



(10) DE 10 2014 001 323 A1 2015.08.06

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2014 001 323.5
(22) Anmeldetag: 04.02.2014
(43) Offenlegungstag: 06.08.2015

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

(71) Anmelder:
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 GbR, 38122
Braunschweig, DE

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

(56) Ermittelter Stand der Technik:
DE 10 2006 057 606 A1

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)>.

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

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

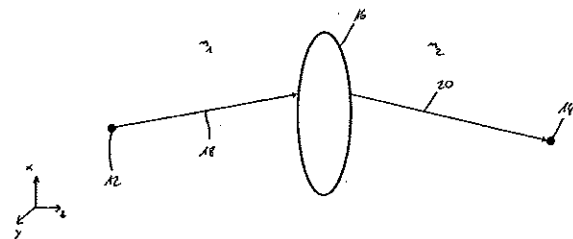
(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems, das durch n Parameter x_i mit den Werten x_i^{Start} beschrieben wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:
a) Ermitteln von m optischen Pfaden f_i durch das simulierte optische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

$$J_{i,i} = \left. \frac{\partial OPL_i}{\partial x_i} \right|_{x_i^{\text{Start}}}$$

und
– Ermitteln einer Parameteränderung Δx_i durch das Lösen des Gleichungssystems

$$OPL_i^{\text{Soll}} = OPL_i^{\text{Ist}} + \sum_i J_{i,i} \Delta x_i$$

für alle i .
e) Ersetzen der Werte x_i^{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_{max} ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems, das durch n Parameter x_j mit den Werten x_j^{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. 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] Das simulierte optische System wird durch n Parameter x_j bestimmt, die zunächst die Werte x_j^{Start} aufweisen. Diese Parameter können beispielsweise Ortskoordinaten und Positionen von optischen Bau-

teilen 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.

[0009] Ein Verfahren, bei dem die beschriebene Simulation zum Einsatz kommt, ist beispielsweise in der DE 10 2006 057 606 A1 offenbart.

[0010] 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.

[0011] 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^{Ist} einer optischen Weglänge OPL_i für jeden optischen Pfad f_i ,
- Bestimmen einer Gesamtabweichung d der Ist-Werte OPL_i^{Ist} von vorbestimmten Sollwerten OPL_i^{Soll} der optischen Weglängen OPL_i und Vergleichen der Gesamtabweichung d mit einem vorbestimmten Maximalwert d_{max} ,
- für den Fall, dass die Gesamtabweichung d größer ist als der vorbestimmte Grenzwert d_{max} :
 - Auswählen von wenigstens einem Parameter x_i , der variiert werden soll,
 - Bestimmen einer Jacobimatrix J mit dem Matrixelementen

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

und

- Ermitteln einer Parameteränderung Δx_i durch das Lösen des Gleichungssystems

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

für alle i

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

[0012] 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 Gesamt-

abweichung d , die mit einem vorbestimmten Grenzwert verglichen wird. Für den Fall, dass die Abweichung d kleiner als der vorbestimmte Maximalwert d_{max} ist, ist das simulierte optische System in ausreichender 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.

[0013] Dies geschieht durch Lösen des Gleichungssystems

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

für alle i , bei dem die Sollwerte OPL_i^{Soll} der optischen Weglängen sowie die Ist-Werte OPL_i^{Ist} der optischen Weglängen bekannt sind und das nach Δx_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.

[0014] 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.

[0015] 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 Δx_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 Δx_i 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.

[0016] 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.

[0017] In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens weist das simulierte optische System wenigstens ein optisches Bauteil mit einer Oberfläche auf, durch die optischen Pfade f_i hindurchtreten oder an der sie reflektiert werden. 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.

[0018] Vorteilhafterweise wird zur Bestimmung von Matrixelementen der Jacobimatrix J die Relation

$$\frac{\partial OPL_i}{\partial x_i} = \sum_k s n_k e_{kx_i}$$

verwendet, 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 eine Bauteil und/oder die Oberfläche trifft oder das wenigstens eine 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_i} ist dabei die Komponente des Richtungsvektors \vec{e}_k der Teilstrecke k in Richtung des Parameters x_i . n_k ist der Brechungsindex des Mediums, in dem die Teilstrecke k verläuft.

[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_{kx_i} folglich 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

$$\frac{\partial OPL_i}{\partial x_i} = \frac{\partial OPL_i}{\partial x_r} \frac{\partial x_r}{\partial x_i},$$

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 einen 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_{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

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

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

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

darstellt. Das Gleichungssystem wird nach Δx_i aufgelöst und die Parameter um jeweils dieses ausgerechnete Δx_i 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

$$\frac{\partial \text{OPL}}{\partial z} = n_1 e_{1z} - n_2 e_{2z}.$$

[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 $\frac{\partial \text{OPL}}{\partial z} = n_1 e_{1z} - n_2 e_{2z} + n_2 e_{3z} - n_1 e_{4z}$. 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 optischen Bauteils **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 $\frac{\partial \text{OPL}}{\partial z} = n_1 e_{1z} - n_2 e_{2z} + n_2 e_{3z} - n_1 e_{4z}$. 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

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

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102006057606 A1 [0009]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Optimieren eines simulierten optischen Systems, das durch n Parameter x_j mit den Werten x_j^{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^{Ist} einer optischen Weglänge OPL_i für jeden optischen Pfad f_i ,
- Bestimmen einer Gesamtabweichung d der Ist-Werte OPL_i^{Ist} von vorbestimmten Sollwerten OPL_i^{Soll} der optischen Weglängen OPL_i und Vergleichen der Gesamtabweichung d mit einem vorbestimmten Maximalwert d_{max} ,
- für den Fall, dass die Gesamtabweichung d größer ist als der vorbestimmte Grenzwert d_{max}
 - Auswählen von wenigstens einem Parameter x_i , der variiert werden soll,
 - Bestimmen einer Jacobimatrix J mit den Matrixelementen

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

und – Ermitteln einer Parameteränderung Δx_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^{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_{max} 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 Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das simulierte optische System wenigstens ein optisches Bauteil **16** mit einer Oberfläche aufweist, durch die optischen Pfade f_i hindurchtreten oder an der sie reflektiert werden.

4. 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 wenigstens eines optischen Bauteils **16** enthalten.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass 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.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass für den Fall, dass ein Parameter x_l variiert werden soll, der keine Ortskoordinate wenigstens eines 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.

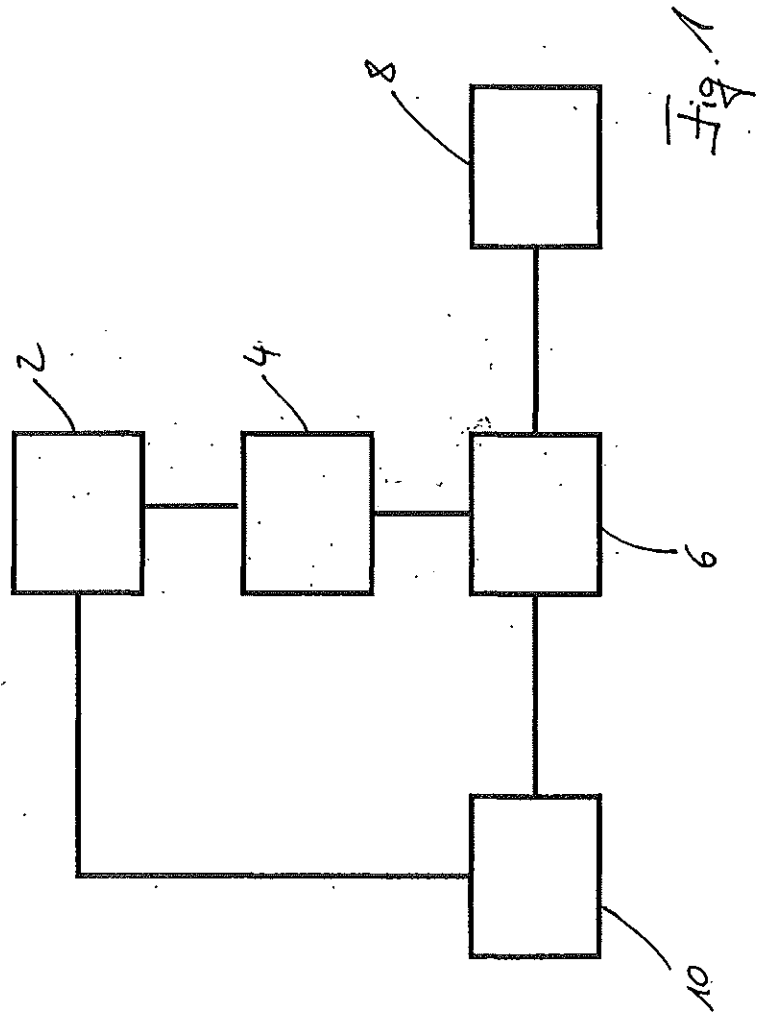
7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Bestimmen der Jacobimatrix J lediglich die optischen Pfade f_i und parametrisierte Beschreibungen der wenigstens einer Oberfläche des wenigstens einen optischen Bauteils **16** verwendet werden.

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

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle zu variiierenden Parameter x_i Eigenschaften eines einzigen optischen Bauteils **16** beschreiben.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



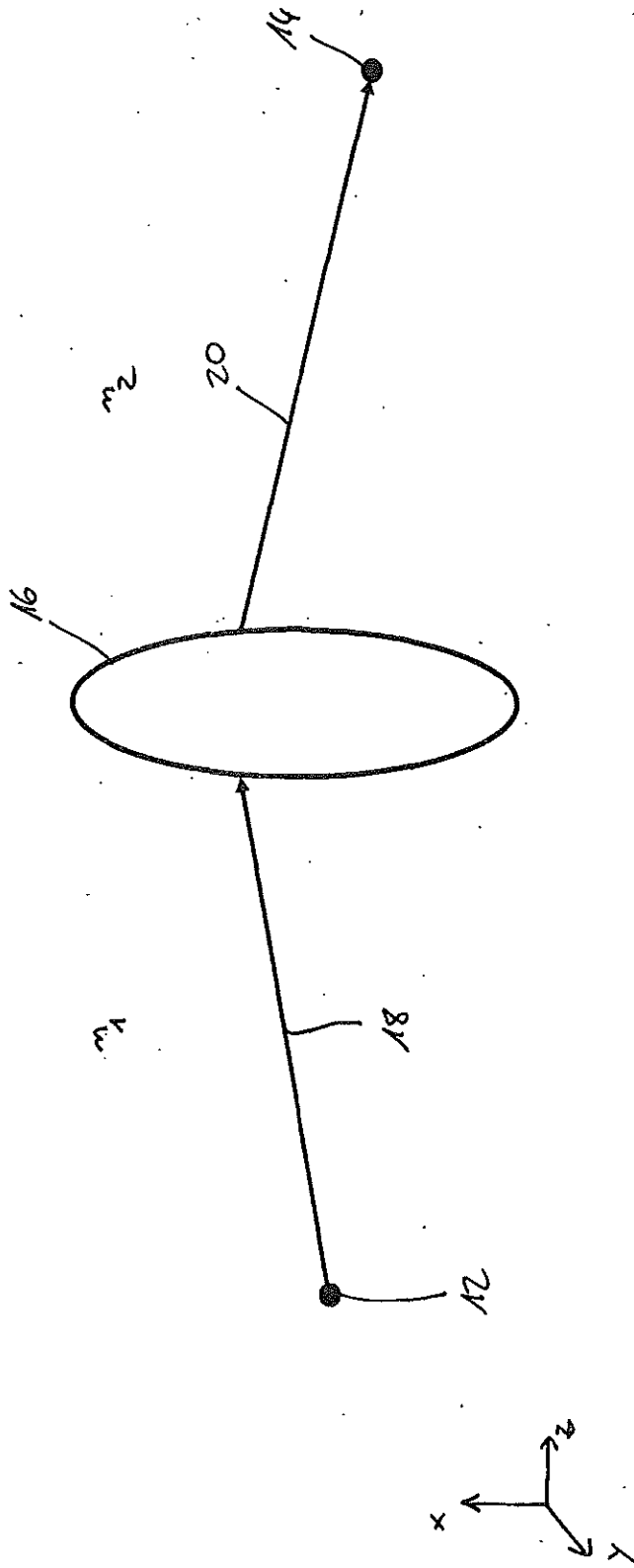


Fig. 2

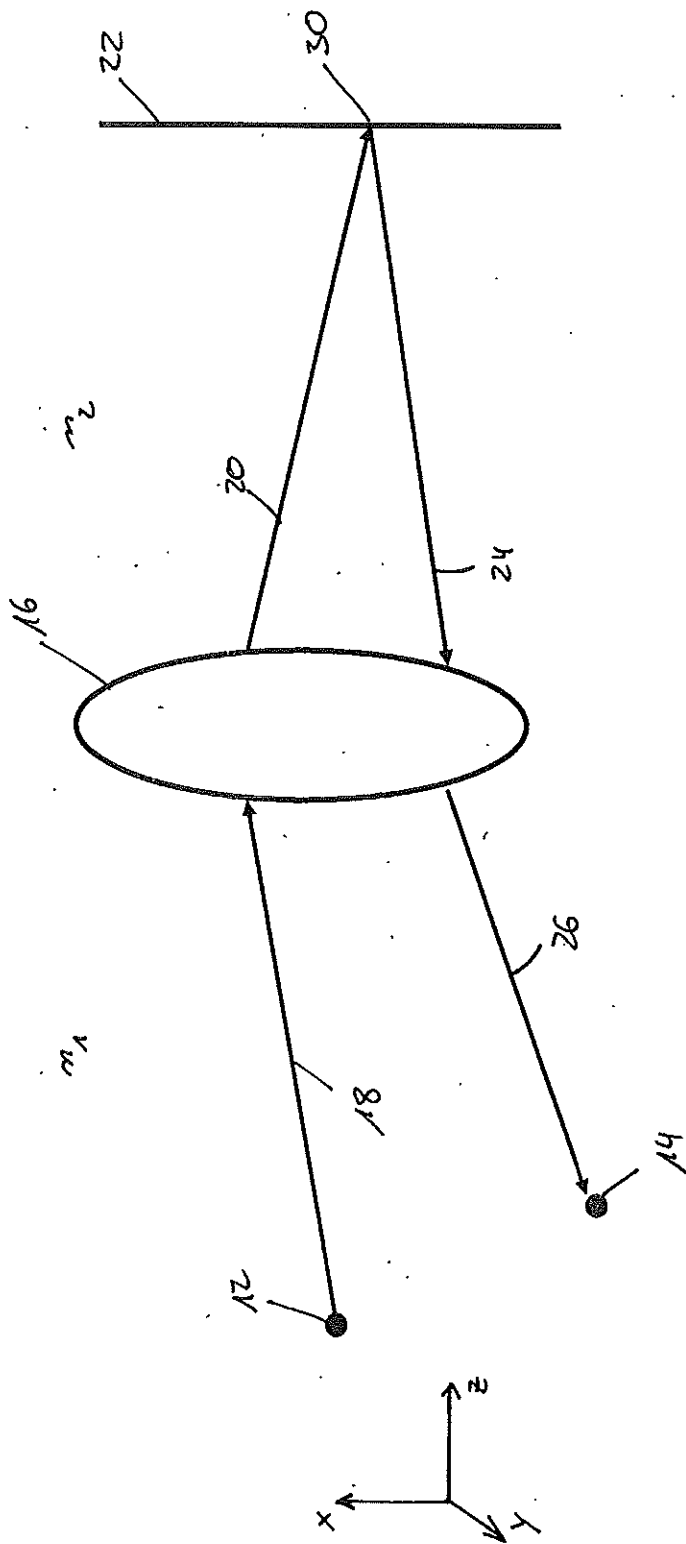


Fig. 3

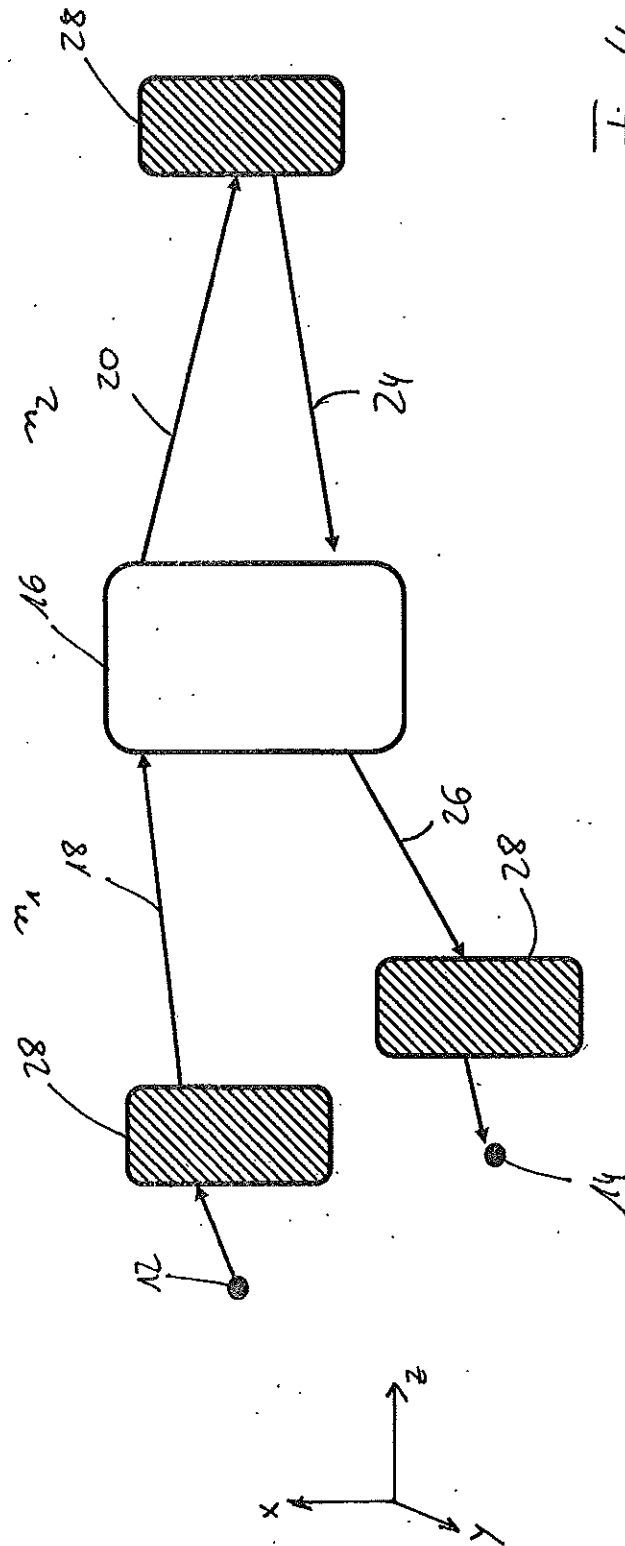


Fig. 4