(19) **Bundesrepublik Deutschland**
**Deutsches Patent- und Markenamt**

(10) **DE 698 25 548 T2** 2005.02.03

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 921 382 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **698 25 548.8**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **98 122 562.6**
(96) Europäischer Anmeldetag: **02.12.1998**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **09.06.1999**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **11.08.2004**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **03.02.2005**

(51) Int Cl.[7]: **G01J 9/00**
**G02B 26/06**

(30) Unionspriorität:
**984751** **04.12.1997** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**DE, FR, GB**

(73) Patentinhaber:
**Northrop Grumman Corp., Los Angeles, Calif., US**

(74) Vertreter:
**WUESTHOFF & WUESTHOFF Patent- und Rechtsanwälte, 81541 München**

(72) Erfinder:
**DeLong, Raymond K., Palos Verdes Estates, US;**
**Hutchin, Richard A., Calabasas, US**

(54) Bezeichnung: **Optischer Wellenfrontsensor vom Hartmann-Typ**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

## Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

**[0001]** Die Erfindung betrifft allgemein adaptive Optiksysteme und insbesondere Techniken zum Messen der relativen Phasenneigung eines optischen Strahls in zwei Dimensionen quer über eine Planarmatrix. Adaptive Optiksysteme nutzen verstellbare optische Elemente wie z. B. verformbare Spiegel zum Kompensieren von Aberrationen in einem optischen Strahl. Aberrationen können z. B. durch Ausbreitung des Strahls durch die Atmosphäre verursacht werden. Bei einem typischen adaptiven Optiksystem wird der aberrationsbehaftete Strahl von einem verformbaren Spiegel reflektiert, der viele kleine Elemente aufweist, deren Position unter Verwendung eines jedem beweglichen Spiegelelement zugeordneten separaten Aktuators verstellt werden kann. Ein Teil des reflektierten Strahls wird abgespalten und so gerichtet, dass er auf eine Sensormatrix auftrifft, die einen die Wellenfrontverzerrung im reflektierten Strahl angebenden Messwert liefert. Die Messwerte der Wellenfrontverzerrung werden dann an den verformbaren Spiegel zurückgespeist, um fortwährende Korrekturen durch entsprechendes Bewegen der Spiegelelemente bereitzustellen.

**[0002]** Typische Anordnungen von Wellenfrontsensoren sind z. B. in der Europäischen Patentanmeldung EP 0546 811 A und in der US-Patentanmeldung Nummer 5,233,174 A beschrieben.

**[0003]** Die Hauptkomponenten einer Wellenfrontsensormatrix sind eine als Matrix kleiner Linsen bezeichnete aus kleinen Linsen bestehende Matrix und eine Kamera, die eine Matrix aus Sensorelementen aufweist. Diese Konfiguration wird als Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor bezeichnet. Ist die Matrix kleiner Linsen im Weg des Strahls angeordnet, erzeugt sie mehrere elementare Teile des Strahls, die als Subapertur aufweisende Teile bezeichnet werden. Jede kleine Linse in der Matrix kleiner Linsen verarbeitet eine Subapertur des gesamten Strahls. Jede kleine Linse der Matrix kleiner Linsen ist typischerweise auf einem quadratischen Gitter positioniert, obwohl die gesamte Matrix vielleicht nicht quadratisch ist und im Allgemeinen eine Polygonform aufweist, die ungefähr dem Umriss eines kreisförmigen Strahls entspricht. Die Kamerasensorelemente haben im Allgemeinen eine quadratische oder rechteckige Form und sind im Allgemeinen auch in einem quadratischen oder rechteckigen Gittermuster winklig so ausgerichtet, dass sie zum Gittermuster kleiner Linsen parallel liegen.

**[0004]** Vom Shack-Hartmann-Sensor gibt es im Stand der Technik zwei Konfigurationen. Bei einer Konfiguration ist jede Subapertur oder kleine Linse im gleichen Abstand zu den Positionen von vier benachbarten Spiegelaktuatoren zentriert. Überdies ist die kleine Linse über einer Gruppe von vier Kamerasensorelementen zentriert, die als eine Quadzelle bezeichnet werden. Ein Maß der Phasenneigung in einer Richtung wird von der Differenz zwischen Signalausgängen von jedem von zwei Paaren der Zellen in der Quadzelle abgeleitet. Wenn z. B. die Zellen und ihre Ausgangssignale in einer Quadzelle mit A, B, C und D bezeichnet sind, wobei Zellen A und B in X-Achsen-Richtung ausgerichtet sind und Zellen A und C in Y-Achsen-Richtung ausgerichtet sind, wird die X-Achsen-Neigung aus [(A + C) – (B + D)]/[A + B + C + D] bestimmt. Entsprechend wird die Y-Achsen-Neigung aus [(A + B) – (C + D)]/[A + B + C + D] bestimmt.

**[0005]** Der Hauptnachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass es vorzuziehen wäre, die lokale X-Achsen-Neigung zwischen zwei benachbarten Aktuatoren auf einer gemeinsamen X-Achse zu messen und die Y-Achsen-Neigung zwischen zwei benachbarten Aktuatoren auf einer gemeinsamen Y-Achse zu messen. Eine alternative Konfiguration des Stands der Technik vermeidet diesen Nachteil, bringt aber leider ein anderes Problem mit sich. Bei dieser alternativen Konfiguration werden zwei Matrizen kleiner Linsen und zwei Matrizen von Detektoren benötigt, eine zum Messen der X-Achsen-Neigung und die andere zum Messen der Y-Achsen-Neigung. Die Matrix kleiner Linsen zum Messen der X-Achsen-Neigung ist so positioniert, dass jede Subapertur oder kleine Linse in der Mitte zwischen den Gitterpositionen, die zwei benachbarten Aktuatoren auf einer gemeinsamen X-Achse entsprechen, positioniert ist. Entsprechend ist die andere Matrix kleiner Linsen so positioniert, dass jede Subapertur oder kleine Linse in der Mitte zwischen den Gitterpositionen, die zwei benachbarten Aktuatoren auf einer gemeinsamen Y-Achse entsprechen, positioniert ist. Für die Messung der X-Achsen-Neigung stellt eine Kamerasensormatrix eine Bizelle bereit, d. h. zwei benachbarte Sensorzellen, die sich zwischen den benachbarten Aktuatoren in der gemeinsamen X-Achse befinden. Das Licht von der kleinen Linse wird deshalb normalerweise über der Grenze zwischen den zwei Zellen in der Bizelle positioniert, und jede Neigung in der X-Achsen-Richtung wird anhand der Differenz der Ausgangssignale von den zwei Zellen in der Bizelle bestimmt. Ähnlich stellt eine separate Kamerasensormatrix für Y-Achsen-Neigungsmessung eine Bizelle zwischen zwei Gitterpositionen bereit, die den benachbarten Aktuatoren in der gemeinsamen Y-Achse entsprechen. Folglich wird die Y-Achsen-Neigung von der Differenz zwischen Ausgangssignalen von zwei Zellen in der Bizelle abgeleitet. Das dieser Konfiguration anhaftende Problem besteht darin, dass zwei Matrizen kleiner Linsen und zwei Kameras erforderlich sind. Die zwei Matrizen kleiner Linsen stören einander notwendigerweise physisch, wenn sie in einem einzigen Strahl, der analysiert wird, platziert

werden. Die Verwendung von Strahlteilern zur Bereitstellung zweier separater Strahlen zur Analyse durch die zwei Matrizen kleiner Linsen und Kameras bringt bezüglich der Ausrichtung weitere Komplikationen mit sich.

**[0006]** Was idealerweise nötig ist, ist eine Technik zum Messen der Phasenneigung durch Sensorelemente, die zwischen benachbarten Aktuatoren in der X-Achse und benachbarten Aktuatoren in der Y-Achse positioniert sind, aber frei von den Schwierigkeiten physischer Störung oder Ausrichtung ist, die die alternative Konfiguration vom Stand der Technik mit sich bringt. Die vorliegende Erfindung erfüllt dieses Erfordernis.

## Zusammenfassung der Erfindung

**[0007]** Die vorliegende Erfindung wird mit einem Wellenfrontsensor zur Verwendung bei der Messung der lokalen Phasenneigung in zwei Dimensionen über einen optischen Strahlquerschnitt verwirklicht, wobei nur eine Matrix kleiner Linsen und eine Kamerasensormatrix verwendet werden. Die Messungen erfolgen bezüglich einer ersten und zweiten aufeinander senkrecht stehenden Menge Gitterlinien, die sich an interessierenden Punkten schneiden, die den Positionen von Aktuatoren für optische Geräte entsprechen. Kurz und allgemein ausgedrückt umfasst der Wellenfrontsensor der Erfindung eine Matrix kleiner Linsen und eine Kamerasensormatrix. Die Matrix kleiner Linsen hat eine Mehrzahl kleiner Linsen, deren optische Achsen auf Schnittpunkten eines rechtwinkligen Gitters positioniert sind, das in einem Winkel zur ersten und zweiten senkrecht aufeinander stehenden Menge der Gitterlinien ausgerichtet ist, wobei die kleinen Linsen so beabstandet sind, dass die optischen Achsen der Linsen auf der ersten und zweiten Menge der Gitterlinien zwischen benachbarten interessierenden Punkten in den Schnittpunkten dieser Linien positioniert sind. Die Kamerasensormatrix hat eine Mehrzahl Sensorzellen, die in Zeilen und Spalten parallel zur ersten und zweiten senkrecht aufeinander stehenden Menge Gitterlinien angeordnet und neben der Matrix kleiner Linsen positioniert sind, um durch die kleinen Linsen fallendes Licht zu empfangen. Nur ausgewählte etwa den Positionen der optischen Achsen der kleinen Linsen entsprechende Zellen der Sensormatrix werden aktiviert, um einen Messwert der Phasenneigung in den Richtungen der aufeinander senkrecht stehenden Mengen der Gitterlinien bereitzustellen, und nur eine Matrix kleiner Linsen und eine Kamerasensormatrix sind erforderlich, um Neigungsmessungen in beiden zueinander senkrecht stehenden Richtungen zu gestatten.

**[0008]** Insbesondere ist die Kamerasensormatrix bei einer Ausführungsform der Erfindung eine rechtwinklige Anordnung aus Bizellen, von denen eine jede etwa ein Viertel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt. Nur jede zweite Bizelle in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix wird aktiviert, und jede aktive Bizelle ist in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen. Bei dieser veranschaulichenden Ausführungsform ist jeder Bizellen-Bildpunkt ungefähr quadratisch.

**[0009]** Bei einer anderen Ausführungsform der Erfindung ist die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Zellen, von denen eine jede etwa ein Neuntel der Fläche eines von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt. Bei dieser Ausführungsform werden nur ausgewählte benachbarte Paare Zellen in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix aktiviert, um aktive Bizellen zu bilden, die entlang der senkrecht aufeinander stehenden Mengen der Gitterlinien beabstandet angeordnet sind. Nur vier von jeweils neun Zellen werden aktiviert, und jede aktive Bizelle ist ungefähr in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen. Wie dargestellt ist bei dieser Ausführungsform jede Zelle ungefähr quadratisch.

**[0010]** Bei beiden offenbarten Ausführungsformen der Erfindung ist die die Matrix kleiner Linsen definierende rechtwinklige Matrix unter etwa 45° zur Kamerasensormatrix und zur ersten und zweiten Menge der aufeinander senkrecht stehenden Mengen der Gitterlinien ausgerichtet.

**[0011]** Die Erfindung kann auch definiert werden als ein Verfahren zur Messung der lokalen Phasenneigung in zwei Dimensionen über einen optischen Strahlquerschnitt entlang einer ersten und zweiten aufeinander senkrecht stehender Menge Gitterlinien, die sich an interessierenden Punkten schneiden, die den Positionen von Aktuatoren für optische Geräte entsprechen. Das Verfahren weist die Schritte auf: Schicken eines Strahls durch eine Matrix kleiner Linsen mit einer Mehrzahl kleiner Linsen, die auf einem rechtwinkligen Gitter ausgebildet sind; Ausrichten der Matrix kleiner Linsen mit ihrem rechtwinkligen Gitter kleiner Linsen unter einem Winkel zur ersten und zweiten Menge der senkrecht aufeinander stehenden Gitterlinien; Positionieren der Matrix kleiner Linsen so, dass jede kleine Linse eine Subapertur hat, die nahe der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten zentriert ist; Platzieren einer einzigen Kamerasensormatrix neben der Matrix kleiner Linsen, um von diesen Licht zu empfangen, wobei die Sensormatrix Sensorzellen aufweist, deren Anzahl pro Flächeneinheit größer ist als die Anzahl kleiner Linsen pro Flächeneinheit; Ausrichten der Sensormatrix, so dass sie mit der ersten und zweiten Menge der senkrecht aufeinander stehenden Gitterli-

nien zur Deckung kommt; Aktivieren ausgewählter Zellen in der Sensormatrix, wobei die ausgewählten Zellen Bizellen sind, die in entsprechenden Zeilen und Spalten etwa über dem Mittelpunkt jeder Subapertur der Matrix kleiner Linsen angeordnet sind; und Erfassen eines Messwertes für jedes Paar benachbarter interessierender Punkte, wobei der Bizellenmesswert die Phasenneigung in der Richtung zwischen den benachbarten interessierenden Punkten angibt.

**[0012]** Insbesondere ist die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Bizellen, von denen eine jede etwa ein Viertel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt. Der Aktivierungsschritt enthält die Aktivierung nur jede zweiten Bizelle in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix, und jede aktive Bizelle ist in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen.

**[0013]** Bei einer anderen Ausführungsform des Verfahrens ist die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Zellen, von denen eine jede etwa ein Neuntel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt, und der Aktivierungsschritt enthält die Aktivierung nur ausgewählter benachbarter Paare von Zellen in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix, um aktive Bizellen zu bilden, die entlang der senkrecht aufeinander stehenden Mengen der Gitterlinien beabstandet angeordnet sind. Nur vier von jeweils neun Zellen werden aktiviert, und jede aktive Bizelle ist in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen.

**[0014]** Bei beiden offenbarten Ausführungsformen des Verfahrens enthält der Schritt der Ausrichtung der Matrix kleiner Linsen deren Ausrichtung unter einem Winkel von ca. 45° zur ersten und zweiten Menge aufeinander senkrecht stehender Gitterlinien.

**[0015]** Aufgrund der oben stehenden Zusammenfassung wird deutlich, dass die vorliegende Erfindung einen wesentlichen Vorteil auf dem Gebiet der Wellenfrontsensoren zur Verwendung in adaptiven Optiksystemen darstellt. Insbesondere gestattet die Erfindung zweidimensionale Messungen der Phasenneigung über den Querschnitt eines Strahls, aber unter Verwendung von nur einer einzigen Matrix kleiner Linsen und einer einzigen Kamerasensormatrix. Andere Aspekte und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden detaillierteren Beschreibung in Verbindung mit den Zeichnungen ersichtlich.

## Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0016]** **Fig.** 1 ist ein Blockschaltbild eines adaptiven Optiksystems vom Stand der Technik;

**[0017]** **Fig.** 2 ist ein unvollständiges Diagramm, das die Wellenfrontsensormatrix von **Fig.** 1 mit einer Matrix kleiner Linsen und einer Kamerasensormatrix zeigt;

**[0018]** **Fig.** 3 ist ein Diagramm, das die Positionsbeziehung der Kamerasensormatrix in Bezug auf die Matrix kleiner Linsen in einem Wellenfrontsensor vom Stand der Technik zeigt;

**[0019]** **Fig.** 4 und 5 sind Diagramme, die die Positionsbeziehung zweier Kamerasensormatrizen in Bezug auf jeweilige Matrizen kleiner Linsen in einem anderen Wellenfrontsensor vom Stand der Technik zeigen;

**[0020]** **Fig.** 6 ist ein Diagramm, das die Positionsbeziehung der Matrix kleiner Linsen von **Fig.** 3 in Bezug auf verformbare Spiegelaktuatoren zeigt;

**[0021]** **Fig.** 7a und 7b sind Diagramme ähnlich **Fig.** 6, die aber die Positionsbeziehungen der Matrizen kleiner Linsen von **Fig.** 4 bzw. 5 in Bezug auf verformbare Spiegelaktuatoren zeigen;

**[0022]** **Fig.** 8 ist ein Diagramm, das gemäß der Erfindung die Positions- und Winkelbeziehung einer Matrix kleiner Linsen in Bezug auf verformbare Spiegelaktuatoren zeigt;

**[0023]** **Fig.** 9 ist ein Diagramm, das gemäß einer Ausführungsform der Erfindung die Auswahl aktiver Bildpunkte in einer Kamerasensormatrix in Bezug auf die Positionen von verformbaren Spiegelaktuatoren und Subaperturen der Matrix kleiner Linsen zeigt; und

**[0024]** **Fig.** 10 ist ein Diagramm ähnlich **Fig.** 9, das aber die Auswahl aktiver Bildpunkte in einer Kamerasensormatrix gemäß einer alternativen Ausführungsform der Erfindung zeigt.

## Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen

**[0025]** Wie zu Veranschaulichungszwecken auf den Zeichnungen gezeigt, betrifft die vorliegende Erfindung Techniken zum Messen der elementaren Phasenneigung in einem Lichtstrahl, der einer Wellenfrontverzerrung ausgesetzt worden ist wie z. B. durch Ausbreitung durch die Atmosphäre. Adaptive Optiksysteme werden zum Kompensieren von Wellenfrontverzerrung mittels eines einstellbaren optischen Elements wie z. B. eines verformbaren Spiegels eingesetzt. Ein verformbarer Spiegel hat typischerweise eine ununterbrochene aber flexible reflektierende

Oberfläche, die von der nicht reflektierenden Seite des Spiegels aus durch viele elementare Aktuatoren wie z. B. durch elektrische Signale bewegte Kolben verformt wird. Wie in **Fig.** 1 gezeigt kann ein adaptives Optiksystem einen verformbaren Spiegel dieses allgemeinen Typs, der mit dem Bezugszeichen **10** gekennzeichnet ist und eine Wellenfrontsensormatrix **12** enthalten. Ein auf den verformbaren Spiegel **10** fallender Lichtstrahl **14** wird in einen Strahlteiler **16** reflektiert, der zwei Ausgangsstrahlen **14a** und **14b** bereitstellt. Der Strahl **14a** wird auf ein Gerät (nicht dargestellt) gerichtet, das die vom Strahl transportierten Informationen nutzt. Ist das adaptive Optiksystem z. B. Teil eines astronomischen Teleskops, wird der Strahl **14a** in herkömmliche Komponenten eines Teleskops (nicht dargestellt) gerichtet. Der andere Ausgangsstrahl **14b** trifft auf die Wellenfrontsensormatrix **12**. Ausgangssignale von der Matrix **12** werden in einer Steuerung **18** der adaptiven Optik, die Steuersignale auf Leitungen **20** zum Steuern der einzelnen Aktuatoren **22** im verformbaren Spiegel **10** erzeugt, verarbeitet. Die Steuerung **18** verformt den Spiegel **10** derart, dass die Wellenfrontverzerrung auf nahe null verringert wird.

**[0026]** Wie in **Fig.** 2 gezeigt sind die Hauptkomponenten der Wellenfrontsensormatrix **12** eine Matrix **26** kleiner Linsen und eine Kamerasensormatrix **28**, von denen nur Abschnitte in der Figur gezeigt sind. Die Matrix **26** kleiner Linsen enthält eine große Anzahl kleiner auf einem rechteckigen Gittermuster positionierter Linsen. In **Fig.** 2 ist eine der kleinen Linsen mit ihrer Achse auf der Mittellinie **30** positioniert.

**[0027]** **Fig.** 3 zeigt einen unvollständigen Teil der Kamerasensormatrix **28** in der Draufsicht, einschließlich einer Zellen **28a**, **28b**, **28c** und **28d** aufweisenden Quadzelle. Bei einer Konfiguration gemäß dem Stand der Technik ist die Matrix **26** kleiner Linsen bezüglich der Kamerasensormatrix **28** so positioniert, dass jede Mittellinie einer kleinen Linse durch den Mittelpunkt einer Quadzelle verläuft, wie in der Figur angegeben. Außerdem ist die Quadzelle **28a**–**28d** so groß, dass ihre vier Ecken den Positionen von vier benachbarten Spiegelaktuatoren **22** entsprechen. Diese Positionen sind in den Zeichnungen mit dem Bezugszeichen **22'** gekennzeichnet. Wenn Licht, das durch die über der Quadzelle **28a**–**28d** positionierte einzelne kleine Linse tritt, genau in den Mittelpunkt der Quadzelle fällt, erzeugt jede der vier Zellen **28a**–**28d** ein identisches elektrisches Ausgangssignal. Die Apertur jeder kleinen Linse wird als Strahlsubapertur bezeichnet, und zu Erklärungszwecken wird angenommen, dass jede Subapertur eine quadratische Fläche umfasst, die in diesem Fall der Fläche der Quadzelle **28a**–**28d** in **Fig.** 3 entspricht. Die Mitte der Subapertur ist die Mittellinie **30**.

**[0028]** Wenn Licht von der kleinen Linse nicht genau auf der Quadzelle **28a**–**28d** zentriert ist, kann der Grad der "Neigung" des Strahls in einer X-Achsen-Richtung und einer Y-Achsen-Richtung anhand der Signale bestimmt werden, die von den vier Elementen **28a**–**28d** der Quadzelle ausgegeben werden. Die von der Mitte **30** der Quadzelle ausgehenden Pfeile zeigen die Richtungen der X-Achsen- und Y-Achsen-Neigung an. Wenn die von der Quadzelle **28a**–**28d** ausgegebenen Signale A, B, C bzw. D sind, ist insbesondere die Y-Achsen-Neigung proportional zu:

$$\frac{(A+B)-(C+D)}{(A+B+C+D)}$$

**[0029]** Entsprechend ist die X-Achsen-Neigung proportional zu:

$$\frac{(A+C)-(B+D)}{(A+B+C+D)}$$

**[0030]** Unter Verwendung dieser Ausdrücke kann die Steuerung **18** des adaptiven Optiksystems geeignete Einstellungen der Aktuatoren **22** zum Eliminieren der Neigung in jeder Richtung vornehmen. Eine wesentliche Schwierigkeit bei dieser Konfiguration besteht darin, dass die Neigungsmessungen in der Mitte jeder Quadzelle durchgeführt werden, aber diese Messungen in Korrekturen umgesetzt werden müssen, die an den Positionen der Ecken der Quadzelle angewendet werden, wo sich die Aktuatoren befinden. Eine Bewegung eines Aktuators **22** an einer entsprechenden Ecke **22'** der Quadzelle führt offensichtlich zu einer in der Mitte der Quadzelle gemessenen Neigungsänderung in der X-Achsen- und Y-Achsen-Richtung. Dann wäre idealerweise die Verwendung einer Konfiguration wünschenswert, bei der Neigungsmessungen zwischen zwei benachbarten Aktuatorpositionen in derselben X-Achsen- oder Y-Achsen-Linie vorgenommen würden.

**[0031]** Die in den **Fig.** 4 und 5 dargestellte Konfiguration vermeidet den Nachteil der oben besprochenen Konfiguration durch Bereitstellen zweier separater Matrizen kleiner Linsen und zweier entsprechender Kamerasensormatrizen, um zwei Mengen Neigungsmessungen vorzunehmen. Wie in **Fig.** 4 gezeigt, ist eine erste Matrix kleiner Linsen mit der Mittellinie bei **30x** mit ihrer Subapertur nominell über dem Mittelpunkt einer Bizelle **32e**–**32f**, die Teil einer ersten Kamerasensormatrix **32** ist, positioniert. Die Bizelle **32e**–**32f** ist auch über einer horizontalen (X-Achsen-)Linie positioniert, die zwei benachbarte Aktuatorpositionen **22'** verbindet, wie in **Fig.** 4 gezeigt ist. Sind die von den Zellen **32e** und **32f** erzeugten elektrischen Ausgangssignale E bzw. F, ist die X-Achsen-Neigung des Subaperturstrahls proportional zu:

$$\frac{E-F}{E+F}$$

**[0032]** Wie in **Fig.** 5 gezeigt hat die zweite Matrix kleiner Linsen einen Mittelpunkt bei **30y** in der Mitte zwischen zwei benachbarten Aktuatorpositionen **22'** auf einer Y-Achsen-Linie. Eine zweite Kamerasensormatrix hat eine Bizelle **34g**–**34h**, die auch über der Mittellinie **30y** positioniert ist, um eine Messung der Y-Achsen-Neigung des Subaperturstrahls zu gestatten. Sind die Ausgangssignale der Bizelle **34g**–**34h** G bzw. H, ist die Y-Achsen-Neigung proportional zu:

$$\frac{G-H}{G+H}$$

**[0033]** Leider würden die zwei Matrizen kleiner Linsen dieser Konfiguration einander physisch stören, wenn sie im selben Strahl platziert würden, daher besteht die übliche Methode in der Verwendung eines zusätzlichen Strahlteilers (nicht dargestellt) und in der Durchführung der Y-Achsen- und Y-Achsen-Messungen mit separaten Strahlen. Dadurch ergeben sich Ausrichtungsschwierigkeiten, die beinahe zwangsläufig eine nachteilige Wirkung auf die Leistung haben. Außerdem erhöhen sich durch die Verwendung einer zweiten Matrix kleiner Linsen und einer zweiten Kamerasensormatrix die Gesamtkosten des Geräts.

**[0034]** Die **Fig.** 6, 7a und 7b zeigen für die zwei Konfigurationen gemäß dem Stand der Technik die Positionsbeziehung zwischen den Aktuatorpositionen **22'** und den Mittellinienpositionen der Matrizen kleiner Linsen. Wie in **Fig.** 6 gezeigt ist für die erste Konfiguration jede Mittellinie **30** einer kleinen Linse von vier benachbarten Aktuatorpositionen **22'** gleich weit entfernt positioniert. Ähnlich sind für die zweite Konfiguration vom Stand der Technik wie in den **Fig.** 7a und 7b gezeigt erste Mittellinienpositionen **30x** kleiner Linsen jeweils in der Mitte zwischen benachbarten Aktuatorpositionen **22'** auf derselben horizontalen (X-Achsen-)Linie positioniert und zweite Mittellinienpositionen **30y** kleiner Linsen zwischen benachbarten Aktuatorpositionen auf derselben vertikalen (Y-Achsen-) Linie positioniert. Aus den **Fig.** 6, 7a und 7b wird auch klar, dass bei den Konfigurationen gemäß dem Stand der Technik die kleinen Linsen in den Matrizen kleiner Linsen alle auf rechteckigen oder quadratischen Gittermustern angeordnet sind, die winklig auf die Kamerasensormatrix und auf das Gittermuster, auf dem die Aktuatorpositionen **22'** angeordnet sind, ausgerichtet sind.

**[0035]** Gemäß der vorliegenden Erfindung ist das Gittermuster einer Matrix kleiner Linsen mit Mittellinien **40** kleiner Linsen im Winkel von 45° zum dem Gittermuster positioniert, auf dem die Aktuatorpositionen **22'** angeordnet sind, wie in **Fig.** 8 dargestellt, und eine einzige Kamerasensormatrix **42** mit ausgewählten X-Bizellen **42a**–**42b** und ausgewählten Y-Bizellen **42c**–**42d** ist in der Mitte zwischen benachbarten Aktuatorpositionen **22'** in der X-Achse bzw. der Y-Achse positioniert, wie in **Fig.** 9 dargestellt. Weil die Bizellen der Kamerasensormatrix **42** in mindestens einer Dimension um den Faktor zwei kleiner sind als die bei der Konfiguration der **Fig.** 4 und 5 verwendeten, können X-Achsen- und Y-Achsen-Neigungsmessungen ohne physische Störung zwischen den zwei Mengen erforderlicher Bizellen durchgeführt werden. Bei der Konfiguration von **Fig.** 9 wird nur die Hälfte der Gesamtzahl der Bizellen in der Matrix **42** aktiviert. Die Messwerte der X-Achsen- und Y-Achsen-Neigung werden von den Ausgangssignalen der aktivierten Zellen abgeleitet. Insbesondere ist die X-Achsen-Neigung zu von der Bizelle **42a**–**42b** abgeleiteten Ausgängen (A–B) proportional und die Y-Achsen-Neigung zu der von der Bizelle **42c**–**42d** abgeleitet Ausgangsdifferenz (C – D) proportional.

**[0036]** Bei der Konfiguration von **Fig.** 10 hat die mit dem Bezugszeichen **44** gekennzeichnete Kamerasensormatrix noch kleinere Bizellen. Jede der zwei Zellen **44a**, **44b** oder **44c**, **44d** in einer Bizelle in **Fig.** 10 misst ein Drittel des Abstands zwischen zwei Aktuatorpositionen **22'**. Aus **Fig.** 10 ist auch ersichtlich, dass bei dieser Konfiguration nur vier von allen neun Zellen aktiviert werden.

**[0037]** Folglich liefert die Erfindung die Vorteile der in den **Fig.** 4 und 5 gezeigten Konfiguration gemäß dem Stand der Technik, bei der Neigungsmessungen in jeder Achse in der Mitte zwischen benachbarten Aktuatorpositionen in dieser Achse erfolgen, aber es werden nur eine einzige Matrix kleiner Linsen und eine einzige Kamerasensormatrix benötigt. Es ist deshalb klar, dass die Erfindung einen bedeutenden Vorteil auf dem Gebiet der Wellenfrontsensoren zur Verwendung in adaptiven Optiksystemen darstellt. Obwohl die Erfindung zu Veranschaulichungszwecken detailliert beschrieben wurde, versteht es sich, dass verschiedene Modifikationen vorgenommen werden können, ohne vom Gültigkeitsbereich der beiliegenden Ansprüche abzuweichen. Die Erfindung wird folglich nur durch die beiliegenden Ansprüche eingeschränkt.

## Patentansprüche

1. Wellenfrontsensor (**12**) zur Verwendung bei der Messung der lokalen Phasenneigung in zwei Dimensionen über einen optischen Strahlquerschnitt entlang einer ersten und zweiten aufeinander senkrecht stehender Menge Gitterlinien, die sich in interessierenden Punkten schneiden, die den Positionen (**22'**) von Aktuatoren für optische Geräte entsprechen, aufweisend:
eine Matrix kleiner Linsen mit einer Mehrzahl kleiner Linsen, deren optische Achsen (**40**) in jedem Schnittpunkt eines rechtwinkligen Gitters positioniert sind, das in einem Winkel zur ersten und zweiten Menge der Gitterlinien ausgerichtet ist, wobei die kleinen Linsen so beabstandet sind, dass die optischen Achsen

der Linsen auf der ersten und zweiten Menge der Gitterlinien zwischen benachbarten interessierenden Punkten in den Schnittpunkten dieser Linien positioniert sind; und
eine Kamerasensormatrix mit einer Mehrzahl X- und Y-Bizellen (**42a**–**d**), die in entsprechenden Zeilen und Spalten parallel zur ersten und zweiten Menge der Gitterlinien und neben der Matrix aus kleinen Linsen angeordnet sind, um durchgehendes Licht zu empfangen, wobei nur ausgewählte Zellen der X- und Y-Bizellen der Sensormatrix, die etwa den Positionen der optischen Achsen der kleinen Linsen entsprechen, aktiviert werden, um einen Messwert der Phasenneigung in den Richtungen der aufeinander senkrecht stehenden Mengen der Gitterlinien bereitzustellen;
so dass nur eine Matrix kleiner Linsen und eine Kamerasensormatrix erforderlich sind, um Neigungsmessungen in beiden zueinander senkrecht stehenden Richtungen zu gestatten.

2. Wellenfrontsensor nach Anspruch 1, bei dem:
die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Bizellen ist, von denen eine jede etwa ein Viertel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt;
nur jede zweite Bizelle in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix aktiviert wird; und jede aktive Bizelle in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet ist, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen.

3. Wellenfrontsensor nach Anspruch 2, bei dem jeder Bizellen-Bildpunkt ungefähr quadratisch ist.

4. Wellenfrontsensor nach Anspruch 1, bei dem:
die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Zellen ist, von denen eine jede etwa ein Neuntel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt;
nur ausgewählte benachbarte Paare von Zellen in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix aktiviert werden, um aktive Bizellen zu bilden, die entlang der senkrecht aufeinander stehenden Mengen der Gitterlinien beabstandet angeordnet sind;
nur vier von jeweils neun Zellen aktiviert werden; und
jede aktive Bizelle in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet ist, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen.

5. Wellenfrontsensor nach Anspruch 4, bei dem jede Zelle ungefähr quadratisch ist.

6. Wellenfrontsensor nach Anspruch 1, bei dem die die Matrix kleiner Linsen definierende rechtwinklige Matrix unter etwa 45° zur ersten und zweiten Menge der aufeinander senkrecht stehenden Mengen der Gitterlinien ausgerichtet ist.

7. Verfahren zur Messung der lokalen Phasenneigung in zwei Dimensionen über einen optischen Strahlquerschnitt entlang einer ersten und zweiten aufeinander senkrecht stehenden Menge Gitterlinien, die sich an interessierenden Punkten (**22'**) schneiden, die den Positionen von Aktuatoren für optische Geräte entsprechen, wobei das Verfahren die Schritte aufweist:
Schicken eines Strahls durch eine Matrix kleiner Linsen mit einer Mehrzahl kleiner Linsen, die in jedem Schnittpunkt eines rechtwinkligen Gitters ausgebildet sind;
Ausrichten der Matrix kleiner Linsen mit ihrem rechtwinkligen Gitter kleiner Linsen unter einem Winkel zur ersten und zweiten Menge der senkrecht aufeinander stehenden Gitterlinien; wodurch
die Matrix kleiner Linsen so positioniert wird, dass jede kleine Linse eine Subapertur (**40**) hat, die nahe der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten zentriert ist;
Platzieren einer einzigen Kamerasensormatrix neben der Matrix kleiner Linsen, um von diesen Licht zu empfangen, wobei die Sensormatrix Sensorzellen aufweist, deren Anzahl pro Flächeneinheit größer ist als die Anzahl kleiner Linsen pro Flächeneinheit;
Ausrichten der Sensormatrix, so dass sie mit der ersten und zweiten Menge der senkrecht aufeinander stehenden Gitterlinien zur Deckung kommt;
Aktivieren ausgewählter Zellen (**42a**–**d**) in der Sensormatrix, wobei die ausgewählten Zellen X- und Y-Bizellen sind, die in entsprechenden Zeilen und Spalten etwa über dem Mittelpunkt jeder Subapertur der Matrix kleiner Linsen angeordnet sind; und
Erfassen eines Messwertes für jedes Paar benachbarter interessierender Punkte, wobei der Bizellenmesswert die Phasenneigung in der Richtung zwischen den benachbarten interessierenden Punkten angibt.

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem:
die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Bizellen ist, von denen eine jede etwa ein Viertel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates einnimmt;
der Aktivierungsschritt die Aktivierung nur jeder zweiten Bizelle in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix enthält; und
jede aktive Bizelle in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet ist, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen.

9. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem:
die Kamerasensormatrix eine rechtwinklige Anordnung aus Zellen ist, von denen eine jede etwa ein Neuntel der Fläche jedes von vier benachbarten interessierenden Punkten definierten Quadrates ein-

nimmt;
der Aktivierungsschritt die Aktivierung nur ausgewählter benachbarter Paare von Zellen in jeder Spalte und Zeile der Sensormatrix enthält, um aktive Bizellen zu bilden, die entlang der senkrecht aufeinander stehenden Mengen der Gitterlinien beabstandet angeordnet sind;
nur vier von jeweils neun Zellen aktiviert werden; und
jede aktive Bizelle in der Mitte einer Linie zwischen zwei benachbarten interessierenden Punkten angeordnet ist, um die Neigung relativ zur Richtung dieser Linie zu messen.

10. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem der Schritt der Ausrichtung der Matrix kleiner Linsen die Ausrichtung der Matrix kleiner Linsen unter einem Winkel von ca. 45° zur ersten und zweiten Menge aufeinander senkrecht stehender Gitterlinien enthält.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

**Anhängende Zeichnungen**

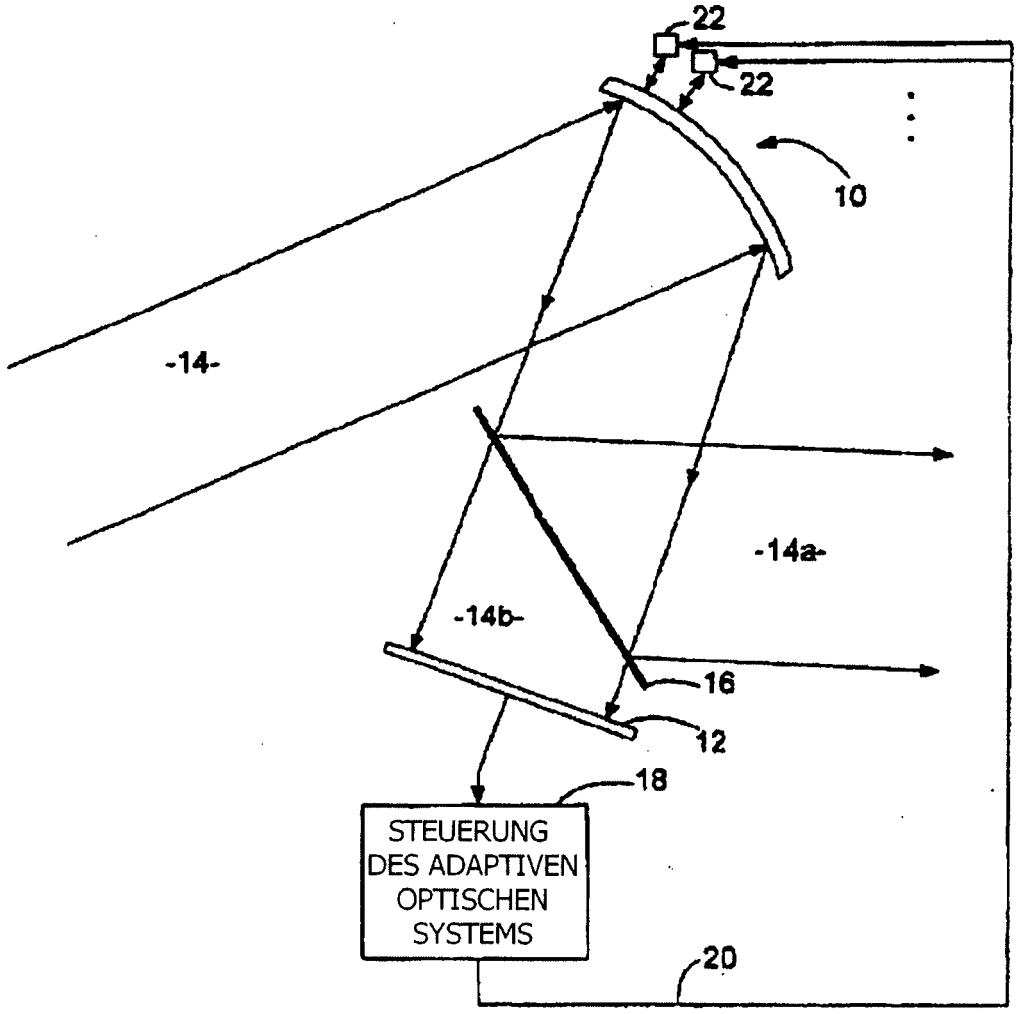



FIG. 1 (STAND DER TECHNIK)

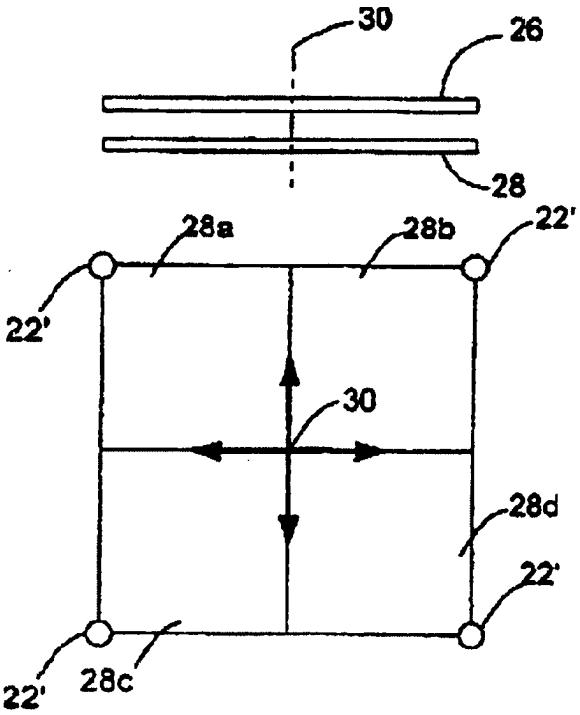



FIG. 2 (STAND DER TECHNIK

FIG. 3 (STAND DER TECHNIK

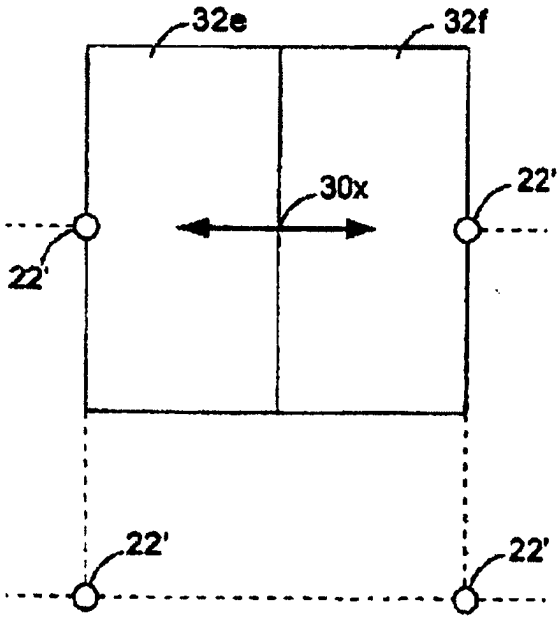



FIG. 4 (STAND DER TECHNIK)

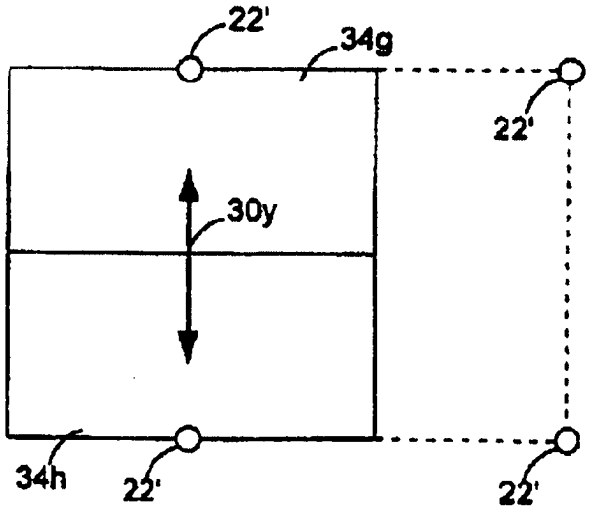



FIG. 5 (STAND DER TECHNIK)

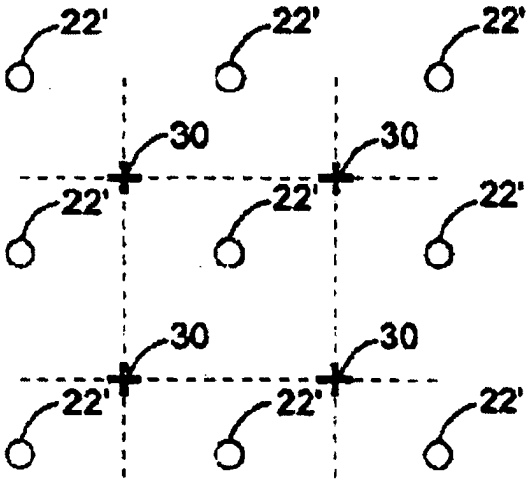



FIG. 6 (STAND DER TECHNIK)

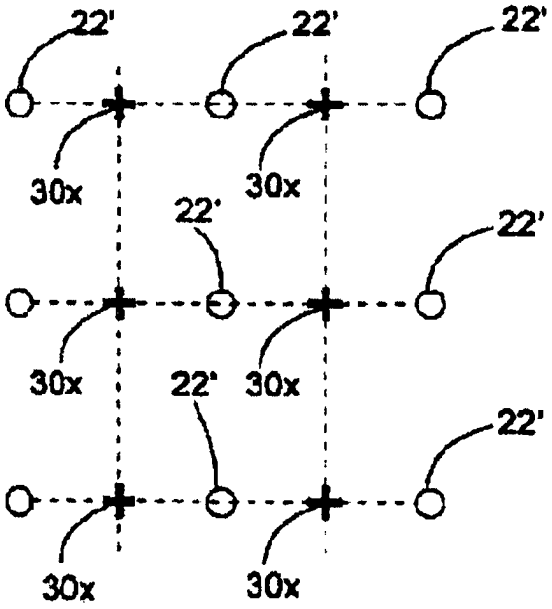



FIG. 7a (STAND DER TECHNIK)

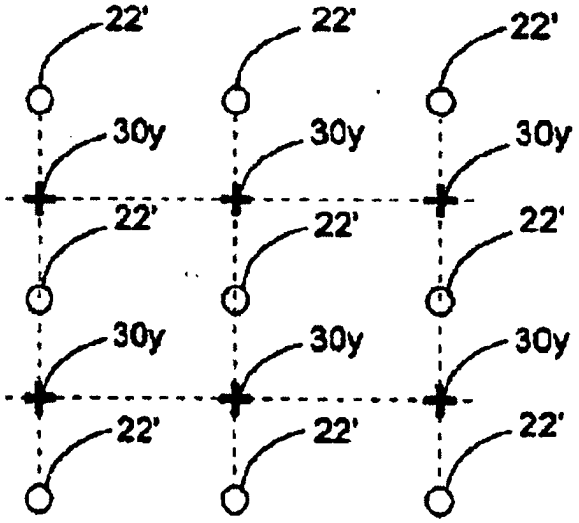



FIG. 7b (STAND DER TECHNIK)

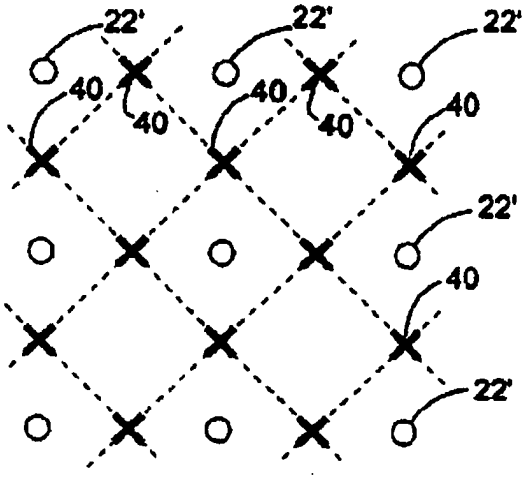



FIG. 8

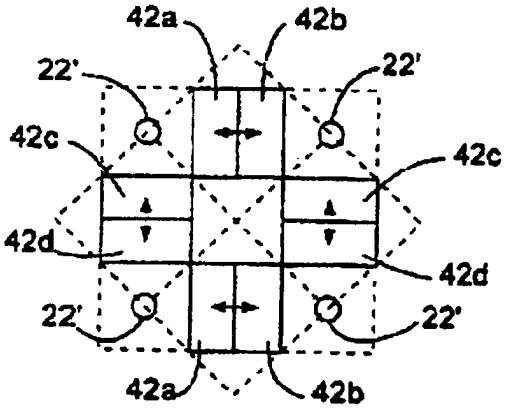



FIG. 9

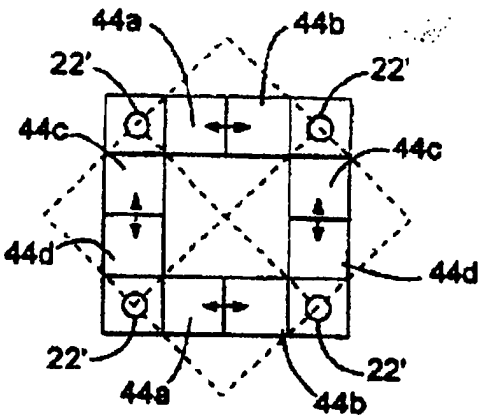



FIG. 10