



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 004 005.4**

(22) Anmeldetag: **19.03.2014**

(43) Offenlegungstag: **02.10.2014**

(51) Int Cl.: **G01M 11/00** (2006.01)

(30) Unionspriorität:  
**2013-063405**      **26.03.2013**    **JP**

(74) Vertreter:  
**Dr. Weser & Kollegen, 81245 München, DE**

(71) Anmelder:  
**CANON KABUSHIKI KAISHA, Tokyo, JP**

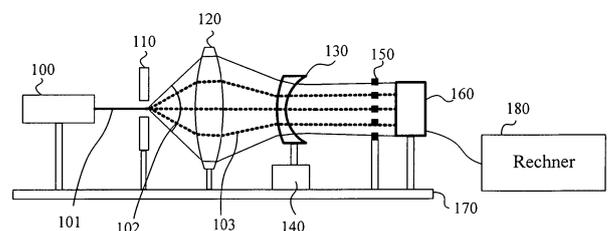
(72) Erfinder:  
**Kato, Seima, Tokyo, JP**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Wellenfrontmessung und Herstellverfahren für ein optisches Element**

(57) Zusammenfassung: Das Wellenfrontaberration-Messverfahren beinhaltet Messen (S11) mittels eines Lichtempfangssensors (160) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (130) transmittiert oder von diesem reflektiert wird, Berechnen (S12) einer ersten Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist, und Berechnen (S14, S15) einer zweiten Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Messlichts zum Lichtempfangssensor. Das Verfahren umfasst weiterhin Berechnen (S16, S19) einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Differentialwellenfront.



**Beschreibung**

Hintergrund der Erfindung

Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Messmethode zum Messen einer Wellenfrontaberration eines auszumessenden Objekts wie beispielsweise eine Optik bzw. Optikelement.

Beschreibung der einschlägigen Technik

**[0002]** Als Verfahren zum Messen einer Wellenfront von Licht, das durch ein Optikelement als auszumessendes Objekt (im Folgenden einfach als "ein Objekt" bezeichnet) transmittiert oder von diesem reflektiert wird, sind Messverfahren unter Verwendung eines Talbot-Interferometers und eines Shack-Hartmann-Sensors herkömmlich bekannt. Berechnen einer Differenz zwischen einem mittels eines dieser Messverfahren erhaltenen Messergebnis und einem Designwert für die Aberration des Optikelements ermöglicht eine Messung einer Wellenfrontaberration, die der Aberration des Optikelements entspricht.

**[0003]** Die Japanische Patentoffenlegungsschrift Nr. 2010-151578 offenbart ein Verfahren zum Messen einer Aberration eines Objektes ausgehend von einer Differenz (d. h. Wellenfrontaberration) zwischen einem mittels Talbot-Interferometer oder Shack-Hartmann-Sensor gemessenen Messwert für eine Wellenfront und einem Wert für eine Referenzwellenfront. Außerdem offenbart sie ein Verfahren zum Berechnen der Referenzwellenfront mittels einer optischen Weglänge, die berechnet wurde unter Verwendung eines Referenzobjekts, dessen Form und Brechungsindexverteilung bekannt sind.

**[0004]** Die mittels der optischen Weglänge berechnete Referenzwellenfront weist jedoch, wenn die Wellenfront keine ebene Form besitzt, eine Differenz zu dem durch das Talbot-Interferometer oder den Shack-Hartmann-Sensor gemessenen Messwert der Wellenfront auf. Diese Differenz kann man leicht durch numerische Ausdrücke erklären, wenn die Wellenfront eine sphärische Wellenfront ist. Zum Beispiel: eine in **Fig. 10** gezeigte optische Weglänge  $W_s$  von einer Punktlichtquelle zu einer Sensoroberfläche, die eine ebene Oberfläche ist, kann man durch folgenden Ausdruck (1) ausdrücken, wobei  $L$  für eine Entfernung von der Punktlichtquelle zur Sensoroberfläche steht, und  $r$  für eine Entfernung (Radius) von einem Mittelpunkt der Sensoroberfläche steht:

$$W_s = \sqrt{L^2 - r^2} - L \sim \frac{r^2}{2L} - \frac{r^4}{8L^3} + \frac{r^6}{16L^5} \dots (1)$$

**[0005]** Andererseits: wenn man Messungen einer Wellenfront von Licht vom selben Objekt mittels des Talbot-Interferometers und des Shack-Hartmann-Sensors vornimmt, misst man in beiden Messungen Streifen oder helle Punkte in gleichen Abständen. Da eine Differentialwellenfront, die ein Differentialwert bzw. ein differentieller Wert dieser gemessenen Wellenfront ist, eine schiefe (tilted) Wellenfront ist, ist die gemessene Wellenfront  $W_m$  durch die folgende quadratische Funktion in  $r$  gegeben (Ausdruck (2)):

$$W_m = \frac{r^2}{2L} \dots (2)$$

**[0006]** Die durch Ausdruck (1) gegebene optische Weglänge  $W_s$  und die durch Ausdruck (2) gegebene gemessene Wellenfront  $W_m$  stimmen nur miteinander überein, wenn die Entfernung  $L$  unendlich ist, d. h. Licht vom Objekt kollimiertes Licht ist, und weisen andererseits eine Differenz voneinander auf, wenn die Entfernung  $L$  nicht unendlich ist.

**[0007]** Eine solche Differenz ist schwierig durch numerische Ausdrücke ausdrückbar, wenn die gemessene Wellenfront eine asphärische Fläche ist, sodass man die Differenz nicht leicht korrigieren kann. Daher kann bei Berechnung der Referenzwellenfront mittels der Lichtweglänge der Fall auftreten, dass man die genaue Differenz zwischen der gemessenen Wellenfront und der Referenzwellenfront nicht erhalten kann, was insoweit ein Problem ist, als die Messgenauigkeit für die Wellenfrontaberration abnimmt.

Zusammenfassung der Erfindung

**[0008]** Die vorliegende Erfindung sieht ein Wellenfrontaberration-Messverfahren und eine Wellenfrontaberration-Messvorrichtung vor, die jeweils eine genaue Wellenfrontaberration erfassen können, und sieht weiterhin ein Optik-Herstellungsverfahren vor, welches das Wellenfrontaberration-Messverfahren verwendet.

**[0009]** Die vorliegende Erfindung in ihrem ersten Aspekt sieht ein Wellenfrontaberration-Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6 vor.

**[0010]** Die vorliegende Erfindung in ihrem zweiten Aspekt sieht ein Wellenfrontaberration-Messverfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11 vor.

**[0011]** Die vorliegende Erfindung in ihrem dritten Aspekt sieht ein Optik-Herstellungsverfahren nach Anspruch 12 vor.

**[0012]** Die vorliegende Erfindung in ihrem dritten Aspekt sieht auch ein Optik-Herstellungsverfahren nach Anspruch 13 vor.

**[0013]** Die vorliegende Erfindung in ihrem zweiten Aspekt sieht auch eine Wellenfrontaberration-Messvorrichtung nach Anspruch 14 vor.

**[0014]** Die vorliegende Erfindung in ihrem zweiten Aspekt sieht auch eine Wellenfrontaberration-Messvorrichtung nach Anspruch 15 vor.

**[0015]** Weitere Merkmale der vorliegenden Erfindung werden anhand der folgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen (unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen) deutlich.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0016]** Fig. 1 zeigt eine Konfiguration einer Wellenfrontaberration-Messvorrichtung nach Ausführungsform 1 der vorliegenden Erfindung.

**[0017]** Fig. 2 ist ein Flussdiagramm, das einen Ablauf zum Berechnen einer Wellenfrontaberration in Ausführungsform 1 zeigt.

**[0018]** Fig. 3 zeigt schematisch ein Messverfahren in Ausführungsform 1.

**[0019]** Fig. 4 zeigt schematisch eine Berechnung einer Referenzwellenfront in Ausführungsform 1.

**[0020]** Fig. 5 zeigt eine Konfiguration einer Wellenfrontaberration-Messvorrichtung nach Ausführungsform 2 der vorliegenden Erfindung.

**[0021]** Fig. 6 zeigt einen Shack-Hartmann-Sensor.

**[0022]** Fig. 7 ist ein Flussdiagramm, das einen Ablauf zum Berechnen einer Wellenfrontaberration in Ausführungsform 2 zeigt.

**[0023]** Fig. 8 ist ein Flussdiagramm, das einen Ablauf zum Berechnen einer Wellenfrontaberration in Ausführungsform 3 zeigt.

**[0024]** Fig. 9 ist ein Flussdiagramm, das einen Herstellungsvorgang zeigt zum Herstellen einer Optik unter Verwendung einer in einer der Ausführungsformen erfassten Wellenfrontaberration, was Ausführungsform 4 der vorliegenden Erfindung entspricht.

**[0025]** Fig. 10 zeigt eine optische Weglänge.

Beschreibung der Ausführungsformen

**[0026]** Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung sind nachstehend unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben.

**[0027]** In den folgenden Ausführungsformen bedeutet "eine Messwellenfront" bzw. „eine gemessene Wellenfront" eine Wellenfront vom messenden Licht ("Messlicht"), welche erhalten wird durch Messung des durch ein auszumessendes Objekt transmittierten oder von diesem reflektierten Messlichts unter Verwendung eines Lichtempfangssensors als Wellenfrontsensor (im Folgenden auch einfach als "ein Sensor" bezeichnet), durch Analyse eines vom Sensor erhaltenen Signals, und dann durch Wiederherstellen. "Das auszumessende Objekt" ist eine Optik bzw. ein Optikelement (z. B. eine Linse), das eine asphärische Fläche oder eine sphärische Fläche als auszumessende Fläche besitzt. Das auszumessende Objekt wird im Folgenden einfach als "ein Objekt" bezeichnet. Andererseits ist "ein (auszumessendes) Referenzobjekt" ein Objekt mit derselben Form wie diejenige eines entworfenen Objekts (d. h. mit einer Form, die als Referenz für diejenige des Objekts dient) und dessen Form bekannt ist. Weiterhin bedeutet "eine Referenzwellenfront" eine optische Weglängenverteilung, die für Referenzlicht gemessen oder berechnet wird, das durch das an einer bekannten Position angeordnete Referenzobjekt transmittiert oder von diesem reflektiert wird. Ferner wird eine Differenz zwischen der Messwellenfront und der Referenzwellenfront als "eine Wellenfrontaberration" bezeichnet.

#### Ausführungsform 1

**[0028]** Fig. 1 zeigt eine Konfiguration einer Wellenfrontaberration-Messvorrichtung nach einer ersten Ausführungsform (Ausführungsform 1) der vorliegenden Erfindung. Die Messvorrichtung projiziert Licht von einer Lichtquelle **100** auf ein Objekt **130** und misst eine transmittierte Wellenfront, die eine Wellenfront des durch das Objekt **130** transmittierten Lichts ist (im Folgenden auch als "eine transmittierte Wellenfront des Objekts **130**" bezeichnet), unter Verwendung eines den oben erwähnten Wellenfrontsensor beinhaltenden Detektors **160**. Dann berechnet die Messvorrichtung an ihrem durch einen Computer gebildeten Rechner **180** eine Wellenfrontaberration des Objekts **130** mittels eines Signals vom Detektor **160**. In dieser Ausführungsform wird als Messsystem zum Messen der transmittierten Wellenfront ein Talbot-Interferometer verwendet. Der Rechner **180** dient als Differentialwellenfront-Rechner, Korrekturereinrichtung und Wellenfrontaberration-Rechner.

**[0029]** Ein von einem Laser wie etwa einem He-Ne-Laser als die Lichtquelle **100** entlang einer optischen Achse (d. h. in Richtung einer optischen Achse) emittiertes Laserstrahlenbündel **101** wird beim Durchlaufen einer Lochblende **110** gebeugt. Das an der Lochblende **110** gebeugte Laserstrahlenbündel (Licht) **102** wird durch eine Kollimatorlinse **120** in konvergentes Licht **103** umgewandelt und durch das Objekt **130** transmittiert. Das durch das Objekt **130** transmittierte Licht durchläuft ein senkrecht angeordnetes Beugungsgitter **150**, das ein zweidimensionales Beugungsgitter ist, und wird durch den Detektor **160** aufgenommen (gemessen). Ein Durchmesser  $\phi$  der Lochblende **110** ist so klein, dass man das gebeugte Licht **102** als eine ideale sphärische Welle ansehen kann, und die Lochblende **110** ist so ausgelegt, dass der folgende Ausdruck (3) erfüllt wird, wobei NAO für eine objektseitige numerische Apertur und  $\lambda$  für eine Wellenlänge des Lasers (Lichtquelle) **100** steht:

$$\phi \approx \frac{\lambda}{NAO} \quad (3)$$

**[0030]** Wenn die Wellenlänge  $\lambda$  600 nm beträgt und die objektseitige numerische Apertur NAO ungefähr 0,3 beträgt, ist es ausreichend, dass der Durchmesser  $\phi$  der Lochblende **110** ungefähr 2  $\mu\text{m}$  beträgt. Anstatt der Lochblende **110** kann man ein Faserausgangsende benutzen. Wenn eine bildseitige numerische Apertur des Objekts **130** klein ist, erfüllt eine Entfernung  $Z$  zwischen dem Beugungsgitter **150** und dem Detektor **160** (die Entfernung  $Z$  wird im Folgenden als "eine Talbot-Entfernung" bezeichnet) eine durch folgenden Ausdruck (4) dargestellte Talbot-Bedingung; man erhält ein Talbot-Unterbild des Beugungsgitters **150** als Interferenzstreifen auf dem Detektor **160**.

$$\frac{Z_0 Z}{Z_0 - Z} = \frac{mp^2}{\lambda} \dots (4)$$

**[0031]** Im Ausdruck (4) steht  $m$  für eine ganze Zahl außer 0,  $p$  steht für eine Periode (Gitterabstand) des Beugungsgitters **150**,  $Z_0$  steht für eine Entfernung zwischen dem Beugungsgitter **150** und einer Fokusposition von ins Beugungsgitter **150** eintretendem Licht. Der Gitterabstand  $p$  des Beugungsgitters **150** wird in Abhängigkeit vom Ausmaß der Aberration des Objekts **130** entschieden.

**[0032]** Das Objekt **130** ist auf einem Parallelexzentermechanismus **140** (parallel eccentric mechanism) angeordnet und ist durch den Parallelexzentermechanismus **140** in Richtung der optischen Achse sowie in Richtungen senkrecht zur Richtung der optischen Achse bewegbar. Die Kollimatorlinse **120**, das Beugungsgitter **150** und der Detektor **160** (Parallelexzentermechanismus **140**) sind bewegbar in Bezug zueinander auf einer auf

einem Schwingungsdämpfertisch **170** bereitgestellten und sich in Richtung der optischen Achse erstreckenden Schiene angeordnet.

**[0033]** Bei der Messung der transmittierten Wellenfront des Objekts **130** berechnet der Rechner **180** eine optimale Anordnung vom Objekt **130**, dem Beugungsgitter **150** und dem Detektor **160** auf Basis einer Brechkraft des Objekts **130**. Das Objekt **130**, das Beugungsgitter **150** und Detektor **160** werden zu Positionen bewegt, die der berechneten Anordnung entsprechen. Das Objekt **130** wird auf dem Parallelexzentermechanismus **140** bewegt, und das Beugungsgitter **150** und der Detektor **160** werden auf der oben erwähnten Schiene bewegt. Die optimale Anordnung ist hierbei eine Anordnung, in der das durch das Objekt **130** transmittierte Licht (Lichtstrom) im Detektor **160** fokussiert wird und eine numerische Apertur NA des Lichtstroms klein wird.

**[0034]** Obwohl **Fig. 1** den Fall zeigt, in dem das Objekt **130** eine Konkavlinse ist, sollte, wenn das Objekt **130** ein Konvexlinse ist, das Objekt **130** auf einer Detektorseite derart weiter als ein Fokuspunkt der Kollimatorlinse **120** angeordnet sein, dass divergentes Licht ins Objekt **130** eintritt. Das Entscheiden einer optimalen Anordnung vom Objekt **130**, dem Beugungsgitter **150** und dem Detektor **160** (diese werden im Folgenden als "Elemente" bezeichnet) durch den Rechner **180** und das Anordnen der Elemente in der optimalen Anordnung werden kollektiv auch als "Anordnungseinstellung" bezeichnet.

**[0035]** **Fig. 2** zeigt einen Ablauf eines Vorgangs (Wellenfrontaberration-Messverfahren) zum Berechnen der Wellenfrontaberration des Objekts **130** unter Verwendung eines durch den Detektor **160** aufgenommenen Bilds. Dieser Rechenvorgang wird durch den in **Fig. 1** gezeigten Rechner (Computer) **180** gemäß einem Computerprogramm durchgeführt.

**[0036]** Der Rechner **180** berechnet eine Messwellenfront in den Schritten S11–S16 und eine Referenzwellenfront in den Schritten S17 und S18. Man kann entweder die Messwellenfront oder die Referenzwellenfront zuerst berechnen.

**[0037]** Zuerst wird die Berechnung der Referenzwellenfront beschrieben. In dieser Ausführungsform wird die Referenzwellenfront mittels Raytracing berechnet. Zunächst wird die Form und Position des Referenzobjekts eingestellt, und Positionen identisch zu denen der Elemente (einschließlich dem Referenzobjekt an Stelle des Objekts **130**) in der in **Fig. 1** gezeigten Messvorrichtung werden in den Rechner **180** eingegeben. In Schritt S17 führt der Rechner **180** das Raytracing für mehrere optische Wege des Referenzlichts (Strahlen) durch, die aus der Lochblende **110** austreten und eine Lichtempfangende Oberfläche (im Folgenden als "eine Sensoroberfläche" bezeichnet) des Wellenfrontsensors im Detektor **160** erreichen, die in **Fig. 1** gezeigt sind, und berechnet Längen der jeweiligen optischen Wege (die Länge wird im Folgenden als "eine optische Weglänge" bezeichnet). Als nächstes setzt in Schritt S18 der Rechner **180** eine Verteilung (Abbildung) der auf der Sensoroberfläche erhaltenen optischen Weglängen als die Referenzwellenfront fest.

**[0038]** Die Messwellenfront wird andererseits wie folgt berechnet. Zuerst bewirkt die Messvorrichtung in Schritt S11, nachdem die Anordnungseinstellung der Elemente abgeschlossen ist, dass das Laserstrahlenbündel **101** von der Laser-Lichtquelle **100** die Lochblende **110** und die Kollimatorlinse **120** durchläuft und dadurch bewirkt, dass konvergentes Licht **103** ins Objekt **130** eintritt. Dann in diesem Schritt beschafft der Rechner **180** vom Detektor **160** ein Bild von Interferenzstreifen, die durch Messlicht vom Objekt **130** auf der Sensoroberfläche des Detektors **160** gebildet werden (d. h. eine Intensitätsverteilung des Messlichts auf der Sensoroberfläche). Danach, in Schritt S12, analysiert der Rechner **180** die beschafften Interferenzstreifen und berechnet eine Scherwellenfront (shear wavefront) als Differentialwellenfront (die einer ersten Differentialwellenfront oder einer gemessenen Differentialwellenfront ("Mess-Differentialwellenfront") entspricht).

**[0039]** Die Scherwellenfront wird durch ein FFT(Schnelle Fourier-Transformation, FFT für engl. Fast Fourier Transform)-Verfahren berechnet. Wellenfront-Wiederherstellung durch das FFT-Verfahren nutzt eine Eigenschaft der Aberration, die einen Trägerstreifen des Interferenzstreifens stört, um den Trägerstreifen und die Aberration voneinander zu trennen. Insbesondere führt der Rechner **180** eine zweidimensionale FFT an den Interferenzstreifen durch, um diese in ein Frequenzbild umzuwandeln. Als nächstes schneidet der Rechner **180** nur einen Teil des Frequenzbildes nahe einer Trägerfrequenz ab, führt eine Koordinatentransformation so durch, dass die Trägerfrequenz zum Ursprung wird, und führt dann daran eine iFFT (inverse FFT) durch, wodurch ein Phasenterm eines komplexen Amplitudenbilds erhalten wird. Ein daraus resultierendes Phasenbild ist die Scherwellenfront.

**[0040]** Als nächstes berechnet der Rechner **180** in Schritt S13 Einfallswinkel  $\theta$  des den Detektor **160** erreichenden Messlichts (Strahlen) aus der Scherwellenfront unter Verwendung des folgenden Ausdrucks (5):

$$\tan \theta = \frac{\Delta W_x}{s} \cos \phi + \frac{\Delta W_y}{s} \sin \phi$$

$$\begin{cases} \phi = \arctan(y/x) \\ \Delta W_x = W(x-s, y) - W(x, y) \\ \Delta W_y = W(x, y-s) - W(x, y) \end{cases} \dots (5)$$

wobei x und y für Koordinaten auf dem Detektor **160** stehen, W für eine Wellenfront steht,  $\Delta W_x$  und  $\Delta W_y$  für eine X-Scherwellenfront und eine Y-Scherwellenfront stehen, und s für einen Scherwert steht. Im Folgenden wird Ausdruck (5) zum Berechnen der Einfallswinkel  $\theta$  der Strahlen aus der Scherwellenfront beschrieben. **Fig. 3** zeigt schematisch ein Talbot-Interferometer für eine divergente Welle. In einem System von divergenten Wellen ohne Aberration ist eine Periode  $p'$  von auf einer Sensoroberfläche erhaltenen Interferenzstreifen durch folgenden Ausdruck (6) gegeben, wobei p für einen Gitterabstand p eines Beugungsgitters steht, L für eine Entfernung von einer Punktlichtquelle zur Sensoroberfläche steht, und  $L_t$  für eine Entfernung vom Beugungsgitter zur Sensoroberfläche steht:

$$p' = \frac{L}{L-t} p \quad (6)$$

**[0041]** Mittels Ausdruck (6) sind eine Frequenz F der Interferenzstreifen, der Scherwert s und  $\tan \theta$  durch folgende Ausdrücke (7) gegeben, wobei D für eine Größe der Sensoroberfläche steht:

$$\begin{cases} F = \frac{D}{p'} \\ s = \frac{\lambda}{p} L_t \\ \tan \theta = \frac{r}{L} \end{cases} \dots (7)$$

**[0042]** Wenn die Wellenfront in einem Bereich kleiner als der Scherwert als konstant angenommen wird, kann man die Scherwellenfront  $\Delta W$  mittels der folgenden Ausdrücke (8) von Differentialwellenfronten ausdrücken:

$$\Delta W_r = s \frac{\partial W}{\partial r}, \Delta W_x = s \frac{\partial W}{\partial x}, \Delta W_y = s \frac{\partial W}{\partial y} \quad (8)$$

wobei  $\Delta W_r$  für eine Scherwellenfront in einer r-Richtung steht, und eine r-Differentialwellenfront ( $\partial W / \partial r$ ), eine x-Differentialwellenfront ( $\partial W / \partial x$ ) sowie eine y-Differentialwellenfront ( $\partial W / \partial y$ ) eine durch folgenden Ausdruck (9) dargestellte Beziehung aufweisen:

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{\partial W}{\partial x} \cos \phi + \frac{\partial W}{\partial y} \sin \phi \quad (9)$$

**[0043]** In einem kleinen Flächenbereich um eine Position, bei der ein Radius von der optischen Achse auf der Sensoroberfläche r beträgt, kann man die Frequenz der Interferenzstreifen als konstant ansehen, sodass man die Scherwellenfront  $\Delta W_r$  durch folgenden Ausdruck (10) ausdrücken kann:

$$\Delta W_r = \left(\frac{D}{p} - F\right) \frac{L}{p} \lambda = \frac{1}{p} L_t \frac{L}{L-t} = \tan \theta \quad (10)$$

**[0044]** Mittels der obigen Ausdrücke (8) bis (10) kann man Ausdruck (5) erhalten.

**[0045]** Die Abfolge der Schritte S14 und S15 bildet einen Korrekturschritt. Der die Einfallswinkel  $\theta$  der den Detektor **160** (Sensoroberfläche) erreichenden Strahlen wie oben erwähnt berechnende Rechner **180** berechnet in Schritt S14 einen Korrekturwert C für die Scherwellenfront unter Verwendung von jedem der Einfallswinkel  $\theta$ .

**[0046]** Der Korrekturwert C wird durch ein Verhältnis zwischen der Differentialwellenfront (Scherwellenfront) der Messwellenfront und einer Differentialwellenfront der Referenzwellenfront definiert. Der Rechner **180** berechnet den Korrekturwert C wie folgt. Zuerst berechnet der Rechner **180** eine Beziehung zwischen der Differentialwellenfront und dem Einfallswinkel jeweils für die Messwellenfront und die Referenzwellenfront.

**[0047]** Die Beziehung zwischen der Differentialwellenfront der Messwellenfront und dem Einfallswinkel des Strahls wird durch folgenden aus Ausdrücken (8) und (10) erhaltenen Ausdruck (11) dargestellt. In Ausdruck (11) wird die Differentialwellenfront der Messwellenfront durch Hinzufügen eines Indexes M zu  $\partial W/\partial r$  ausgedrückt.

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_M = \tan \theta \dots (11)$$

**[0048]** Andererseits kann man die Beziehung zwischen der Differentialwellenfront der Referenzwellenfront und dem Einfallswinkel des Strahls wie folgt berechnen. Die Differentialwellenfront der Referenzwellenfront wird im Folgenden durch Hinzufügen eines Indexes S zu  $\partial W/\partial r$  ausgedrückt. **Fig. 4** zeigt schematisch ein Verfahren zum Berechnen der Differentialwellenfront der Referenzwellenfront.

**[0049]** In **Fig. 4** befinden sich zwei Punkte P und Q sehr nahe zueinander auf der Sensoroberfläche, und die Strahlen 1 bzw. 2 erreichen die Punkte P und Q. Die Strahlen 1 bzw. 2 bilden Winkel  $\theta$  und  $\theta + \Delta\theta$  mit der optischen Achse. Ein Punkt R ist ein Schnittpunkt einer den Punkt P durchlaufenden Fläche gleicher Phase mit dem Strahl 2. Die Differentialwellenfront der Referenzwellenfront ist durch folgenden Ausdruck (12) gegeben:

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_S = \lim_{PQ \rightarrow 0} \frac{RQ}{PQ} \dots (12)$$

wobei PQ bzw. RQ für die Längen der Strecken PQ bzw. RQ stehen.

**[0050]** Wenn Winkel RPQ den Wert  $\theta + \delta\theta$  hat, hat Winkel QRP den Wert  $\pi/2 + \Delta\theta - \delta\theta$ .

**[0051]** Eine durch folgenden Ausdruck (13) dargestellte Beziehung kann man aus einem Sinustheorem herleiten, und die Differentialwellenfront der Referenzwellenfront kann man mittels Ausdruck (12) und (13) als Ausdruck (14) erhalten.

$$\frac{RQ}{\sin(\theta + \delta\theta)} = \frac{PQ}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \Delta\theta - \delta\theta\right)} \dots (13)$$

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_S = \lim_{PQ \rightarrow 0} \frac{RQ}{PQ} = \lim_{\substack{\Delta\theta \rightarrow 0 \\ \delta\theta \rightarrow 0}} \frac{\sin(\theta + \delta\theta)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \Delta\theta - \delta\theta\right)} = \sin \theta \dots (14)$$

**[0052]** Der Korrekturwert C wird unter Verwendung der Differentialwellenfront der Messwellenfront und der Differentialwellenfront der Referenzwellenfront als deren Verhältnis wie durch folgenden Ausdruck (15) dargestellt berechnet. In diesem Fall ist der Korrekturwert C ein Richtungskosinus des Einfallswinkels  $\theta$  des Strahls. Ein Grund für die Änderung des Korrekturwerts C in Abhängigkeit vom Einfallswinkel  $\theta$  des Strahls ist, dass eine große Differenz zwischen dem Referenzobjekt und dem Objekt **130** eine Differenz verursacht zwischen dem aus der Referenzwellenfront berechneten Einfallswinkel des Strahls und dem beim Ausmessen des Objekts **130** erhaltenen Einfallswinkel des Strahls, wodurch ein Fehler des Korrekturwerts C verursacht wird.

$$C = \frac{\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_S}{\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_M} = \cos \theta \dots (15)$$

**[0053]** Als nächstes führt der Rechner **180** in Schritt S15 an der gemessenen Scherwellenfront (erste Differentialwellenfront) einen Korrekturvorgang abhängig vom Einfallswinkel  $\theta$  des Messlichts zur Sensoroberfläche durch, um eine korrigierte Scherwellenfront (zweite Differentialwellenfront) zu berechnen, die eine Scherwel-

lenfront nach dem Korrekturvorgang ist. Insbesondere multipliziert der Rechner **180** die gemessene Scherwellenfront mit dem Korrekturwert C, um die korrigierte Scherwellenfront zu berechnen. In dieser Ausführungsform ist die korrigierte Scherwellenfront durch folgenden Ausdruck (16) gegeben, da der Einfallswinkel  $\theta$  durch Ausdruck (5) gegeben ist:

$$\left\{ \begin{array}{l} C\Delta W_x = \cos\theta\Delta W_x = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\theta}}\Delta W_x = \frac{\Delta W_x}{\sqrt{1+\left(\frac{\Delta W_x}{s}\cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s}\sin\phi\right)^2}} \\ C\Delta W_y = \cos\theta\Delta W_y = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\theta}}\Delta W_y = \frac{\Delta W_y}{\sqrt{1+\left(\frac{\Delta W_x}{s}\cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s}\sin\phi\right)^2}} \end{array} \right. \dots (16)$$

**[0054]** Wenn der Einfallswinkel  $\theta$  klein ist, kann man die korrigierte Scherwellenfront unter Verwendung folgender Ausdrücke (17) ausdrücken:

$$\left\{ \begin{array}{l} C\Delta W_x \sim \left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta W_x}{s}\cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s}\sin\phi\right)^2\right)\Delta W_x \\ C\Delta W_y \sim \left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta W_x}{s}\cos\phi + \frac{\Delta W_y}{s}\sin\phi\right)^2\right)\Delta W_y \end{array} \right. \dots (17)$$

**[0055]** Den Korrekturwert C kann man mittels  $\cos\theta$ ,  $\tan\theta$  oder des gemessenen Wertes der Scherwellenfront ausdrücken. Jedes von  $\cos\theta$ ,  $\tan\theta$  und gemessenem Wert der Scherwellenfront ist eine Funktion des Einfallswinkels  $\theta$ . Aus diesem Grund beinhaltet "der Einfallswinkel", der in Schritt S14 zum Berechnen des Korrekturwertes C in Abhängigkeit vom Einfallswinkel benutzt wurde, nicht nur  $\theta$ , sondern auch Funktionen des Einfallswinkels wie etwa  $\cos\theta$ ,  $\tan\theta$  und den gemessenen Wert der Scherwellenfront.

**[0056]** Die folgenden Schritte S16 und S19 bilden einen Wellenfrontaberration-Berechnungsschritt. In Schritt S16 führt der Rechner **180** einen Integrationsvorgang an der korrigierten Scherwellenfront durch, um eine Messwellenfront zu berechnen. Man kann den Integrationsvorgang mittels einer allgemein bekannten Wegintegration durchführen, oder durch Anpassen bzw. Fitten mittels einer Differenzfunktion von vorberechneten Funktionen. Zum Beispiel kann man, wenn die Wellenfrontaberration als Koeffizienten eines Zernikepolynoms berechnet wird, Fitten an der korrigierten Scherwellenfront durchführen unter Verwendung einer Zernikefunktion einer Differenz zwischen dem Polynom und einem gegenüber diesem um den Scherwert lateral verschobenen Polynom. Darüber hinaus kann man in diesem Schritt andere allgemein bekannte Integrationsvorgänge durchführen.

**[0057]** Schließlich berechnet der Rechner **180** in Schritt S19 die Wellenfrontaberration als eine Differenz zwischen der in Schritt S16 berechneten Messwellenfront und der in Schritt S18 berechneten Referenzwellenfront. Dann gibt der Rechner **180** die berechnete Wellenfrontaberration aus und beendet diesen Vorgang.

**[0058]** Der oben beschriebene Vorgang ermöglicht es, die Wellenfrontaberration des Objekts **130** mit hoher Genauigkeit aus der Messwellenfront und der Referenzwellenfront zu berechnen.

**[0059]** Obwohl diese Ausführungsform ein Verfahren beschreibt, in dem der Rechner **180** die Referenzwellenfront durch Raytracing berechnet, kann man die Referenzwellenfront durch direktes Messen der optischen Weglängen mittels eines Niederkohärenzinterferometers berechnen.

**[0060]** Darüber hinaus ermöglicht in dieser Ausführungsform das Benutzen des Talbot-Interferometers als Messsystem das Messen einer transmittierten Wellenfront mit großer Aberration. Das Talbot-Interferometer ist von der Art lateraler Scherinterferometer (Shearing-Interferometer), die jeweils eine Differenz zwischen der transmittierten Wellenfront und einer lateral bzw. seitlich dagegen verschobenen (gescherten) transmittierten Wellenfront als Interferenzstreifen messen. Deshalb kann man das laterale Shearing-Interferometer als Mess-

system zum Berechnen eines einer Schiefe oder Neigung der transmittierten Wellenfront entsprechenden Wertes bezeichnen. Der Wert der lateralen Verschiebung der transmittierten Wellenfront wird als der Scherwert bezeichnet. Verringern des Scherwerts ermöglicht Messen einer großen Aberration der transmittierten Wellenfront als eine kleine Aberration (Scherwellenfront) in dem Maße, dass die Interferenzstreifen nicht dicht werden.

**[0061]** In dem Shearing-Interferometer bewirkt ein zu kleiner Scherwert allgemein, dass eine Scherwellenfront im Rauschen untergeht und sich dadurch die Genauigkeit verringert, sodass ein geeigneter Scherwert vorzugsweise ungefähr 3 bis 5% eines Durchmessers einer Pupille beträgt. Um jedoch in dieser Ausführungsform eine transmittierte Wellenfront mit großer Aberration als eine kleine Scherwellenfront zu messen, ist es wünschenswert, dass der Scherwert 1,5% oder weniger des Pupillendurchmessers beträgt, und noch wünschenswerter einen kleineren Wert wie etwa ungefähr 0,3 bis 0,9% hat. Der Scherwert "shear" ist durch folgenden Ausdruck (18) definiert, in dem  $Z_t$  für eine Entfernung zwischen dem Beugungsgitter **150** und dem Detektor **160** steht, und  $D_i$  für einen Durchmesser von Interferenzstreifen auf dem Detektor **160**:

$$shear = \frac{\lambda Z_t}{p D_i} \dots (18)$$

**[0062]** Ausdruck (18) kann man auch mittels Ausdruck (4) und einem Durchmesser  $D_o$  eines Lichtstroms auf dem Beugungsgitter **150** als folgenden Ausdruck (19) ausdrücken.

$$shear = \frac{2mp}{D_o} \dots (19)$$

**[0063]** Der obige Ausdruck zeigt, dass der Scherwert proportional zum Gitterabstand  $p$  des Beugungsgitters **150** ist. Wie man aus Ausdruck (4) sieht, beeinflusst der Gitterabstand des Beugungsgitters auch die Entfernung  $Z_t$  zwischen dem Beugungsgitter **150** und dem Detektor **160**, was es notwendig macht, den Gitterabstand unter Berücksichtigung der Interferenz der Elemente zu entscheiden. Wenn zum Beispiel  $m$  einen Wert von 0,5 hat und  $D_o$  ungefähr 10 bis 20 mm beträgt, ist der Gitterabstand vorzugsweise ungefähr 40 bis 180  $\mu\text{m}$ .

#### Ausführungsform 2

**[0064]** Fig. 5 zeigt eine Konfiguration einer Wellenfrontaberration-Messvorrichtung nach einer zweiten Ausführungsform (Ausführungsform 2) der vorliegenden Erfindung.

**[0065]** In Fig. 5 werden Bestandteile der Messvorrichtung dieser Ausführungsform, die gemeinsam sind mit denen der Messvorrichtung der Ausführungsform 1 (Fig. 1), durch dieselben Bezugszeichen wie die in Ausführungsform 1 bezeichnet. In dieser Ausführungsform wird ein Shack-Hartmann-Sensor als Detektor **220** zum Messen der Wellenfront benutzt, und es wird ein Wellenfrontaberration-Messverfahren beim Ausmessen einer Oberflächenform eines Objekts **200** beschrieben.

**[0066]** Wenn eine auszumessende Fläche des Objekts **200** eine konkave Fläche ist, wird das Objekt **200** hinter einem Fokuspunkt der Kollimatorlinse **120** angeordnet, um zu bewirken, dass eine divergente Welle die Fläche erreicht. Dann wird eine durch die Fläche reflektierte Welle (Messlicht) mittels eines halbdurchsichtigen Spiegels **210** zum Detektor **220** reflektiert. Der als der Detektor **220** benutzte Shack-Hartmann-Sensor ist wie in Fig. 6 gezeigt aus einem Linsenarray und einem CCD-Sensor gebildet.

**[0067]** Fig. 7 ist ein Flussdiagramm, das einen Ablauf eines Vorgangs (Wellenfrontaberration-Messverfahren) zum Berechnen einer Wellenfrontaberration des Objekts **200** mittels eines durch den Detektor **220** aufgenommenen Bilds zeigt. Ein in Fig. 5 gezeigter Rechner (Computer) **180** führt diesen Rechenvorgang gemäß einem Computerprogramm durch. Das Flussdiagramm von Fig. 7 beinhaltet Schritte S14 bis S19, die gleich sind zu denen im Flussdiagramm von Ausführungsform 1 (Fig. 2), sowie von den Schritten S11 bis S13 im Flussdiagramm von Ausführungsform 1 verschiedene Schritte S21 bis S23, weswegen im Folgenden hauptsächlich diese Schritte S21 bis S23 beschrieben werden.

**[0068]** In Schritt S21 beschafft der Rechner **180** mittels des Shack-Hartmann-Sensors **220** ein Bild von einem optischen Bild, das durch die vom Objekt (auszumessende Fläche) **200** reflektierte Welle gebildet wird, d. h. eine Intensitätsverteilung des Messlichts. Im Shack-Hartmann-Sensor **220** bilden sich durch Linsenzellen des Linsenarrays gebildete Bilder von Lichtfokussierflecken (focused light spot images) auf einer Lichtempfan-

genden Oberfläche (Sensoroberfläche) des CCD-Sensors. Daher ist das aufgenommene Bild ein Bild, in dem Lichtfokussierflecken in gleicher Anzahl wie die der Linsenzellen des Linsenarrays zusammengesetzt werden.

**[0069]** Als nächstes berechnet der Rechner **180** in Schritt S22 eine Schwerpunktposition (im Folgenden als "eine Flecken-Schwerpunktposition" bezeichnet) von jedem Lichtfokussierflecken.

**[0070]** Als nächstes berechnet der Rechner **180** in Schritt S23 aus den berechneten Flecken-Schwerpunktpositionen Einfallswinkel  $\theta$  von Strahlen (Messlicht) zur Sensoroberfläche sowie eine Differentialwellenfront. Wenn  $f$  für eine Brennweite des Linsenarrays des Shack-Hartmann-Sensors **220** steht, und  $l_s$  für eine Entfernung zwischen der berechneten Flecken-Schwerpunktposition und einer Flecken-Schwerpunktposition im Fall, wo ein Eintreten von kollimiertem Licht in den Shack-Hartmann-Sensor **220** veranlasst wird, werden der Einfallswinkel  $\theta$  und die Differentialwellenfront ( $\partial W/\partial x$  und  $\partial W/\partial y$ ) durch folgende Ausdrücke (20) ausgedrückt, wobei  $\theta_x$  bzw.  $\theta_y$  für eine x-Komponente und eine y-Komponente des Einfallswinkels  $\theta$  stehen.

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{l_s}{f} \\ \frac{\partial W}{\partial x} = \theta_x \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \theta_y \end{cases} \dots (20)$$

**[0071]** Danach führt der Rechner **180** die Vorgänge in Schritt S14 und den nachfolgenden Schritten durch, um letztendlich die Wellenfrontaberration des Objekts **200** mit hoher Genauigkeit zu berechnen.

### Ausführungsform 3

**[0072]** Als nächstes wird eine dritte Ausführungsform (Ausführungsform 3) der vorliegenden Erfindung beschrieben. Wenn die Differenz zwischen der Referenzwellenfront und der Messwellenfront klein ist, kann man den in Ausführungsform 1 beschriebenen Korrekturwert C nicht durch Berechnen unter Verwendung der Mess-Differentialwellenfront, sondern ausschließlich durch Berechnen beschaffen. **Fig. 8** ist ein Flussdiagramm, das einen Ablauf eines Rechenvorgangs zum Berechnen einer Wellenfrontaberration (Wellenfrontaberration-Messverfahren) zeigt, der in so einem Fall durchgeführt wird. Der in **Fig. 1** (oder **Fig. 5**) gezeigte Rechner (Computer) **180** führt auch diesen Rechenvorgang gemäß einem Computerprogramm durch. Der Rechner **180** dient als Mess-Differentialwellenfront-Rechner, Referenz-Differentialwellenfront-Rechner, Korrekturereinrichtung und Wellenfrontaberration-Rechner. Da Schritte S11 und S12 im Flussdiagramm von **Fig. 8** dieselben sind wie die im Flussdiagramm von Ausführungsform 1 (**Fig. 2**), wird deren Beschreibung ausgelassen.

**[0073]** Zunächst wird die Form und Position des Referenzobjekts eingestellt, und Positionen identisch zu denen der Elemente (einschließlich dem Referenzobjekt an Stelle des Objekts **130**) in der in **Fig. 1** gezeigten Messvorrichtung werden in den Rechner **180** eingegeben. In Schritt S31 führt der Rechner **180** Raytracing für mehrere optische Wege von Strahlen des Referenzlichts durch, die aus der Lochblende **110** zur Sensoroberfläche des Detektors **160** austreten und die in **Fig. 1** gezeigt sind, und berechnet Einfallswinkel  $\theta$  der Strahlen aus Raytracinginformation der jeweiligen optischen Wege. Dann berechnet der Rechner **180** in Schritt S32 den Korrekturwert C aus dem Einfallswinkel  $\theta$  sowie in Schritt S14 in Ausführungsform 1. Dieser Schritt S32 und ein unten erwähnter Schritt S35 bilden einen Korrekturschritt.

**[0074]** Andererseits führt der Rechner **180** in Schritt S33 das Raytracing durch sowie in Schritt S31, um eine optische Weglängen-Verteilung zu berechnen, d. h. eine Referenzwellenfront. Dann berechnet der Rechner **180** in Schritt S34 eine Referenz-Differentialwellenfront (erste Referenz-Differentialwellenfront) als ein Differentialwert der Referenzwellenfront. Den Differentialwert der Referenzwellenfront kann man mittels der in Schritt S31 berechneten Einfallswinkel  $\theta$  berechnen, oder berechnen unter Verwendung von Differenzen der optischen Weglängen der zueinander benachbarten optischen Wege unter den mehreren optischen Wegen, deren Verteilung in Schritt S32 berechnet wurde.

**[0075]** Als nächstes führt der Rechner **180** in Schritt S35 an der in Schritt S34 berechneten ersten Referenz-Differentialwellenfront einen Korrekturvorgang abhängig vom Einfallswinkel  $\theta$  des Messlichts zur Sensoroberfläche durch, um eine korrigierte Referenz-Differentialwellenfront (zweite Referenz-Differentialwellenfront) zu

berechnen, die eine Referenz-Differentialwellenfront nach dem Korrekturvorgang ist. Insbesondere multipliziert der Rechner **180** die erste Referenz-Differentialwellenfront mit dem Korrekturwert C, um die korrigierte Referenz-Differentialwellenfront zu berechnen.

**[0076]** Als nächstes berechnet der Rechner **180** in Schritt S36 einen Differentialwellenfront-Differenzwert, der eine Differenz zwischen der in Schritt S12 berechneten Scherwellenfront und der in Schritt S35 berechneten korrigierten Referenz-Differentialwellenfront anzeigt. Dann führt der Rechner **180** in Schritt S37 den Integrationsvorgang an dem Differentialwellenfront-Differenzwert durch sowie in Schritt S16 in Ausführungsform 1, um eine Messwellenfront zu berechnen. Danach berechnet der Rechner **180** in dem in Ausführungsform 1 beschriebenen Schritt S19 die Wellenfrontaberration als die Differenz zwischen der in Schritt S37 berechneten Messwellenfront und der in Schritt S18 berechneten Referenzwellenfront, um sie auszugeben, und beendet dann diesen Vorgang.

**[0077]** Auch in dieser Ausführungsform kann man eine genaue Wellenfrontaberration des Objekts **130** aus der Messwellenfront und der Referenzwellenfront beschaffen.

**[0078]** Man kann eine Kombination der in dieser Ausführungsform (Ausführungsform 3) und in Ausführungsform 1 oder 2 beschriebenen Vorgänge benutzen, um die Wellenfrontaberration zu berechnen. Insbesondere kann der Rechner **180** den Einfallswinkel aus der Referenzwellenfront wie in Ausführungsform 3 beschrieben berechnen und den Korrekturvorgang abhängig vom Einfallswinkel an der Mess-Differentialwellenfront wie in Ausführungsform 1 und 2 beschrieben durchführen. Darüber hinaus kann der Rechner **180** den Einfallswinkel aus der Mess-Differentialwellenfront wie in Ausführungsform 1 und 2 beschrieben berechnen und den Korrekturvorgang mittels des Einfallswinkels an der Referenz-Differentialwellenfront wie in Ausführungsform 3 beschrieben durchführen.

#### Ausführungsform 4

**[0079]** Es ist möglich, das durch die in jeder der Ausführungsformen 1 bis 3 beschriebene Messvorrichtung (oder das Messverfahren) beschaffte Messergebnis rückzukoppeln zum Herstellen von Optiken bzw. Optikelementen wie etwa Linsen. **Fig. 9** zeigt ein Beispiel eines Herstellungsverfahrens für die Optik mittels Gussformen.

**[0080]** In **Fig. 9** ist Schritt S300 ein Schritt zum Entwerfen der Optik. In diesem Schritt entwirft ein Designer die Optik unter Verwendung von Optik-Designsoftware oder dergleichen.

**[0081]** Schritt S310 ist ein Schritt zum Entwerfen und Verarbeiten auf Basis der in Schritt S300 entworfenen Optik von einer Metallform, die zum Gussformen der Optik unter Verwendung eines Glasmaterials oder eines Kunststoffmaterials verwendet werden soll.

**[0082]** Schritt S320 ist ein Schritt zum Durchführen des Gussformens der Optik unter Verwendung der in Schritt S310 verarbeiteten Metallform.

**[0083]** Schritt S330 ist ein Schritt zum Messen einer Form der in Schritt S320 gebildeten Optik und zum Beurteilen ihrer Genauigkeit. Falls die in Schritt S330 beurteilte Form eine erforderliche Formgenauigkeit nicht erfüllt, wird in Schritt S340 ein Korrekturwert für die Metallform berechnet, und eine korrigierte Metallform wird in Schritt S310 wieder verarbeitet.

**[0084]** Schritt S350 ist ein Schritt zum Beurteilen einer optischen Leistung der Optik, die die erforderliche Formgenauigkeit in Schritt S330 erfüllt. In diesem Schritt wird die Wellenfrontaberration der Optik als das Objekt (zusätzlich eine Oberflächenform ihrer optischen Fläche) gemessen unter Verwendung der in irgendeiner der Ausführungsformen 1 bis 3 beschriebenen Messvorrichtung, und auch andere optische Eigenschaften werden gemessen. Wenn die in diesem Schritt beurteilte optische Leistung nicht eine erforderliche Spezifikation erfüllt, wird in Schritt S360 ein Korrekturwert für die optische Fläche berechnet, und in Schritt S300 die Optik unter Verwendung dieses Ergebnisses wieder entworfen.

**[0085]** Schritt S370 ist ein Schritt zur Massenproduktion der Optiken gemäß einer Herstellungsbedingung von derjenigen Optik, die in Schritt S350 die gewünschte optische Leistung erzielt.

**[0086]** Man kann die Wellenfrontaberration der Optik bzw. des Optikelements mit hoher Genauigkeit durch jedes der in Ausführungsformen 1 bis 3 beschriebenen Messverfahren messen, was Massenproduktion der Optiken bzw. Optikelemente mit guter optischer Leistung ermöglicht.

**[0087]** Obwohl die vorliegende Erfindung unter Bezugnahme auf Ausführungsbeispiele beschrieben worden ist, ist selbstverständlich, dass die Erfindung nicht auf die offenbarten Ausführungsbeispiele begrenzt ist. Dem Umfang der folgenden Ansprüche soll die weitestgehende Interpretation zugestanden werden, sodass all solche Modifikationen und äquivalenten Strukturen und Funktionen erfasst sind.

**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**

- JP 2010-151578 [0003]

**Patentansprüche**

1. Wellenfrontaberration-Messverfahren, gekennzeichnet durch Umfassen von:  
Messen (S11) mittels eines Lichtempfangssensors (**160**) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (**130**) transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
Berechnen (S12) einer ersten Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist;  
Berechnen (S14, S15) einer zweiten Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Messlichts zum Lichtempfangssensor; und  
Berechnen (S16, S19) einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Differentialwellenfront.
2. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach Anspruch 1, weiterhin umfassend:  
Beschaffen (S17, S18) einer Referenzwellenfront, die eine Wellenfront von Referenzlicht auf dem Lichtempfangssensor ist, wobei das Referenzlicht durch ein Referenzobjekt mit einer Referenzform für diejenige des Objekts transmittiert oder von diesem reflektiert wird,  
bei dem die Wellenfrontaberration berechnet wird unter Verwendung einer Differenz zwischen einer durch Integrieren der zweiten Differentialwellenfront erhaltenen Wellenfront und der Referenzwellenfront.
3. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach Anspruch 1, weiterhin umfassend:  
Beschaffen (S33, S34) einer Referenz-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront von Referenzlicht auf dem Lichtempfangssensor ist, wobei das Referenzlicht durch ein Referenzobjekt mit einer Referenzform für diejenige des Objekts transmittiert oder von diesem reflektiert wird,  
bei dem die Wellenfrontaberration berechnet wird durch Integrieren einer Differenz zwischen der zweiten Differentialwellenfront und der Referenz-Differentialwellenfront (S35, S36, S37).
4. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem der Korrekturvorgang unter Verwendung einer Funktion des Einfallswinkels durchgeführt wird.
5. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach Anspruch 4, bei dem die Funktion des Einfallswinkels ein Richtungskosinus des Einfallswinkels ist.
6. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem das Objekt eine Optik mit einer asphärischen Fläche ist.
7. Wellenfrontaberration-Messverfahren, gekennzeichnet durch Umfassen von:  
Messen (S11) mittels eines Lichtempfangssensors (**160**) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (**130**) transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
Berechnen (S12) einer Mess-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist;  
Berechnen (S33) einer ersten Referenz-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront von Referenzlicht auf dem Lichtempfangssensor ist, wobei das Referenzlicht durch ein Referenzobjekt mit einer Referenzform für diejenige des Objekts transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
Berechnen (S33, S34) einer zweiten Referenz-Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Referenz-Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Referenzlichts zum Lichtempfangssensor; und  
Berechnen (S35, S36, S37) einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Referenz-Differentialwellenfront und der Mess-Differentialwellenfront.
8. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach Anspruch 7, bei dem die Wellenfrontaberration berechnet wird durch Integrieren einer Differenz zwischen der zweiten Referenz-Differentialwellenfront und der Mess-Differentialwellenfront.
9. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach Anspruch 7 oder 8, bei dem der Korrekturvorgang unter Verwendung einer Funktion des Einfallswinkels durchgeführt wird.
10. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach Anspruch 9, bei dem die Funktion des Einfallswinkels ein Richtungskosinus des Einfallswinkels ist.

11. Wellenfrontaberration-Messverfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, bei dem das Objekt eine Optik mit einer asphärischen Fläche ist.

12. Herstellungsverfahren für eine Optik, gekennzeichnet durch Umfassen von:  
 Bilden (S300–S320) der Optik;  
 Messen (S11) mittels eines Lichtempfangssensors (**160**) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (**130**) transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
 Berechnen (S12) einer ersten Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist;  
 Berechnen (S14, S15) einer zweiten Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Messlichts zum Lichtempfangssensor;  
 Berechnen (S16, S19) einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Differentialwellenfront; und  
 Beurteilen (S350) der Optik unter Verwendung der Wellenfrontaberration.

13. Herstellungsverfahren für eine Optik, gekennzeichnet durch Umfassen von:  
 Bilden (S300–S320) der Optik;  
 Messen (S11) mittels eines Lichtempfangssensors (**160**) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (**130**) transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
 Berechnen (S12) einer Mess-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist;  
 Berechnen (S33) einer ersten Referenz-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront von Referenzlicht auf dem Lichtempfangssensor ist, wobei das Referenzlicht durch ein Referenzobjekt mit einer Referenzform für diejenige des Objekts transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
 Berechnen (S33, S34) einer zweiten Referenz-Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Referenz-Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Referenzlichts zum Lichtempfangssensor;  
 Berechnen (S35, S36, S37) einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Referenz-Differentialwellenfront und der Mess-Differentialwellenfront; und  
 Beurteilen (S350) der Optik unter Verwendung der Wellenfrontaberration.

14. Wellenfrontaberration-Messvorrichtung, gekennzeichnet durch Umfassen von:  
 einer Messeinrichtung (**100, 110, 120, 150, 160**), konfiguriert zum Messen mittels eines Lichtempfangssensors (**160**) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (**130**) transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
 einem Differentialwellenfront-Rechner (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer ersten Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist;  
 einer Korrekturereinrichtung (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer zweiten Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Messlichts zum Lichtempfangssensor; und  
 einem Wellenfrontaberration-Rechner (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Differentialwellenfront.

15. Wellenfrontaberration-Messvorrichtung, gekennzeichnet durch Umfassen von:  
 einer Messeinrichtung (**100, 110, 120, 150, 160**), konfiguriert zum Messen mittels eines Lichtempfangssensors (**160**) von einer Intensitätsverteilung von Messlicht, das durch ein auszumessendes Objekt (**130**) transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
 einem Mess-Differentialwellenfront-Rechner (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer Mess-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront des Messlichts auf dem Lichtempfangssensor ist;  
 einem Referenz-Differentialwellenfront-Rechner (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer ersten Referenz-Differentialwellenfront, die eine Differentialwellenfront von Referenzlicht auf dem Lichtempfangssensor ist, wobei das Referenzlicht durch ein Referenzobjekt mit einer Referenzform für diejenige des Objekts transmittiert oder von diesem reflektiert wird;  
 einer Korrekturereinrichtung (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer zweiten Referenz-Differentialwellenfront durch Durchführen eines Korrekturvorgangs an der ersten Referenz-Differentialwellenfront in Abhängigkeit von einem Einfallswinkel des Referenzlichts zum Lichtempfangssensor; und

einem Wellenfrontaberration-Rechner (**180**), konfiguriert zum Berechnen einer Wellenfrontaberration des Objekts unter Verwendung der zweiten Referenz-Differentialwellenfront und der Mess-Differentialwellenfront.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

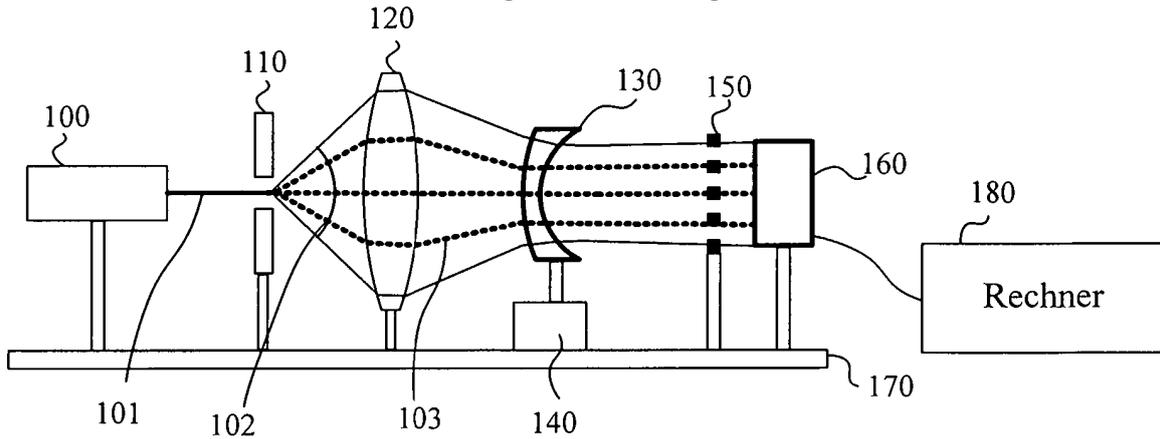


FIG. 1

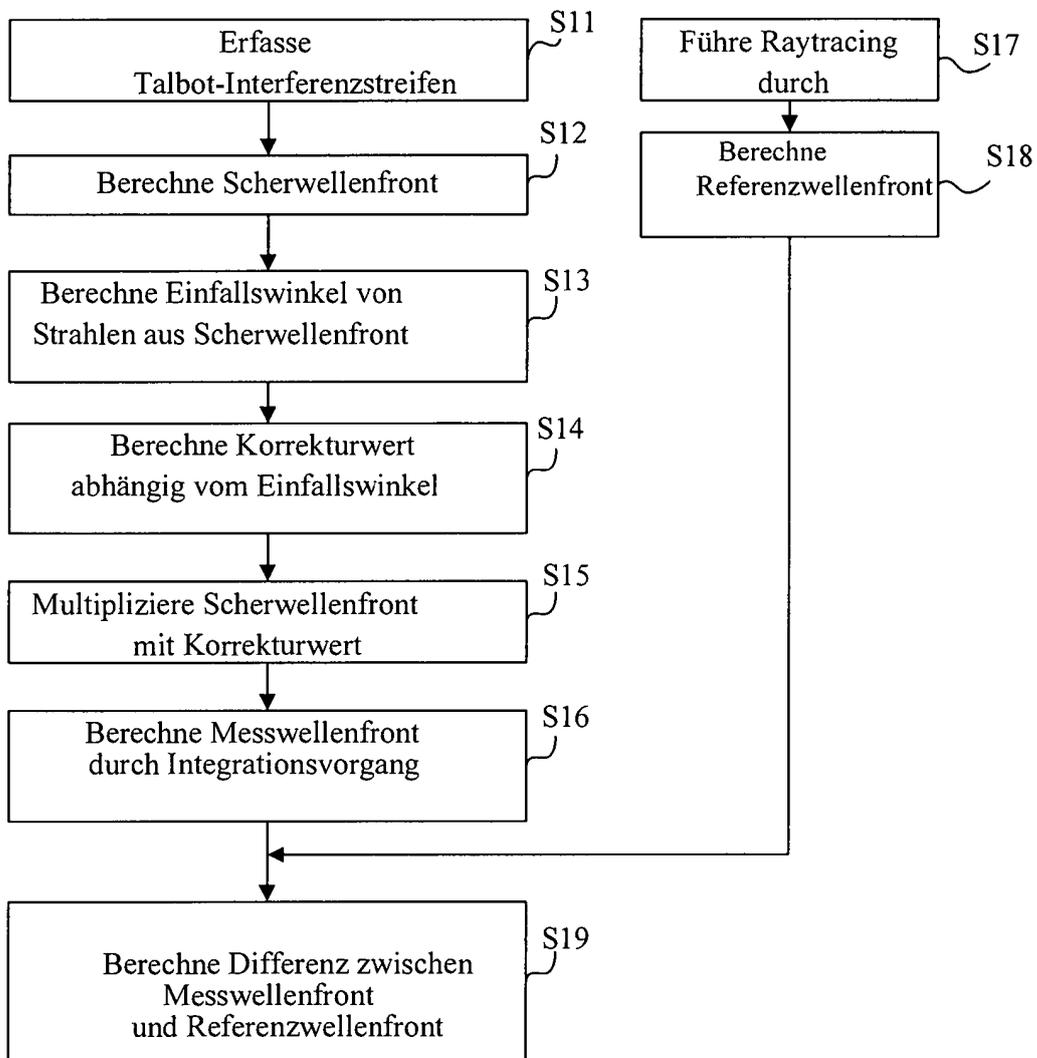


FIG. 2

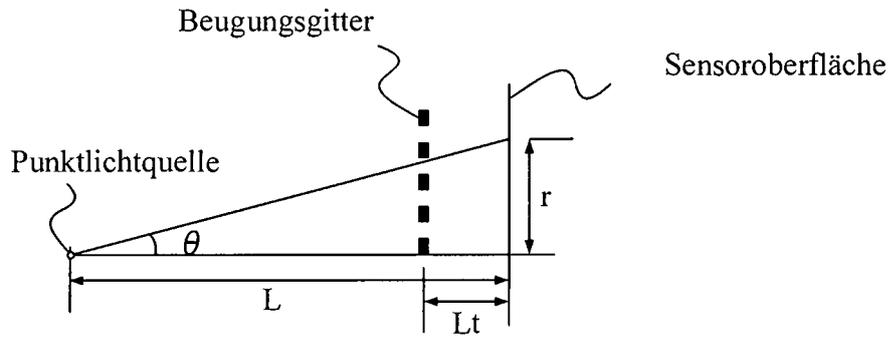


FIG. 3

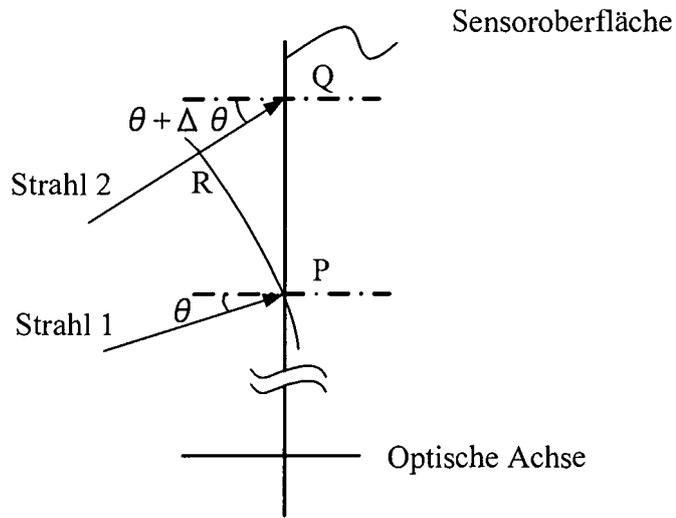


FIG. 4

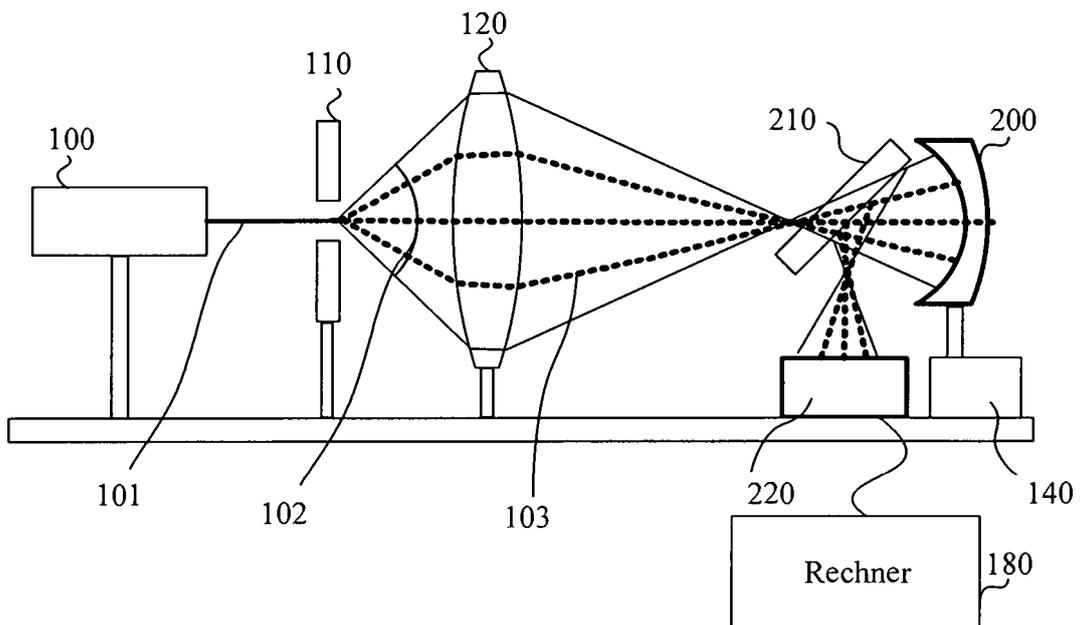


FIG. 5

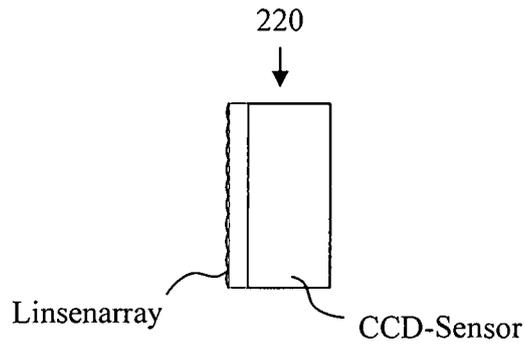


FIG. 6

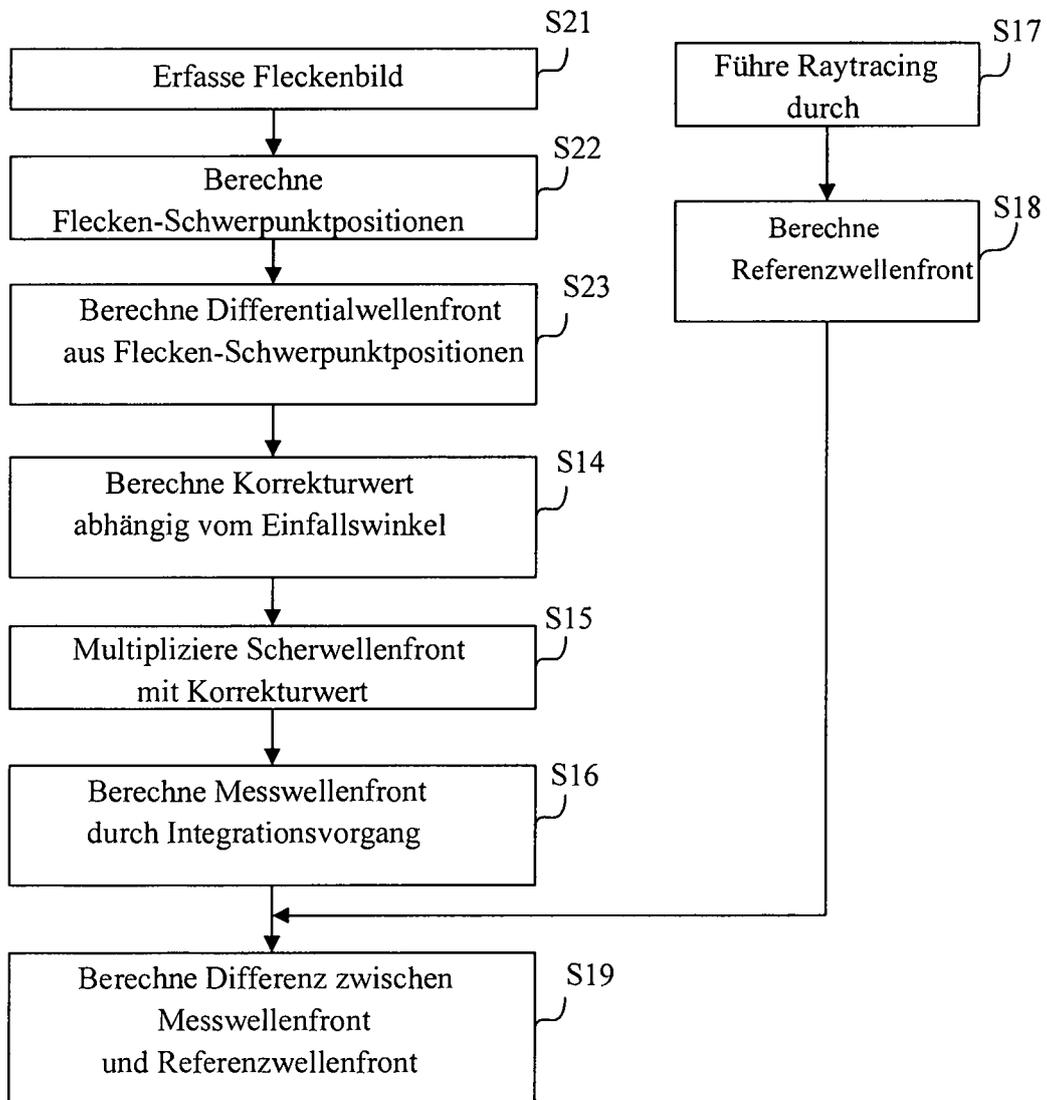


FIG. 7

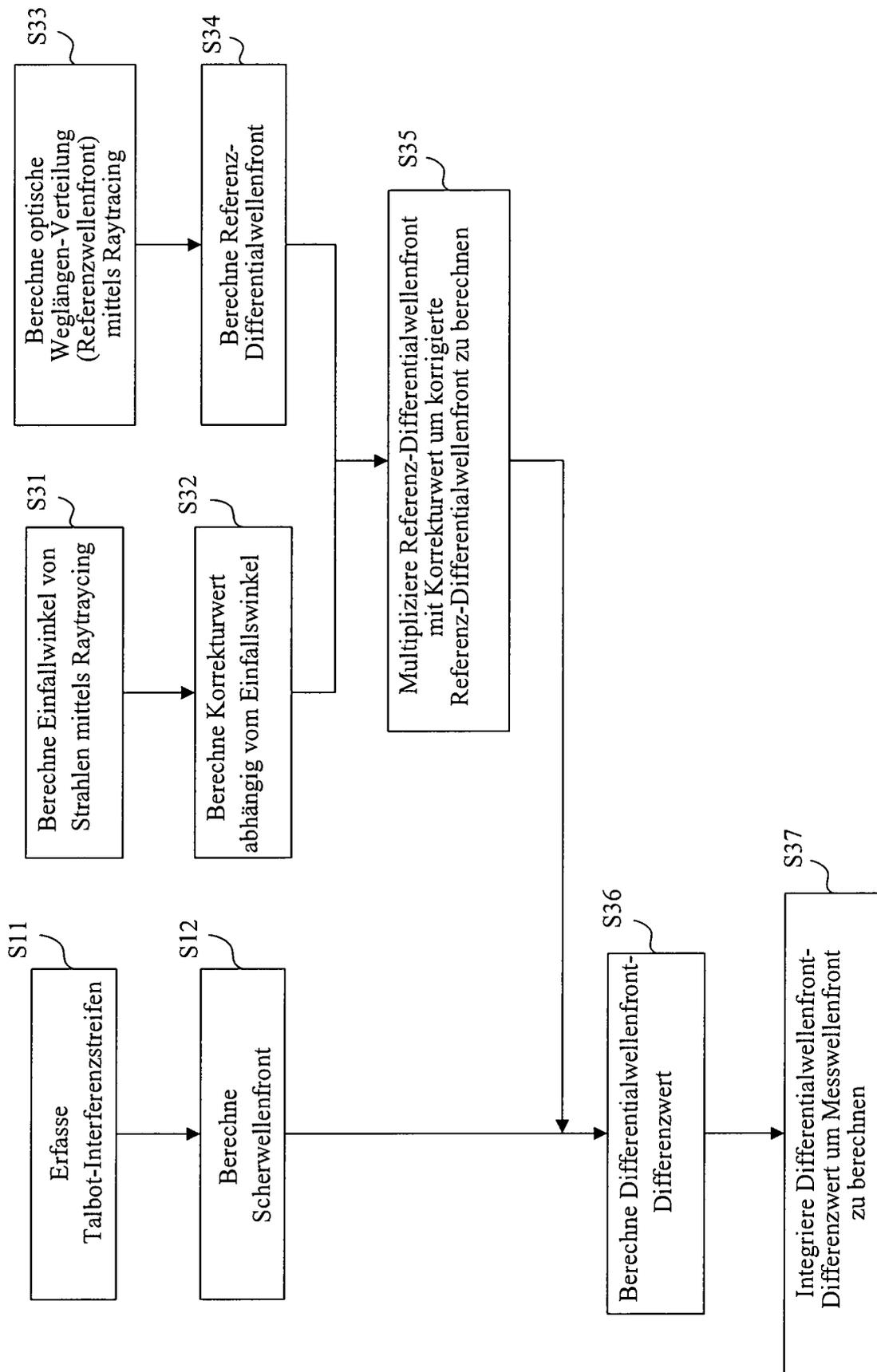


FIG. 8

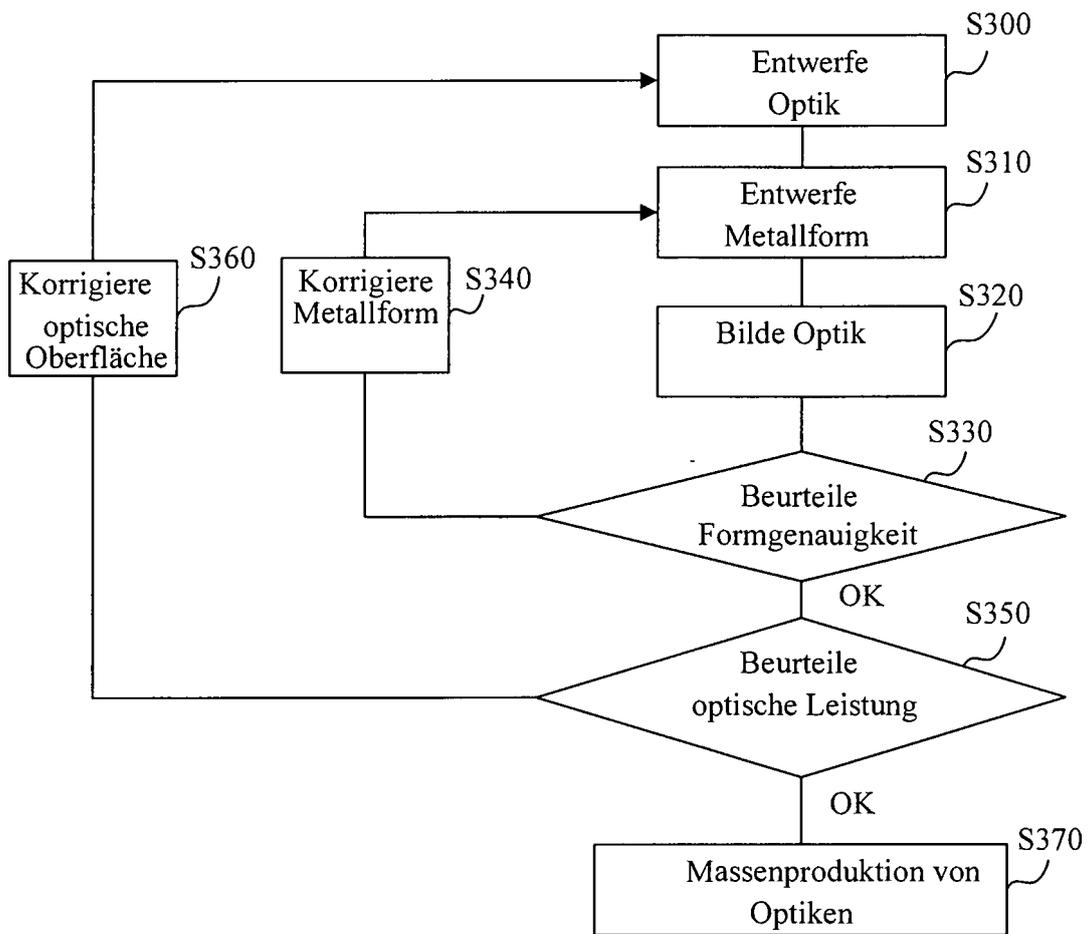


FIG. 9

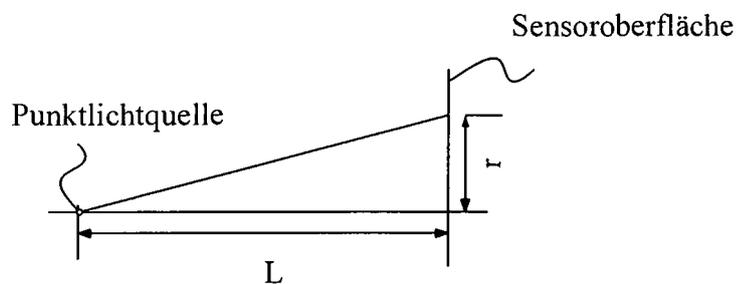


FIG. 10