



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 001 323.5**  
 (22) Anmeldetag: **04.02.2014**  
 (43) Offenlegungstag: **06.08.2015**  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **18.02.2016**

(51) Int Cl.: **G06F 17/50 (2006.01)**  
**G06F 17/10 (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**

(72) Erfinder:  
**Fortmeier, Ines, 13156 Berlin, DE; Stavridis, Manuel, 12159 Berlin, DE; Wiegmann, Axel, Dr., 38176 Wendeburg, DE**

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

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems, das durch  $n$  Parameter  $x_j$  mit den Werten  $x_j^{\text{Start}}$  beschrieben wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:  
 a) Ermitteln von  $m$  optischen Pfaden  $f_i$  durch das simulierte optische System,  
 b) Bestimmen eines Ist-Wertes  $OPL_i^{\text{Ist}}$  einer optischen Weglänge  $OPL_i$  für jeden optischen Pfad  $f_i$ ,  
 c) Bestimmen einer Gesamtabweichung  $d$  der Ist-Werte  $OPL_i^{\text{Ist}}$  von vorbestimmten Sollwerten  $UPL_i^{\text{Soll}}$  der optischen Weglängen  $OPL_i$  und Vergleichen der Gesamtabweichung  $d$  mit einem vorbestimmten Maximalwert  $d_{\text{max}}$ ,  
 d) für den Fall, dass die Gesamtabweichung  $d$  größer ist als der vorbestimmte Grenzwert  $d_{\text{max}}$   
 – Auswählen von wenigstens einem Parameter  $x_i$ , der variiert werden soll,  
 – Bestimmen einer Jacobimatrix  $J$  mit den Matrixelementen

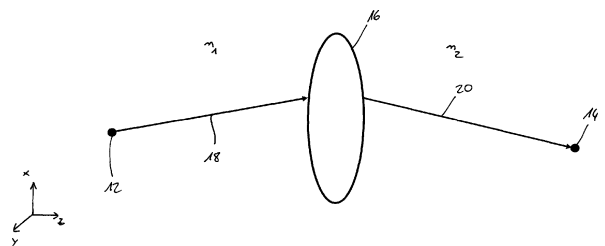
e) Ersetzen der Werte  $x_i^{\text{Start}}$  der zu variiierenden Parameter durch  $x_i^{\text{Start}} + \Delta x_i$  und Wiederholen der Schritte a) bis e) bis die Gesamtabweichung  
 d) kleiner als der vorbestimmte Maximalwert  $d_{\text{max}}$  ist.

$$J_{i,l} = \left. \frac{\partial OPL_i}{\partial x_l} \right|_{x_j^{\text{Start}}} \quad \text{und}$$

– Ermitteln einer Parameteränderung  $\Delta x_l$  durch das Lösen des Gleichungssystems

$$OPL_i^{\text{Soll}} = OPL_i^{\text{Ist}} + \sum_l J_{i,l} \Delta x_l$$

für alle  $i$ .



(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 10 2006 057 606 A1**  
**US 2011 / 0 042 839 A1**

**LEMMER, U., [u.a.]: Licht- und Displaytechnik.**  
**Lichttechnisches Institut LTI, Universität**  
**Karlsruhe, Wintersemester 2007/2008.**  
[Recherchiert am 08.07.2015]. Im Internet: <URL:  
[https://www.lti.kit.edu/rd\\_download/licht2007/  
LiDi\\_Optikdesign\\_20080208.pdf](https://www.lti.kit.edu/rd_download/licht2007/LiDi_Optikdesign_20080208.pdf)>.

**Wikipedia: Newton-Verfahren.** Version vom  
20.01.2014. [Recherchiert am 30.06.2015]. Im  
Internet: <URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.  
php?title=Newton-Verfahren&oldid=126682042](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Newton-Verfahren&oldid=126682042)>.

**Wikipedia: Optische Weglänge.** Version vom  
21.01.2014. [Recherchiert am 30.06.2015]. Im  
Internet: <URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.  
php?title=Optische\\_Wegl%C3%A4nge&oldid=  
126695968](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Optische_Wegl%C3%A4nge&oldid=126695968)>.

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems, das durch  $n$  Parameter  $x_j$  mit den Werten  $x_j^{\text{Start}}$  beschrieben wird.

**[0002]** Optische Systeme werden heute in vielen Gebieten der Technik verwendet und müssen für völlig unterschiedliche Abbildungseigenschaften und Aufgabenstellungen konzipiert und optimiert werden. Wird beispielsweise für eine neuartige Anwendung ein neues optisches System gesucht, wird zunächst ein Startsystem simuliert, dessen Eigenschaften anschließend in einem Iterationsverfahren soweit optimiert werden, bis sie den Anforderungen an das gesuchte optische System entsprechen.

**[0003]** In anderen Anwendungen ist beispielsweise die Fertigungsqualität eines optischen Bauteils, beispielsweise eines Spiegels oder einer Linse, zu untersuchen. Dabei werden am realen Objekt, dessen Qualität es zu untersuchen gilt, Messungen durchgeführt. Da das zu untersuchende Objekt aufgrund von Fertigungstoleranzen und/oder Fehlern nicht die gewünschte Sollform exakt aufweisen kann, führen auch die am realen Objekt durchgeführten Messungen nicht zum Soll-Ergebnis, sondern zu einem davon leicht abweichenden Ist-Ergebnis. Um die Abweichung beispielsweise in der Kontur oder geometrischen Form des zu untersuchenden Objektes genau zu ermitteln, wird nun das optische Soll-System, bei dem also das Bauteil mit der Soll-Form verwendet wird, simuliert und anschließend soweit optimiert und angepasst, bis es die im realen Versuch ermittelten Messergebnisse zeigt.

**[0004]** Beide genannten Aufgabenstellungen sind folglich Anwendungen eines Verfahrens zum Optimieren eines simulierten optischen Systems. Dabei bedeutet Optimieren folglich, dass das simulierte optische System so verändert werden soll, dass gewünschte vorbestimmte Abbildungseigenschaften, die beispielsweise auch ein reales Messergebnis sein können, erfüllt werden.

**[0005]** Weitere Anwendungen eines solchen Verfahrens zum Optimieren eines simulierten optischen Systems sind beispielsweise Sensitivitätsuntersuchungen optischer Systeme. Sie geben Aufschluss darüber, wie exakt und genau beispielsweise ein optisches Bauteil positioniert und/oder gefertigt werden muss, um die gewünschten Abbildungseigenschaften zu erreichen. Zudem kann durch solche Verfahren ermittelt werden, welche Systemparameter beispielsweise für die optische Weglänge einzelner Strahlen und optischer Pfade durch das optische System hindurch besonders relevant sind. Zudem können bereits im Vorhinein Fehlerbegutachtungen durchgeführt werden, indem beispielsweise ge-

testet wird, welche Auswirkungen beispielsweise eine nicht exakte Positionierung eines Bauteiles oder eine nicht exakte Fertigung von Bauteilen und/oder Oberflächen auf die Abbildungseigenschaften hat. In allen diesen Verfahren werden Parameter, die zumindest einen Teil des optischen simulierten Systems beschreiben, variiert.

**[0006]** Eine Eigenschaft der optischen Systeme, die für diese Verfahren häufig verwendet wird, ist beispielsweise die optische Weglänge von optischen Pfaden durch das optische System hindurch, die einen fest vorgegebenen Startpunkt mit einem fest vorgegebenen Zielpunkt verbinden. Die Verfahren, in denen diese optischen Pfade ermittelt werden, sind unter dem Begriff „Rayaiming“ im Stand der Technik bekannt. Nachdem durch ein derartiges „Rayaiming“-Verfahren die optischen Pfade ermittelt wurden, wird deren optische Weglänge durch das System bestimmt. Dies ist mit der Kenntnis der Brechungsindizes der Materialien, durch die die optischen Pfade verlaufen, einfach möglich.

**[0007]** Das simulierte optische System entspricht in der Regel nicht dem gewünschten optischen System, das die gewünschten optischen Eigenschaften aufweist. Daher müssen nun einer oder mehrere der das System beschreibenden Parameter variiert werden, um das simulierte optische System dahingehend zu optimieren, dass die simulierten Abbildungseigenschaften mit den gewünschten Abbildungseigenschaften möglichst gut übereinstimmen. Dazu muss zunächst ermittelt werden, wie sich eine Änderung einzelner Parameter auf die unterschiedlichen Weglängen der einzelnen optischen Pfade auswirkt. Es muss folglich die Ableitung der optischen Weglänge nach dem jeweiligen Parameter bestimmt werden. Dies geschieht im Stand der Technik durch die Bestimmung des entsprechenden Differenzenquotienten, wie dies beispielsweise in der DE 10 2006 057 606 A1 vorgeschlagen wird. Um diesen jedoch bestimmen zu können, muss ein zu variierender Parameter  $x_k$  um einen kleinen Betrag nach oben und nach unten variiert werden. Es sind folglich zusätzliche „Rayaiming“-Verfahren durchzuführen, bei denen der Parameter  $x_k$  einmal durch  $x_k + \Delta x$  und einmal durch  $x_k - \Delta x$  ersetzt wird. Aus den so ermittelten Größen kann der gewünschte Differenzenquotient ermittelt werden. Dieses Verfahren ist sehr rechen- und daher zeitintensiv. So müsste für nur einen einzigen zu variierenden Parameter neben dem bereits durchgeführten „Rayaiming“-Verfahren für das simulierte Startsystem zwei weitere dieser Verfahren durchgeführt werden, die rechenaufwändig sind. Je mehr Parameter des Systems variiert werden sollen, desto größer wird der entsprechende Rechenaufwand.

**[0008]** Aus der US 2011/0042839 A1 ist ein derartiges Variationsverfahren bekannt, bei dem Jaco-

bi-Matrixelemente berechnet werden sollen. Aus der Vorlesung „Licht- und Displaytechnik“ von Uli Lemer et. al. der Universität Karlsruhe aus dem Wintersemester 2007/2008 sind die Grundlagen des computergestützten Designs optischer Bauelemente bekannt.

**[0009]** Das simulierte optische System wird durch  $n$  Parameter  $x_j$  bestimmt, die zunächst die Werte  $x_j^{\text{Start}}$  aufweisen. Diese Parameter können beispielsweise Ortskoordinaten und Positionen von optischen Bauteilen im optischen System, aber auch beispielsweise Krümmungsradien oder andere Parameter sein, die geometrische Formen oder sonstige Eigenschaften von optischen Bauteilen beschreiben, die Teile des optischen Systems sind.

**[0010]** Ein gattungsgemäßes Verfahren, bei dem die beschriebene Simulation zum Einsatz kommt, ist beispielsweise in der DE 10 2006 057 606 A1 offenbart. Bei dem dort beschriebenen Verfahren soll ein Prüfling oder Prüfkörper in einer Messvorrichtung vermessen werden. Dazu muss wenigstens einmal die Messvorrichtung kalibriert werden. Dazu wird eine Parametrisierung verwendet, durch die sogenannte Objektwellen, also Lichtwellen, die durch die Messvorrichtung hindurch auf den Prüfling fallen, beschrieben werden können. Diese Objektwellen lassen sich dabei beispielsweise durch optische Weglängen-Funktionen beschreiben, die sich in einer Bezugsebene im Prüfraum, in dem der zu vermessende Prüfling angeordnet wird, ergeben. Die verwendeten Parameter können dabei physikalische Größen einzelner Bauteile der Messvorrichtung oder andere ggf. aus diesen Größen hergeleitete Parameter sein, die zur Beschreibung der Objektwellen und damit zur Beschreibung der Messvorrichtung geeignet sind.

**[0011]** Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 so weiterzuentwickeln, dass der benötigte Rechenaufwand reduziert und gleichzeitig die numerische Genauigkeit erhöht wird.

**[0012]** Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe durch ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1, das die folgenden Schritte aufweist:

- Ermitteln von  $m$  optischen Pfaden  $f_i$ , die durch das simulierte optische System hindurchführen,
- Bestimmen eines Ist-Wertes  $OPL_i^{\text{Ist}}$  einer optischen Weglänge  $OPL_i$  für jeden optischen Pfad  $f_i$ ,
- Bestimmen einer Gesamtabweichung  $d$  der Ist-Werte  $OPL_i^{\text{Ist}}$  von vorbestimmten Sollwerten  $OPL_i^{\text{Soll}}$  der optischen Weglängen  $OPL_i$  und Vergleichen der Gesamtabweichung  $d$  mit einem vorbestimmten Maximalwert  $d_{\text{max}}$ ,
- für den Fall, dass die Gesamtabweichung  $d$  größer ist als der vorbestimmte Grenzwert  $d_{\text{max}}$ :

- Auswählen von wenigstens einem Parameter  $x_i$ , der variiert werden soll,
- Bestimmen einer Jacobimatrix  $J$  mit dem Matrixelementen

$$J_{i,j} = \left. \frac{\partial OPL_i}{\partial x_j} \right|_{x_j^{\text{Start}}} \quad \text{und}$$

- Ermitteln einer Parameteränderung  $\Delta x_i$  durch das Lösen des Gleichungssystems

$$OPL_i^{\text{Soll}} = OPL_i^{\text{Ist}} + \sum_j J_{i,j} \Delta x_j$$

für alle  $i$

- Ersetzen der Werte  $x_i^{\text{Start}}$  der zu variiierenden Parameter durch  $x_i^{\text{Start}} + \Delta x_i$  und Wiederholen der Schritte a) bis e) bis die Gesamtabweichung  $d$  kleiner ist als der vorbestimmte Maximalwert  $d_{\text{max}}$ ,

wobei das simulierte optische System wenigstens ein optisches Bauteil mit einer Oberfläche aufweist, durch die optischen Pfade  $f_i$  hindurchtreten oder an der sie reflektiert werden und wobei zur Bestimmung von Matrixelementen der Jacobimatrix  $J$  die Relation

$$\frac{\partial OPL_i}{\partial x_j} = \sum_k s n_k e_{kx_j}$$

verwendet wird, wenn  $x_i$  eine Ortskoordinate wenigstens eines Bauteiles und/oder einer Oberfläche ist. Dabei indiziert der Index  $k$  eine Teilstrecke des optischen Pfades  $f_i$ , die auf das wenigstens ein Bauteil und/oder die Oberfläche trifft oder das wenigstens ein Bauteil und/oder die Oberfläche verlässt. Dabei sind sowohl die Oberflächen gemeint, an denen der optische Pfad  $f_i$  reflektiert wird als auch solche, durch die er hindurchtritt.  $s$  ist eine Funktion, die den Wert  $+1$  annimmt, wenn die Teilstrecke  $k$  auf das jeweilige Bauteil und/oder die Oberfläche trifft und die den Wert  $-1$  annimmt, wenn die Teilstrecke  $k$  das jeweilige Bauteil und/oder die Oberfläche verlässt.  $e_{kx_j}$  ist dabei die Komponente des Richtungsvektors  $\vec{e}_k$  der Teilstrecke  $k$  in Richtung des Parameters  $x_j$ .  $n_k$  ist der Brechungsindex des Mediums, in dem die Teilstrecke  $k$  verläuft.

**[0013]** Zunächst werden folglich optische Pfade durch das simulierte optische System hindurch ermittelt, deren optische Weglängen bestimmt werden. Ein Vergleich dieser Ist-Werte der optischen Weglängen mit vorbestimmten Sollwerten, die beispielsweise gewünschte Abbildungseigenschaften oder reale Messergebnisse sein können, liefert eine Gesamtabweichung  $d$ , die mit einem vorbestimmten Grenzwert verglichen wird. Für den Fall, dass die Abweichung  $d$  kleiner als der vorbestimmte Maximalwert  $d_{\text{max}}$  ist, ist das simulierte optische System in ausrei-

chender Übereinstimmung mit den gewünschten optischen Abbildungseigenschaften, so dass eine weitere Optimierung nicht nötig ist. Ist jedoch die Gesamtabweichung  $d$  der Ist-Werte der optischen Weglängen von den Sollwerten der optischen Weglängen größer als der vorbestimmte Grenzwert  $d_{\max}$ , muss das System durch Variation eines oder mehrerer der genannten Parameter, die das System beschreiben, optimiert und an die gewünschten Abbildungsergebnisse angepasst werden.

**[0014]** Dies geschieht durch Lösen des Gleichungssystems

$$OPL_i^{\text{Soll}} = OPL_i^{\text{Ist}} + \sum_j J_{i,j} \Delta x_j$$

für alle  $i$ , bei dem die Sollwerte  $OPL_i^{\text{Soll}}$  der optischen Weglängen sowie die Ist-Werte  $OPL_i^{\text{Ist}}$  der optischen Weglängen bekannt sind und das nach  $\Delta x_j$  aufgelöst werden muss.  $J_{i,j}$  bezeichnet dabei die Elemente der Jacobimatrix, in der die ersten Ableitungen der optischen Weglängen nach den jeweiligen Parametern enthalten sind. Das Gleichungssystem entspricht folglich einer Linearisierung des simulierten optischen Systems.

**[0015]** Um das Gleichungssystem zu lösen, muss folglich zunächst die Jacobimatrix  $J$  bestimmt werden. Dies geschieht auf analytischem Wege, so dass die Bestimmung und Berechnung des Differenzenquotienten, wie es aus dem Stand der Technik bekannt ist, nicht mehr nötig ist. Dadurch fallen die rechenaufwändigen und damit zeitintensiven weiteren „Rayaiming“-Schritte weg. Das Verfahren wird auf diese Weise schneller durchführbar und benötigt weniger Rechenkapazitäten.

**[0016]** Insbesondere für Sensitivitätsbestimmungen ist auch ein Verfahren als eine separate Erfindung sinnvoll, bei dem zunächst die  $m$  optischen Pfade ermittelt werden, aus denen anschließend die optischen Weglängen bestimmt werden. Da bei Sensitivitätsbestimmungen die optischen Eigenschaften des simulierten optischen Systems nicht verändert werden sollen, sondern der Einfluss einer Abweichung der Parameter von den Soll-Parametern bestimmt werden soll, muss folglich keine Abweichung der Ist-Werte der optischen Weglängen von Soll-Werten bestimmt werden. Für diese Verfahren existieren keine Soll-Werte. Dennoch wird im weiteren Verfahrensschritt für diese Verfahren die Jacobimatrix mit dem hier beschriebenen Verfahren bestimmt. Es soll jedoch das im dritten Spiegelstrich des Merkmals  $d$ ) des Anspruchs 1 genannte Gleichungssystem nicht nach  $\Delta x_j$  aufgelöst werden, um festzustellen, in wie weit die Parameter verschoben werden müssen, um eine gewünschte optische Soll-Weglänge zu erreichen. Vielmehr wird das Gleichungssystem mit festgesetzten oder vorbestimmten oder bekannten  $\Delta x_j$

ausgewertet, um festzustellen, wie stark sich die optische Weglänge bei einer bestimmten Parameterverschiebung ändert. Auch diese Verfahren sind als separate Erfindung mit den hier im folgenden beschriebenen vorteilhaften Ausgestaltungen verwendbar.

**[0017]** In einer bevorzugten Ausgestaltung verbinden die optischen Pfade  $f_i$  jeweils einen vorbestimmten Startpunkt  $S_i$  mit einem vorbestimmten Endpunkt  $E_i$ . Damit kann zum Ermitteln der  $m$  optischen Pfade  $f_i$  ein herkömmliches „Rayaiming“-Verfahren durchgeführt werden.

**[0018]** Vorteilhafterweise enthalten die Endparameter  $x_j$  die Ortskoordinaten wenigstens eines dieser optischen Bauteile und/oder Parameter wenigstens einer der Oberflächen wenigstens eines der optischen Bauteile.

**[0019]** Werden mehrere optische Bauteile als eine optische Baugruppe zusammengefasst, deren Position variiert werden soll, vereinfacht sich die beschriebene Rechnung weiter. Der Index  $k$  bezeichnet dann nicht alle Teilstrecken für die Schnittpunkte des optischen Pfades mit den unterschiedlichen optischen Bauteilen, die zur optischen Baugruppe zusammengefasst wurden, sondern nur Teilstrecken für die Oberflächen, über die der optische Pfad in die Baugruppe ein- bzw. aus der Baugruppe austritt.

**[0020]** Handelt es sich bei dem Parameter  $x_i$ , der zu variieren ist, beispielsweise um die  $z$ -Komponente der Position eines Bauteils, bedeutet dies, dass das Bauteil beispielsweise entlang der optischen Achse verschoben werden soll, um die optischen Eigenschaften des simulierten optischen Systems an die gewünschten Abbildungseigenschaften anzupassen. In diesem Fall wäre  $e_{kz}$  der Wert der  $z$ -Komponente des Richtungsvektors des jeweiligen optischen Pfades  $f_i$  an der Oberfläche des zu verschiebenden Bauteils. Durch diesen sehr einfachen Zusammenhang zwischen Matrixelementen der Jacobimatrix und den Richtungsvektoren der optischen Pfade, die spätestens nach dem Verfahrensschritt  $a$ ), in dem die optischen Pfade ermittelt werden, bekannt sind, lassen sich Matrixelemente der Jacobimatrix besonders einfach und mit nur sehr wenig Rechenaufwand bestimmen. Dadurch wird das Verfahren weiter beschleunigt, ohne dass die numerische Genauigkeit nachlässt.

**[0021]** Werden andere Parameter als die Ortskoordinaten von Bauteilen und/oder deren Oberflächen variiert, können die entsprechenden Einträge der Jacobimatrix über die Kettenregel bestimmt werden. Ein solcher Eintrag berechnet sich folglich gemäß

$$\frac{\partial OPL_i}{\partial x_j} = \frac{\partial OPL_i}{\partial x_k} \frac{\partial x_k}{\partial x_j},$$

so dass die Ableitungen der optischen Weglängen nach den Raumkoordinaten Verwendung finden können, die, wie bereits dargelegt, auf besonders einfache Weise erhältlich sind. Der Parameter, der zu variieren ist, ist dabei beispielsweise ein Krümmungsradius, eine Dicke oder eine sonstige Eigenschaft eines optischen Bauteiles. Dies umfasst beispielsweise auch Parameter, die die geometrische Form des Bauteiles beschreiben. Sind diese Formen in analytischer Weise bekannt, lässt sich auch die verbleibende Ableitung einfach und mit wenig Rechenaufwand ermitteln, so dass allgemein die Jacobimatrix schnell, mit relativ geringem Rechenaufwand und sehr hoher numerischer Genauigkeit bestimmt werden kann.

**[0022]** In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens werden zur Bestimmung der Jacobimatrix folglich lediglich die optischen Pfade  $f_i$  und parametrisierte Beschreibungen der wenigstens einer Oberfläche des wenigstens einen optischen Bauteils verwendet. Allein mit diesen Größen, die nach dem Verfahrensschritt a) bereits vollständig vorhanden sind, lässt sich die Jacobimatrix bestimmen, so dass zusätzliche „Rayaiming“-Schritte oder andere zeit- und rechenintensive Verfahrensschritte nicht mehr notwendig sind.

**[0023]** Besonders bevorzugt sind die Sollwerte der optischen Weglängen an einem realen System gemessene Werte. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die Fertigungsqualität eines optischen Bauteils überprüft werden soll. Wie bereits dargelegt, wird das Bauteil in ein ansonsten bekanntes und gut vermessenes System eingebaut und eine Messung beispielsweise der optischen Weglängen über ein Interferometer oder ein Interferenzverfahren durchgeführt. Das erhaltene Messergebnis weicht vom perfekten Messergebnis ab, das erreicht würde, wenn das zu vermessene Bauteil exakt die gewünschte Sollform aufweisen würde. In den Verfahren werden nun die Parameter, die die geometrische Form und/oder die Position des zu vermessenden Bauteils beschreiben, solange variiert, bis die optischen Weglängen des simulierten optischen Systems den optischen Weglängen des realen Systems, die durch die Interferometermessung ermittelt wurden, entsprechen. Es kann dann davon ausgegangen werden, dass auch die veränderte simulierte Gestalt und geometrische Form des zu vermessenden optischen Bauteils der tatsächlich vorhandenen Form des zu vermessenden Bauteils entspricht.

**[0024]** Vorteilhafterweise beschreiben daher alle zu variierenden Parameter  $x_i$  Eigenschaften eines einzigen optischen Bauteils. Dabei handelt es sich selbstverständlich um das Bauteil, dessen Form oder Geometrie es zu bestimmen gilt.

**[0025]** Durch ein hier beschriebenes Verfahren kann die benötigte Rechenzeit beispielsweise bei einem

Design-Verfahren, mit dem ein neues optisches System designed werden soll, drastisch reduziert werden. Insbesondere bei komplexen Systemen, die beispielsweise bis zu 150 Parameter aufweisen können, durch die sie beschrieben werden, wird die Rechenzeit um den Faktor 300 verkürzt. Zur Bestimmung der Gesamtabweichung  $d$  im Verfahrensschritt d) können eine Vielzahl unterschiedlicher aus dem Stand der Technik jedoch bekannter Verfahren verwendet werden. Neben einer quadratischen Abweichung oder einer Aufsummierung der Einzelabweichungen, bei denen die Abweichung eines jeden optischen Pfades bzw. dessen optischer Weglänge gleich stark gewichtet wird, sind auch Berechnungsmethoden für die Gesamtabweichung denkbar, bei denen bestimmten optischen Pfaden, die für die gewünschten Abbildungseigenschaften besonders wichtig sind, ein besonders hohes Gewicht beigemessen wird.

**[0026]** Mit Hilfe der beiliegenden Figuren wird nachfolgend ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung näher erläutert. Es zeigt:

**[0027]** Fig. 1 die schematische Darstellung des Ablaufs eines Verfahrens gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung und

**[0028]** Fig. 2 bis Fig. 4 schematische Darstellungen unterschiedlicher Anwendungsbeispiele für ein Verfahren gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

**[0029]** Fig. 1 zeigt den schematischen Ablauf eines Verfahrens zum Optimieren eines simulierten optischen Systems. Zunächst wird in einem ersten Verfahrensschritt **2** eine Menge von  $m$  optischen Pfaden  $f_i$  bestimmt, die durch das simulierte optische System verlaufen. Anhand dieser optischen Pfade wird nun für jeden dieser Pfade  $f_i$  im zweiten Verfahrensschritt **4** die jeweilige optische Weglänge  $OPL_i^{Ist}$  des jeweiligen optischen Pfades  $f_i$  bestimmt. In einem Prüfungsschritt **6** wird eine Gesamtabweichung  $d$  der so bestimmten Ist-Werte der optischen Weglängen aus dem zweiten Verfahrensschritt **4** von vorbestimmten Soll-Werten für die optischen Weglängen bestimmt. Es wird zudem verglichen, ob diese so bestimmte Gesamtabweichung  $d$  kleiner ist als ein vorbestimmter Maximalwert  $d_{max}$ . Für den Fall, dass die Gesamtabweichung  $d$  den vorbestimmten Grenzwert  $d$  den vorbestimmten Grenzwert  $d_{max}$  unterschreitet, endet das Verfahren im Schlussschritt **8**.

**[0030]** Ansonsten werden im Iterationsschritt **10** neue Werte für die zu variierenden Parameter bestimmt werden. Dabei wird das Gleichungssystem

$$OPL_i^{Soll} = OPL_i^{Ist} + \sum_l J_{i,l} \Delta x_l$$

für alle  $i$  gelöst, wobei  $J$  die Jacobimatrix mit den Einträgen

$$J_{i,l} = \left. \frac{\partial OPL_i}{\partial x_l} \right|_{x_j^{Start}}$$

darstellt. Das Gleichungssystem wird nach  $\Delta x_l$  aufgelöst und die Parameter um jeweils dieses ausgerechnete  $\Delta x_l$  variiert werden. Mit diesem neuen Satz an Parametern wird das Verfahren erneut durchgeführt, so dass im erneuten ersten Verfahrensschritt **2** neue optische Pfade bestimmt werden.

**[0031]** Fig. 2 zeigt einen optischen Pfad, der einen Startpunkt **12** mit einem Zielpunkt **14** verbindet. Das simulierte optische System ist im in Fig. 2 gezeigten Ausführungsbeispiel denkbar einfach und besteht lediglich aus einem optischen Bauteil **16**. Der optische Pfad verfügt über einen ersten eintreffenden Strahl **18** sowie einen ersten abgehenden Strahl **20**.

**[0032]** Soll beispielsweise die  $z$ -Koordinate der Position des optischen Bauteils **16** variiert werden, muss für die Jacobimatrix die Ableitung der optischen Weglänge des gezeigten optischen Pfades nach dieser  $z$ -Komponente  $n$  berechnet werden. Da es sich dabei um eine Ortskoordinate handelt, ist dies besonders einfach möglich. Geht man davon aus, dass der Richtungsvektor des ersten eintreffenden Strahles **18** eine  $z$ -Komponente  $e_{1z}$  und der Richtungsvektor des ersten abgehenden Strahles **20** eine  $z$ -Komponente  $e_{2z}$  aufweist und dass sich der erste eintreffende Strahl **18** in einem Medium mit dem Brechungsindex  $n_1$  und der erste abgehende Strahl **20** sich in einem Medium mit dem Brechungsindex  $n_2$  bewegt, berechnet sich die gewünschte Ableitung zu  $\frac{\partial OPL}{\partial z} = n_1 e_{1z} - n_2 e_{2z}$ .

**[0033]** Fig. 3 zeigt einen etwas komplizierteren optischen Pfad. Auch er verbindet den Startpunkt **12** mit dem Zielpunkt **14**, durchläuft das optische Bauteil **16** jedoch zweimal, da er an einem Spiegel **22** reflektiert wird. Er verfügt neben dem ersten eintreffenden Strahl **18** und dem ersten abgehenden Strahl **20** über einen zweiten eintreffenden Strahl **24** sowie einen zweiten abgehenden Strahl **26**. Die Strahlen **18** und **26** bewegen sich in einem Medium mit dem Brechungsindex  $n_1$  während sich die beiden Strahlen **20**, **24** in einem Medium mit dem Brechungsindex  $n_2$  bewegen. Auch hier soll die  $z$ -Komponente der Position des optischen Bauteils **16** variiert werden. Da die Position des Spiegels **22** nicht variiert wird, muss der erste abgehende Strahl **20** nicht gleichzeitig als eingehender Strahl auf den Spiegel **22** gewertet werden. Die Ableitung bestimmt sich folglich zu  $\frac{\partial OPL}{\partial z} = n_1 e_{1z} - n_2 e_{2z} + n_2 e_{3z} - n_1 e_{4z}$ .  $e_{3z}$  bezeichnet dabei die  $z$ -Komponente des Richtungsvektors des zweiten eintreffenden Strahls **24** und  $e_{4z}$  bezeichnet die  $z$ -Komponente des zweiten abgehenden Strahles **26** jeweils an der entsprechenden Oberfläche des opti-

schen Bauteiles **16**. Man erkennt, dass Komponenten abgehender Strahlen **20**, **26** negativ und Komponenten eintreffender Strahlen **18**, **24** positiv gezählt werden.

**[0034]** Dabei ist es unerheblich, ob das optische System weitere Bauteile und Komponenten aufweist, deren Position oder Parameter nicht variiert werden. Dieses Beispiel ist in Fig. 4 gezeigt. Auch hier verbindet der gezeigte optische Pfad Startpunkt **12** und Zielpunkt **14**. Er durchläuft dabei drei Bauteilgruppen **28**, deren Parameter und/oder Positionen unverändert bleiben. Sie haben folglich keinen Einfluss auf die zu berechnenden Ableitungen bzw. Matrixelemente der Jacobimatrix. Auch in diesem Fall wird die  $z$ -Komponente des optischen Bauteils **16** variiert. Dabei ist es für die Bestimmung der Ableitung völlig unerheblich, ob das optische Bauteil **16** tatsächlich nur ein einziges Element umfasst oder ob es sich dabei um eine Gruppe von optischen Bauteilen, beispielsweise ein Linsensystem handelt, dessen Position als Ganzes verschoben werden soll. Bei der in Fig. 4 gezeigten Ausführungsform berechnet sich das entsprechende Element der Jacobimatrix zu  $\frac{\partial OPL}{\partial z} = n_1 e_{1z} - n_2 e_{2z} + n_2 e_{3z} - n_1 e_{4z}$ .

**[0035]** Insbesondere bei der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform ist es natürlich auch möglich, die optische Weglänge nicht vom Startpunkt **12** bis zum Zielpunkt **14** zu berechnen, sondern den optischen Pfad in zwei Teilpfade aufzuteilen, von denen einer beispielsweise vom Startpunkt **12** zu einem Zwischenpunkt **30** führt, während der zweite vom Zwischenpunkt **30** zum Zielpunkt **14** führt. Auf diese Weise lassen sich optische Weglängen als Summe von optischen Teilweglängen formulieren. Es kommen die üblichen Regeln zur Rechnung mit Ableitungen zum Tragen.

#### Bezugszeichenliste

<b>2</b>	erster Verfahrensschritt
<b>4</b>	zweiter Verfahrensschritt
<b>6</b>	Prüfungsschritt
<b>8</b>	Schlusschritt
<b>10</b>	Iterationsschritt
<b>12</b>	Startpunkt
<b>14</b>	Zielpunkt
<b>16</b>	optisches Bauteil
<b>18</b>	erster eintreffender Strahl
<b>20</b>	erster abgehender Strahl
<b>22</b>	Spiegel
<b>24</b>	zweiter eintreffender Strahl
<b>26</b>	zweiter abgehender Strahl
<b>28</b>	Bauteilgruppe
<b>30</b>	Zwischenpunkt

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems, das durch n Parameter  $x_j$  mit den Werten  $x_j^{\text{Start}}$  beschrieben wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- Ermitteln von m optischen Pfaden  $f_i$ , die durch das simulierte optische System hindurchführen,
- Bestimmen eines Ist-Wertes  $OPL_i^{\text{Ist}}$  einer optischen Weglänge  $OPL_i$  für jeden optischen Pfad  $f_i$ ,
- Bestimmen einer Gesamtabweichung d der Ist-Werte  $OPL_i^{\text{Ist}}$  von vorbestimmten Sollwerten  $OPL_i^{\text{Soll}}$  der optischen Weglängen  $OPL_i$  und Vergleichen der Gesamtabweichung d mit einem vorbestimmten Maximalwert  $d_{\text{max}}$ ,
- für den Fall, dass die Gesamtabweichung d größer ist als der vorbestimmte Grenzwert  $d_{\text{max}}$ 
  - Auswählen von wenigstens einem Parameter  $x_i$ , der variiert werden soll,
  - Bestimmen einer Jacobimatrix J mit den Matrixelementen

$$J_{i,j} = \left. \frac{\partial OPL_i}{\partial x_j} \right|_{x_j^{\text{Start}}} \quad \text{und}$$

– Ermitteln einer Parameteränderung  $\Delta x_i$  durch das Lösen des Gleichungssystems

$$OPL_i^{\text{Soll}} = OPL_i^{\text{Ist}} + \sum_l J_{i,l} \Delta x_l$$

für alle i,

- Ersetzen der Werte  $x_i^{\text{Start}}$  der zu variiierenden Parameter durch  $x_i^{\text{Start}} + \Delta x_i$  und Wiederholen der Schritte a) bis e) bis die Gesamtabweichung d kleiner als der vorbestimmte Maximalwert  $d_{\text{max}}$  ist, wobei das simulierte optische System wenigstens ein optisches Bauteil (16) mit einer Oberfläche aufweist, durch die die optischen Pfade  $f_i$  hindurchtreten oder an der sie reflektiert werden und wobei zur Bestimmung von Matrixelementen die Relation

$$\frac{\partial OPL_i}{\partial x_l} = \sum_k s n_k e_{kx_l}$$

verwendet wird, wenn  $x_l$  eine Ortskoordinate wenigstens eines optischen Bauteils (16) und/oder einer Oberfläche ist, wobei

- k eine Teilstrecke des optischen Pfades  $f_i$  indiziert, die auf das wenigstens eine Bauteil (16) und/oder eine Oberfläche trifft oder das wenigstens eine Bauteil und/oder die Oberfläche verlässt,
- $n_k$  der Brechungsindex des Mediums ist, in dem sich die Teilstrecke k des optischen Pfades  $f_i$  erstreckt,
- $s = 1$  gilt, wenn die Teilstrecke k auf das jeweilige optische Bauteil (16) und/oder die Oberfläche trifft,

–  $s = -1$  gilt, wenn die Teilstrecke k das jeweilige optische Bauteil (16) und/oder die Oberfläche verlässt und

–  $e_{kx_l}$  die  $x_l$ -Komponente des Richtungsvektors der Teilstrecke k ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die optischen Pfade  $f_i$  jeweils einen vorbestimmten Startpunkt (12) mit jeweils einem vorbestimmten Zielpunkt (14) verbinden.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die n Parameter  $x_j$  Ortskoordinaten des wenigstens einen optischen Bauteils (16) und/oder Parameter wenigstens einer Oberfläche des wenigstens einen optischen Bauteils (16) enthalten.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für den Fall, dass ein Parameter  $x_l$  variiert werden soll, der keine Ortskoordinate des wenigstens einen optischen Bauteils (16) und/oder einer Oberfläche ist, zur Bestimmung von Matrixelementen die Relation

$$\frac{\partial OPL_i}{\partial x_l} = \frac{\partial OPL_i}{\partial x_r} \frac{\partial x_r}{\partial x_l}$$

verwendet wird, worin  $x_r$  eine Ortskoordinate wenigstens eines optischen Bauteils (16) und/oder einer Oberfläche ist.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Bestimmen der Jacobimatrix J lediglich die optischen Pfade  $f_i$  und parametrisierte Beschreibungen der wenigstens einen Oberfläche des wenigstens einen optischen Bauteils (16) verwendet werden.

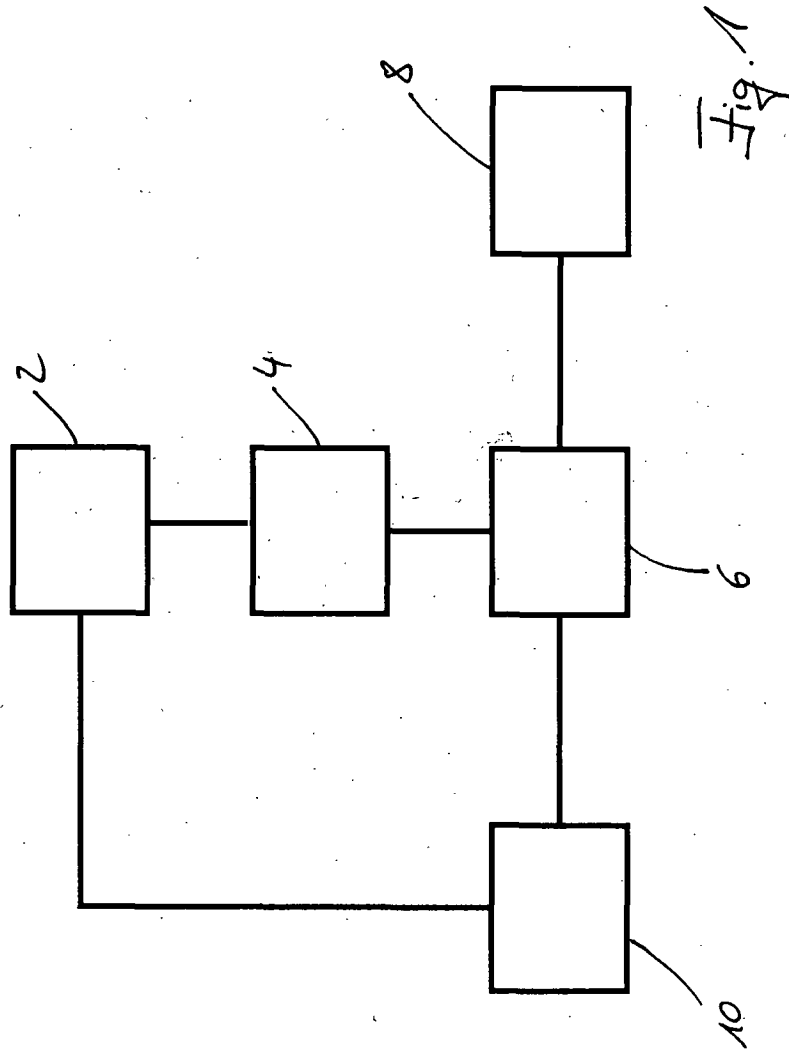
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sollwerte  $OPL_i^{\text{Soll}}$  der optischen Weglängen  $OPL_i$  an einem realen System gemessene Werte sind.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle zu variiierenden Parameter  $x_l$  Eigenschaften eines einzigen optischen Bauteils (16) beschreiben.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen



Anhängende Zeichnungen



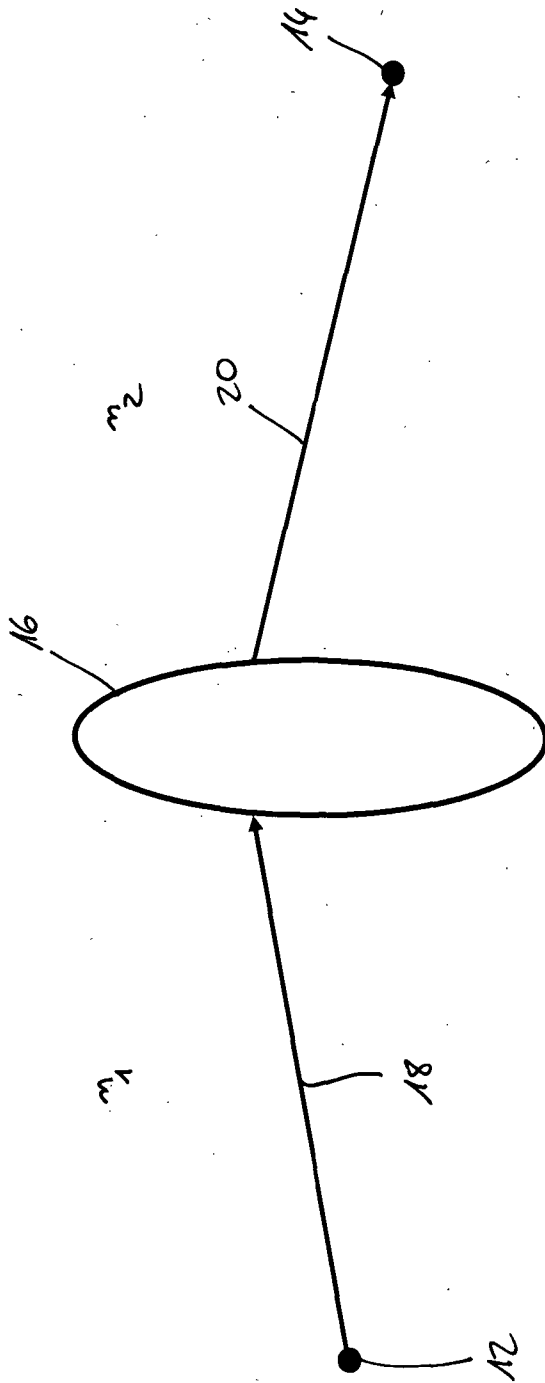
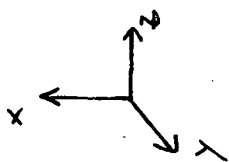


Fig. 2



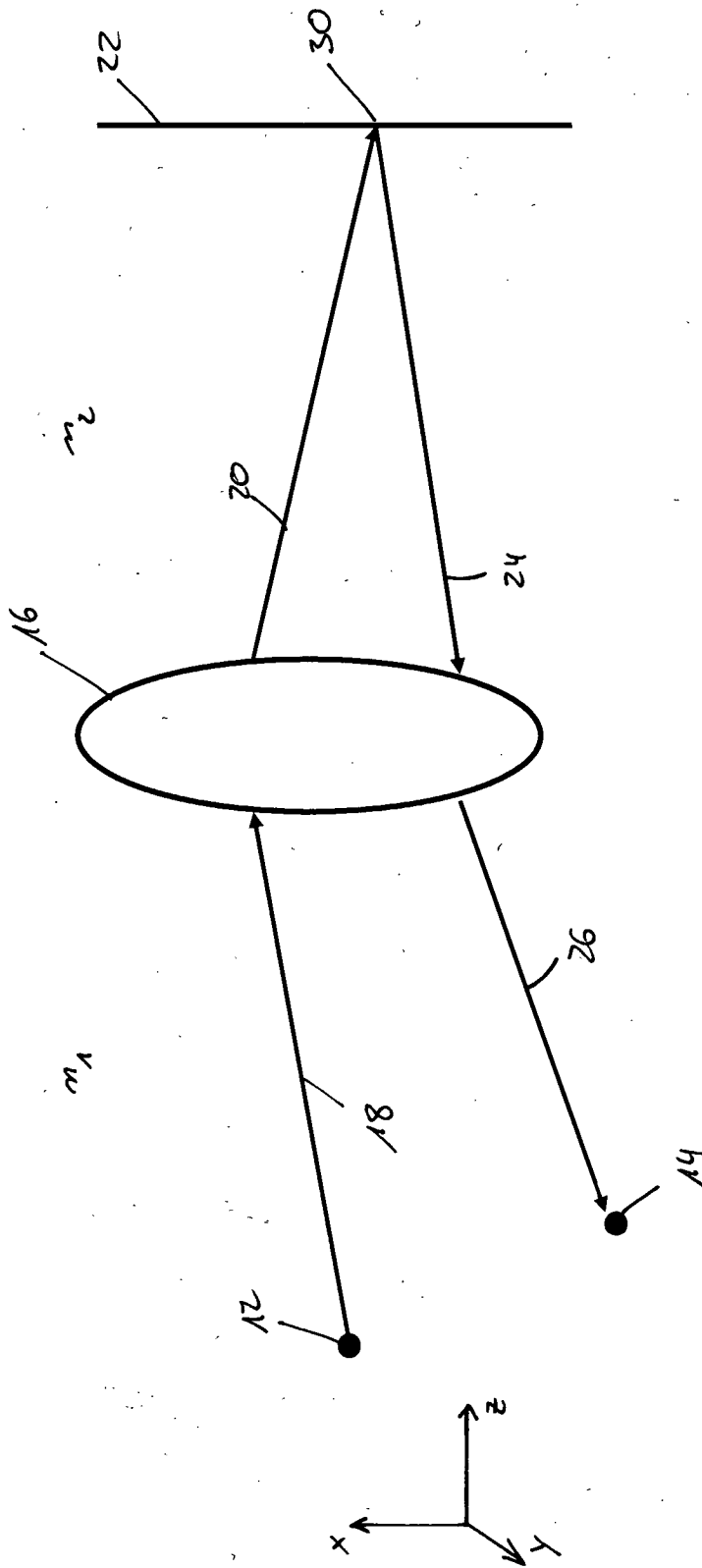


Fig. 3

