$ ) aus der zumindest einen Größe
- Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Größe eine Reflexionswinkeldifferenz ( $\Delta\lambda$ ) aus dem ersten Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) und dem zweiten Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verwendet wird.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Lichtstrahl (**24**) und der zweite Lichtstrahl (**26**) so auf den teilzylinderförmigen Abschnitt (**18**) gerichtet werden, dass zu Beginn der Messung der erste Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) dem zweiten Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) entspricht.
- Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet dass der erste Lichtstrahl (**24**) und der zweite Lichtstrahl (**26**) so auf den Reflektor (**12**) gerichtet werden, dass eine Verbindungsstrecke durch den ersten Ort (**36**) und den zweiten Ort (**40**) durch die Führungsfläche verläuft.
- Rollwinkelmeßvorrichtung zum Messen eines Rollwinkels ( $\alpha$ ), mit:
  - einem Reflektor (**12**), der einen teilzylinderförmigen Abschnitt (**18**) aufweist,
  - einer Lichtquelle (**14**), die ausgebildet ist zum
    - Richten eines ersten Lichtstrahls (**24**) auf einen ersten Ort des teilzylinderförmigen Abschnitts (**18**), so dass ein erster Reflexions-Lichtstrahl (**38**) entsteht, der unter einem ersten Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) verläuft, und
    - Richten zumindest eines zweiten Lichtstrahls (**26**) auf einen vom ersten Ort (**36**) verschiedenen zweiten Ort (**40**) des teilzylinderförmigen Abschnitts (**18**), so dass ein zweiter Reflexions-Lichtstrahl (**42**) entsteht, der unter einem zweiten Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verläuft,
  - einer Führung (**44**), entlang der der Reflektor (**12**) beweglich geführt ist,
  - einer Winkelmeßvorrichtung zum Messen zumindest einer Größe aus der eine Änderung des ersten Reflexionswinkels ( $\lambda_1$ ) und eine Änderung des zweiten Reflexionswinkels ( $\lambda_2$ ) herleitbar ist,
  - einer Auswerteeinheit (**16**), die eingerichtet ist zum Errechnen des Rollwinkels ( $\alpha$ ) aus zumindest einen Größe, wobei
  - die Lichtquelle ausgebildet ist zum Richten des ersten Lichtstrahls (**24**) und des zweiten Lichtstrahls (**26**) so auf den Reflektor (**12**), dass eine Veränderung des Rollwinkels ( $\alpha$ ) dazu führt, dass sich der erste Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) vergrößert und sich der zweite Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ) verkleinert.
- Rollwinkelmeßvorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (**16**) eingerichtet ist zum Errechnen des Rollwinkels ( $\alpha$ ) aus einer Reflexionswinkeldifferenz ( $\Delta\lambda$ ) zwischen dem ersten Reflexionswinkel ( $\lambda_1$ ) und dem zweiten Reflexionswinkel ( $\lambda_2$ ).
- Rollwinkelmeßvorrichtung nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass der teilzylinderförmige Abschnitt (**18**) teilkreiszyylinderförmig ist.

8. Rollwinkelmessvorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle (**14**) so eingerichtet ist, dass der erste Lichtstrahl (**24**) und der zweite Lichtstrahl (**26**) die Lichtquelle (**14**) im Wesentlichen parallel verlassen.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

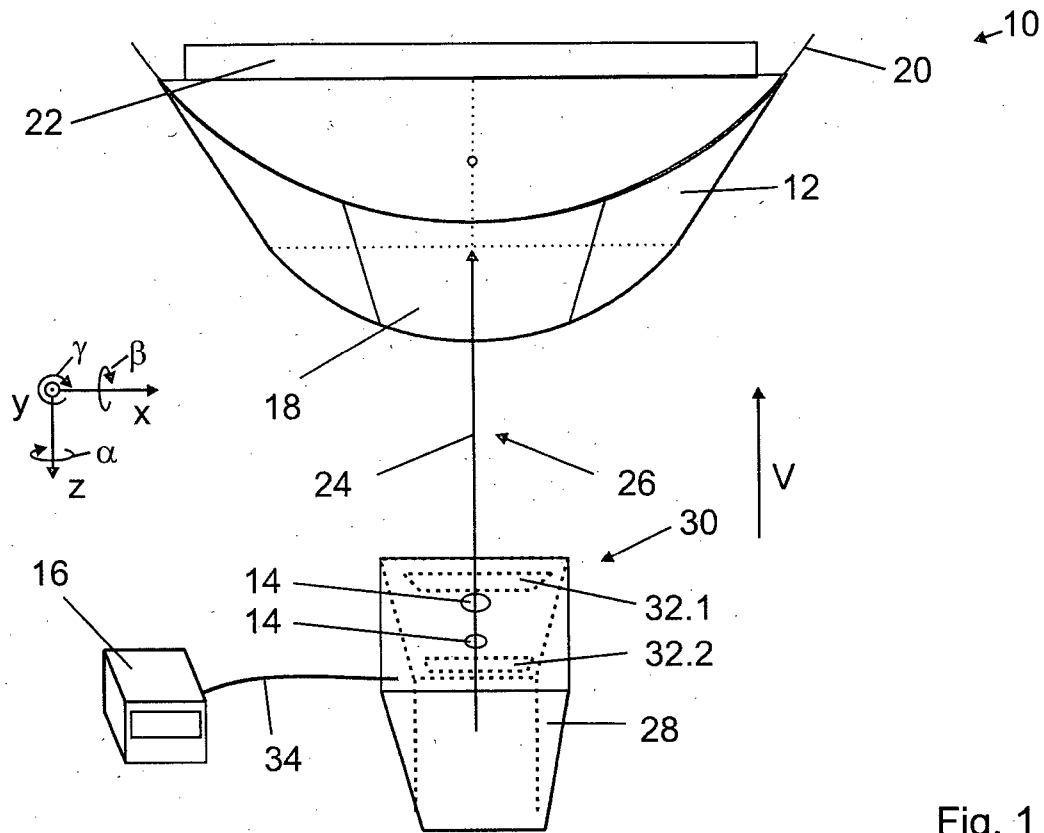


Fig. 1

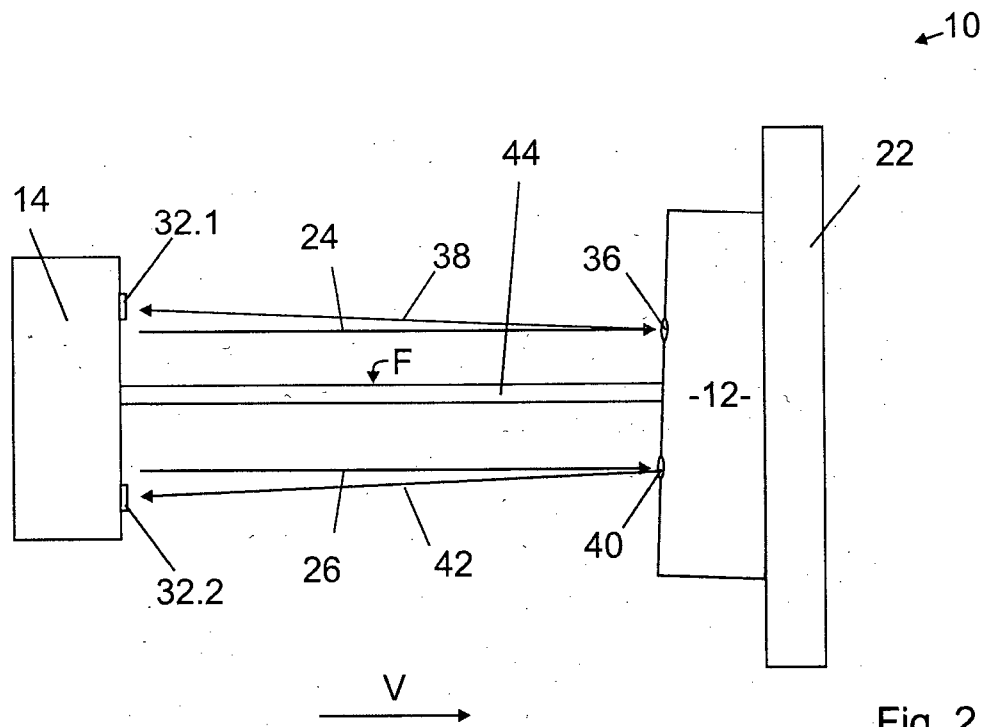


Fig. 2

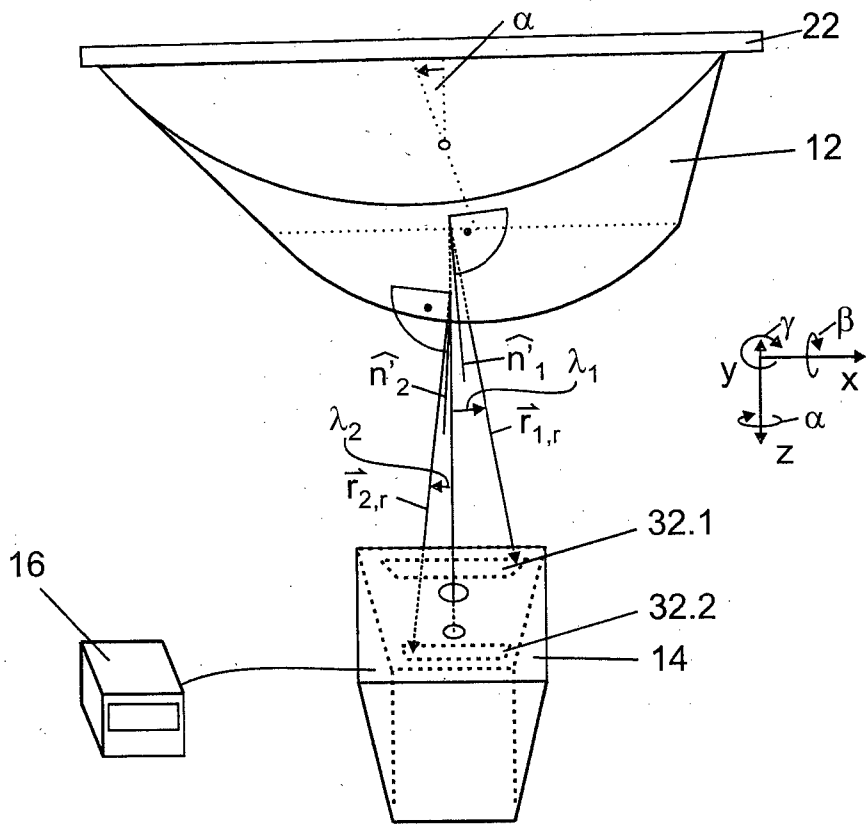


Fig. 3

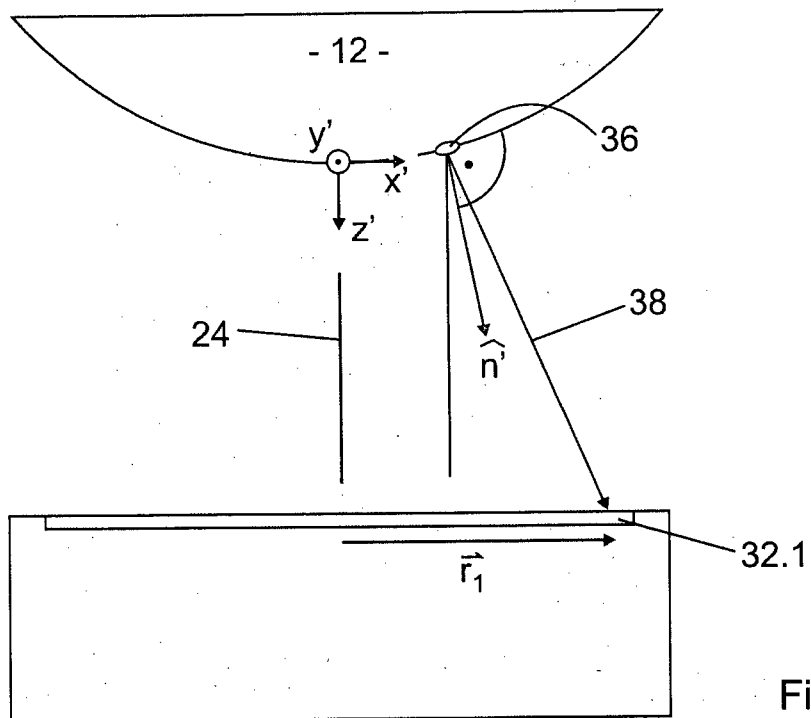


Fig. 4

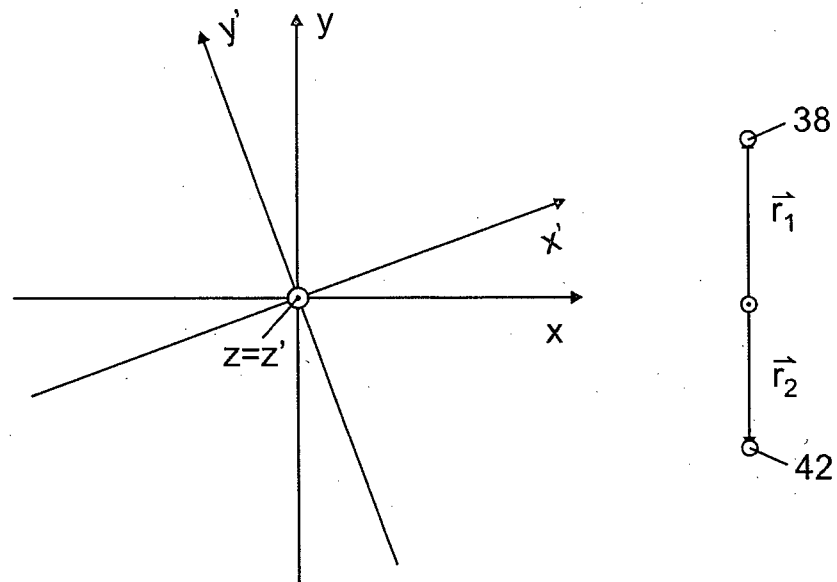


Fig. 5

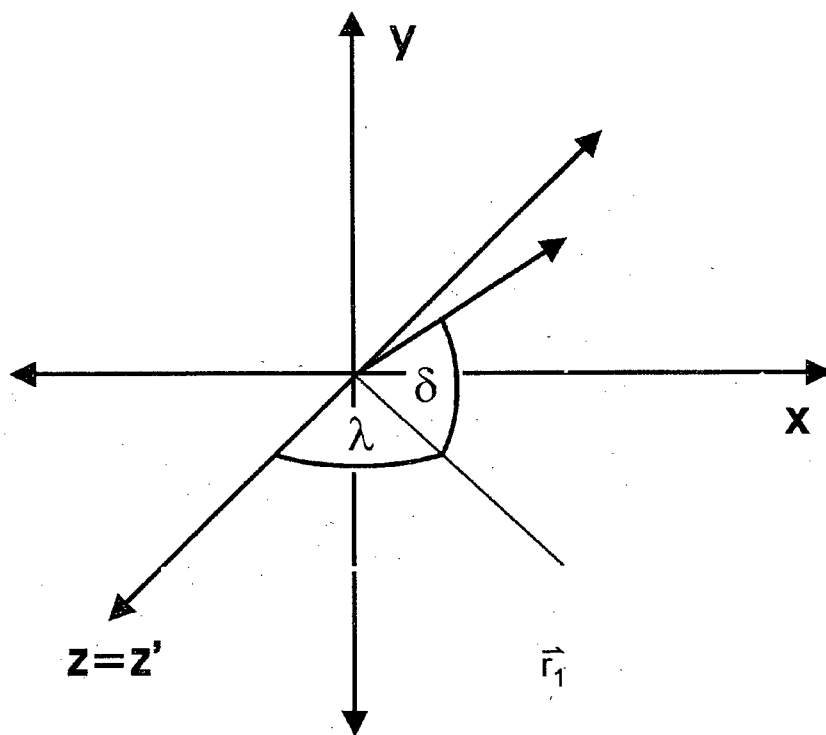


Fig. 6

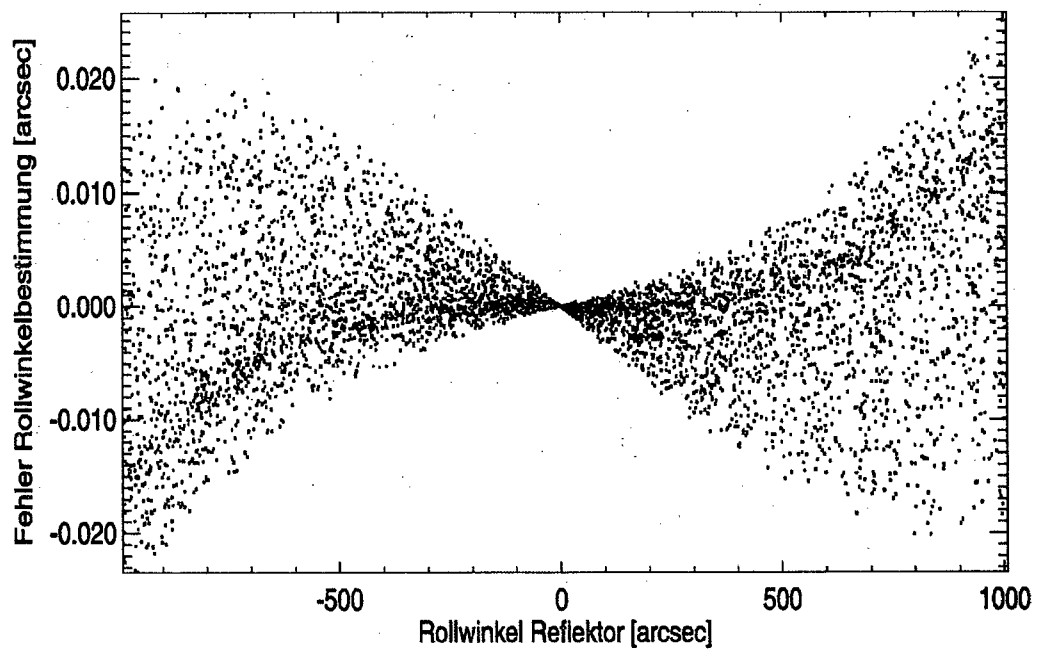


Fig. 7