



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 07 117 T2 2004.06.03**

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 181 617 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 07 117.0**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US00/13525**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 936 012.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/70386**

(86) PCT-Anmeldetag: **16.05.2000**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **23.11.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **27.02.2002**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **10.12.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **03.06.2004**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G02B 27/28**  
**H04N 9/31**

(30) Unionspriorität:

**312917 17.05.1999 US**

(73) Patentinhaber:

**3M Innovative Properties Co., St. Paul, Minn., US**

(74) Vertreter:

**Vossius & Partner, 81675 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, ES, FR, GB, IT, SE**

(72) Erfinder:

**BRUZZONE, L., Charles, Saint Paul, US;**  
**AASTUEN, J., David, Saint Paul, US; STRHARSKY,**  
**J., Roger, Saint Paul, US; ECKHARDT, K., Stephen,**  
**Saint Paul, US; WEBER, F., Michael, Saint Paul,**  
**US; BOYD, T., Gary, Saint Paul, US**

(54) Bezeichnung: **REFLEKTIERENDES LCD PROJEKTIONSSYSTEM MIT WEITWINKEL POLARISATIONSSTRAHLENTEILER**

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

## TECHNISCHER HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0001] Die Erfindung betrifft optische Abbildungssysteme mit einem Polarisationsstrahlteiler (PBS). Genauer gesagt betrifft die Erfindung ein optisches Abbildungssystem mit einem reflektierenden Bildwandler und einem Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler ("PBS") mit fester Polarisationsachse. Das erfindungsgemäße optische Abbildungssystem ist bei "schnellen" optischen Strahlen (niedriger f-Nummer bzw. Blendenzahl) einsetzbar und liefert dabei ein hohes Kontrastverhältnis. Der Begriff "optisches Abbildungssystem" soll Auf- und Durchprojektionssysteme, Projektionsanzeigen, Datenhelme, virtuelle Sichtgeräte, Head-Up-Displays bzw. Blickfeld-Darstellungsgeräte, optische Computer-, optische Korrelationsdisplays und andere, ähnliche optische Sicht- und Anzeigesysteme einschließen.

[0002] Optische Abbildungssysteme können einen lichtdurchlässigen oder reflektierenden Bildwandler oder ein Lichtventil aufweisen. Herkömmliche durchlässige Lichtventile lassen zur Erzeugung eines Bildes bestimmte Anteile eines Lichtstrahls durch das Lichtventil durch. Durch ihre bloße Funktion sind durchlässige Lichtventile lichtdurchlässig und lassen Licht hindurchtreten. Reflektierende Lichtventile reflektieren wiederum nur ausgewählte Anteile des einfallenden Lichtstrahls, um ein Bild zu erzeugen. Reflektierende Lichtventile bieten wichtige Vorteile, da unter der reflektierenden Oberfläche Steuerschaltungen angeordnet werden können und eine weiterentwickeltere integrierte Schaltkreistechnik verfügbar wird, wenn die Substratwerkstoffe nicht durch ihre Lichtundurchlässigkeit eingeschränkt sind. Neue, möglicherweise preiswerte und kompakte Flüssigkristall-Farbdisplay- (LCD-) Projektorkonfigurationen können durch die Verwendung reflektierender LC-Mikrodisplays möglich werden.

[0003] Für Projektionssysteme, die auf reflektierenden LCD-Bildwandlern basieren, bietet ein geknickter Strahlengang, in dem sich der Beleuchtungsstrahl und das projizierte Bild den gleichen physikalischen Raum zwischen einem Polarisationsstrahlteiler und dem Bildwandler teilen, eine wünschenswerte kompakte Anordnung. Die vorliegende Erfindung analysiert und erkennt ein "Depolarisationskaskadenproblem", das die f/# (Lichtstärke bzw. Blendenzahl) der Beleuchtungsoptik herkömmlicher optischer Abbildungssysteme begrenzt, die einen auf der Unterscheidung zwischen p- und s-Polarisationszuständen basierenden Polarisationsstrahlteiler verwenden. Die meisten reflektierenden LCD-Bildwandler sind polarisationsdrehend; das heißt, polarisiertes Licht wird entweder für den dunkelsten Zustand mit im wesentlichen unverändertem Polarisationszustand durchgelassen, oder mit einer bestimmten Polarisationsdrehung, um einen gewünschten Graubereich zu bereitzustellen. Eine Drehung um 90° ergibt in diesen Systemen den hellsten Zustand. Dementsprechend wird ein polarisierter Lichtstrahl im allgemeinen als Eingangsstrahl für reflektierende LCD-Bildwandler verwendet. Der Einsatz eines Polarisationsstrahlteilers (PBS) bietet attraktive Konstruktionsvorteile sowohl für die Polarisation des Eingangsstrahls als auch für das Knicken des Strahlengangs.

[0004] Ein Polarisationsstrahlteiler (PBS) ist ein optisches Bauelement, das einfallende Lichtstrahlen in eine erste Polarisationskomponente und eine zweite Polarisationskomponente aufspaltet. Herkömmliche Polarisationsstrahlteiler funktionieren auf der Basis der Lichteinfallsebene, d. h. einer durch den einfallenden Lichtstrahl und eine Normale zur Polarisationsfläche definierten Ebene. Die Lichteinfallsebene wird auch als Reflexionsebene bezeichnet, definiert durch den reflektierten Lichtstrahl und eine Normale zur Reflexionsfläche.

[0005] Nach einer auf der Funktionsweise herkömmlicher Polarisatoren basierenden Beschreibung weist Licht zwei Polarisationskomponenten auf, eine p- und eine s-Komponente. Die p-Komponente entspricht in der Einfallsebene polarisiertem Licht. Die s-Komponente entspricht senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht.

[0006] Um den höchstmöglichen Wirkungsgrad in einem optischen Abbildungssystem zu erzielen, ist ein System mit niedriger f/# wünschenswert (siehe F.E. Doany et al., "Projection display throughput; Efficiency of optical transmission and lightsource collection" (Durchfluß von Projektionsdisplays; Wirkungsgrad der Lichttransmission und Lichtquellensammlung), IBM J. Res. Develop. V42, Mai/Juli 1998, S. 387-398). Die Lichtstärke (Blendenzahl) mißt das Lichtsammelvermögen einer optischen Linse und ist wie folgt definiert:

$f/\# = f \text{ (Brennweite)} : D \text{ (Durchmesser oder freie Öffnung der Linse)}$

[0007] Die f/# (oder F) mißt die Größe des Lichtkegels, der zum Beleuchten eines optischen Elements verwendet werden kann. Je kleiner die f/#, desto schneller ist die Linse und desto größer ist der Lichtkegel, der bei diesem optischen Element verwendet werden kann. Ein größerer Lichtkegel setzt sich gewöhnlich in einen höheren Lichtdurchfluß um. Dementsprechend erfordert ein schnelleres Beleuchtungssystem (niedrigere f/#) einen Polarisationsstrahlteiler, der Lichtstrahlen mit einem größeren Einfallswinkelbereich auffangen kann.

[0008] Der maximale Einfallswinkel  $\theta_{\max}$  (die äußeren Strahlen des Lichtkegels) läßt sich mathematisch aus der f/#, F herleiten:

$$\theta_{\max} = \tan^{-1} ((2 F)^{-1})$$

[0009] Herkömmliche optische Abbildungssysteme mit geknicktem Strahlengang verwendeten ein als MacNeille-Polarisator bekanntes optisches Element. MacNeille-Polarisatoren nutzen die Tatsache, daß ein Winkel existiert, der als Brewsterscher oder Polarisationswinkel bezeichnet wird, bei dem von einer Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex kein p-polarisiertes Licht reflektiert wird. Der Brewstersche Winkel ist gegeben durch:

$$\theta_B = \tan^{-1} (n_1/n_0),$$

wobei  $n_0$  der Brechungsindex eines Mediums und  $n_1$  der Brechungsindex des anderen Mediums ist. Wenn der Einfallswinkel des einfallenden Lichtstrahls den Brewsterschen Winkel erreicht, wird der reflektierte Strahlanteil in der zur Einfallsebene senkrechten Ebene polarisiert. Der durchgelassene Strahlanteil wird vorzugsweise (aber nicht vollständig) in der zur Einfallsebene parallelen Ebene polarisiert. Um eine wirksame Reflexion von s-polarisiertem Licht zu erzielen, wird ein MacNeille-Polarisator aus mehreren Dünnschichtfilmen aus Materialien aufgebaut, die für den gewünschten Winkel die Brewstersche Winkelbedingung erfüllen. Die Schichtdicken sind so gewählt, daß die Schichtenpaare einen Viertelwellenstapel bilden.

[0010] Diese Konstruktion hat den Vorteil, daß die Brewstersche Winkelbedingung nicht von der Wellenlänge abhängt (mit Ausnahme der Dispersion in den Materialien). Wegen der Tatsache, daß die Brewstersche Winkelbedingung für ein Materialpaar nur bei einem Einfallswinkel streng erfüllt ist, ist es jedoch für MacNeille-Polarisatoren schwierig, eine Weitwinkelfunktion zu erzielen. Mit einer Abweichung des Einfallswinkels von diesem Winkel entwickelt sich eine spektral ungleichmäßige Streuung. Diese Streuung verstärkt sich besonders in dem Maße, wie der Einfallswinkel an dem Schichtenstapel der Normalen näher kommt als der Brewstersche Winkel. Wie weiter unten erläutert wird, treten bei einem Projektor mit geknicktem Strahlengang auch Kontrastnachteile auf, die mit der Verwendung der p- und s-Polarisation verbunden sind, bezogen auf die Reflexionsebene für jeden Strahl.

[0011] Typischerweise sind MacNeille-Polarisationsstrahlteiler (PBS) in Glaswürfeln enthalten, wobei ein Polarisationsstrahlteiler-Dünnschichtstapel entlang einer Diagonalebene des Würfels aufgebracht wird. Durch geeignete Auswahl des Brechungsindex im Glaswürfel kann der Polarisationsstrahlteiler so konstruiert werden, daß senkrecht auf die Würfelfläche auffallendes Licht im Brewsterschen Winkel des Polarisationsstrahlteilers auffällt. Die Verwendung von Würfeln verursacht jedoch gewisse Nachteile, die hauptsächlich mit der Entstehung einer durch thermische Spannung hervorgerufenen Doppelbrechung verbunden sind, die das Polarisationsverhalten der Komponente verschlechtert. Auch teure, vorvergütete Würfel können unter dieser Schwierigkeit leiden. Außerdem erhöhen Würfel das Gewicht eines kompakten Systems erheblich.

[0012] Wie berichtet, sind Polarisationsstrahlteiler vom MacNeille-Typ entwickelt worden, die bei so niedrigen  $f/\#$  wie 2,5 zwischen s- und p-polarisiertem Licht unterscheiden können und dabei Auslöschungswerte von mehr als 100:1 zwischen einfallenden Strahlen mit reiner s- oder reiner p-Polarisation liefern. Bei Verwendung von Polarisationsstrahlteilern vom MacNeille-Typ in einem geknickten Strahlengang mit reflektierenden Bildwandlern verschlechtert sich leider, wie weiter unten erläutert, der Kontrast wegen Depolarisation von Lichtstrahlen, deren Reflexionsebene bezüglich der Reflexionsebene des Hauptstrahls gedreht ist. Der Begriff "Depolarisation", wie er nachstehend gebraucht wird, soll die Abweichung des Polarisationszustands eines Lichtstrahls von dem des Hauptlichtstrahls beschreiben. Da Licht in einem Projektionssystem im allgemeinen als Kegel projiziert wird, sind die meisten Lichtstrahlen nicht vollkommen parallel zum Hauptlichtstrahl. Die Depolarisation nimmt mit abnehmender  $f/\#$  zu und wird in anschließenden Reflexionen an farbeselektiven Schichten vergrößert. Diese "Depolarisationskaskade" ist von einigen Konstrukteuren optischer Abbildungssysteme berechnet worden, um die  $f/\#$  von Projektoren auf der Basis MacNeillescher Polarisationsstrahlteiler effektiv auf etwa 3,3 zu begrenzen, wodurch die Lichtdurchflußleistung dieser Systeme begrenzt wird. Siehe A. E. Rosenbluth et al., "Contrast properties of reflective liquid crystal light valves in projection displays" (Kontrasteigenschaften reflektierender Flüssigkristall-Lichtventile in Projektionsdisplays), IBM J. Res. Develop. V42, Mai/Juli 1998, S. 359-386 (nachstehend als "Rosenbluth Kontrasteigenschaften" bezeichnet), wovon relevante Abschnitte hiermit durch Verweis einbezogen werden.

[0013] In letzter Zeit hat Minnesota Mining and Manufacturing einen neuartigen Typ einer doppelbrechenden mehrschichtigen Polymer-Polarisationsfolie ("3M advanced film" – weiterentwickelte 3M-Folie) entwickelt. Die mitübertragene und gleichzeitig anhängige Hauptanmeldung 49837USA6E Beam Splitter (Strahlteiler) beschreibt die Anwendung einer solchen Folie als Polarisationsstrahlteiler. Die Europäische Patentanmeldung EP 0 837 351 A2 versucht, 3M dual brightness enhancing film (DBEF – Helligkeitsverbessernde Doppelfolie), ein frühes mehrschichtiges 3M-Folienmaterial, in einer Projektionsanzeigevorrichtung mit einem reflektierenden "Weitwinkel"-Polarisator zu nutzen. Dieses Dokument bezieht sich auf die Unterscheidung von p- und s-polarisiertem Licht und verwendet das 3M-Material als gewöhnlichen reflektierenden Polarisator. Außerdem ist zwar eine "Weitwinkel"-Funktion ein allgemein erkanntes Entwicklungsziel, aber Verweise auf "Weitwinkel"

sind sinnlos bei fehlenden Kontrastgrenzwerten, fehlender Verminderung von spektraler Streuung und fehlender Anleitung, wie ein solches Ziel zu erreichen ist. Das 3M-Produkt "DBEF" ist ein reflektierender Polarisator mit typischen Streuverlusten in Blockrichtung von 4 bis 6 Prozent bei senkrechtem Einfall. Bei höheren Winkeln wird die Streuung etwas vermindert, aber bei 45 Grad beträgt die Auslöschung typischerweise noch einige Prozent. Kontrastverhältnisse bei Verwendung von DBEF sind typischerweise auf Höchstwerte bei oder unter 99:1 für weißes Licht begrenzt. DBEF leidet jedoch unter spektralen Streuverlusten, die den Kontrast bestimmter Farbbänder auf nur 25:1 vermindern, in Abhängigkeit von der Natur der Lichtquelle und der exakten DBEF-Probe. Um eine hervorragende Leistung zu erzielen, ist es wünschenswert, daß ein guter Kontrast in allen relevanten Farbbändern mit einer guten Gleichmäßigkeit des Bildschirms und der Abwesenheit von spektralen Streuverlusten im Dunkelzustand verbunden ist.

[0014] Es bleibt der Bedarf an einem optischen Abbildungssystem, das schnelle optische Komponenten mit echten Weitwinkleigenschaften aufweist und die Betrachtung oder Anzeige von kontrastreichen Bildern ermöglicht.

## ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0015] Die vorliegende Erfindung beschreibt ein optisches Abbildungssystem mit vorteilhafter Verwendung eines "Cartesischen" Weitwinkel-Polarisationsstrahlteilers ("PBS"). Ein Cartesischer Polarisationsstrahlteiler ist als ein Polarisationsstrahlteiler definiert, in dem die Polarisation getrennter Strahlen auf Invariante, im allgemeinen orthogonale Hauptachsen der Polarisationsstrahlteilerfolie bezogen wird. Im Gegensatz zu einem MacNeilleschen Polarisationsstrahlteiler ist in einem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler die Polarisation der getrennten Strahlen im wesentlichen unabhängig vom Einfallswinkel der Strahlen. Die Verwendung einer Cartesischen Polarisationsstrahlteilerfolie ermöglicht außerdem die Entwicklung von Systemen mit Verwendung von gekrümmten Polarisationsstrahlteilern, die eine höhere Lichtausbeute liefern und/oder andere optische Komponenten ersetzen oder vermehren.

[0016] Ein Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler ist als ein Polarisationsstrahlteiler definiert, der einen Lichtstrahlenkegel mit einem Einfallswinkel bis zu  $11^\circ$  oder mehr empfangen kann und dabei einen akzeptierbaren Systemkontrast aufrechterhält. Durch Erkennung und vorteilhafte Anwendung von Eigenschaften der Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler offenbart die vorliegende Erfindung ein optisches Abbildungssystem mit hohem Wirkungsgrad, das bei  $f/\#$  kleiner oder gleich 2,5 funktionieren kann und dabei ein Kontrastverhältnis von mindestens 100 zu 1, oder stärker bevorzugt von 150 zu 1 in einer Projektionssystem-Konfiguration aufrechterhält.

[0017] Ein optisches Abbildungssystem gemäß der vorliegenden Erfindung weist einen Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler, eine Lichtventil-Beleuchtungsoptik mit einer  $f/\# \leq 2,5$  und mindestens ein reflektierendes Lichtventil auf. Der Cartesische Polarisationsstrahlteiler (PBS) weist eine strukturelle Orientierung auf, die feste Polarisationsachsen definiert. Ein reflektierender Cartesischer Polarisationsstrahlteiler reflektiert im wesentlichen diejenigen Komponenten eines Lichtstrahls, die entlang einer solchen festen Achse polarisiert sind, die als Materialachse bezeichnet wird. Diejenigen Komponenten eines Lichtstrahls, die nicht entlang der Materialachse polarisiert sind, werden im wesentlichen durchgelassen. Der Polarisationsstrahlteiler spaltet daher einfallendes Licht in einen ersten und einen zweiten, weitgehend polarisierten Strahl mit Polarisationzuständen auf, die auf die festen Polarisationsachsen bezogen sind, und der Polarisationsstrahlteiler lenkt den ersten polarisierten Strahl auf das reflektierende Lichtventil. In einer typischen Ausführungsform weist der Cartesische Polarisationsstrahlteiler weiterentwickelte 3M-Folie (3M advanced film) auf. In anderen typischen Ausführungsformen kann der Polarisationsstrahlteiler einen Drahtgitter-Polarisator aufweisen, wie z. B. diejenigen, die in Schnabel et al., "Study on Polarizing Visible Light by Subwavelength-Period Metal-Stripe Gratings" (Untersuchung zur Polarisation von sichtbarem Licht durch Metallstreifengitter mit Subwellenlängen-Gitterkonstante), Optical Engineering 38(2), S. 220-226, Februar 1999, beschrieben werden. Es können auch andere geeignete Cartesische Polarisatoren eingesetzt werden.

[0018] Die Lichtventil-Beleuchtungsoptik weist eine  $f/\#$  von höchstens 2,5, einen minimalen Kegelwinkel von etwa 12 Grad auf, und das System weist bei Verwendung eines idealen Bildwandlers ein Kontrastverhältnis von mehr als 100 zu 1 auf. In bevorzugten Ausführungsformen ist das Kontrastverhältnis größer als 150 zu 1, und die Beleuchtungsoptik weist eine  $f/\#$  kleiner oder gleich 2,0 auf. Die Beleuchtungsoptik ist diejenige Optik, die den Lichtstrahl aufbereitet (z.B. vorpolarisiert, homogenisiert und filtert). Die  $f/\#$  ist mit dem auf den Bildwandler auffallenden Lichtstrahl verbunden.

[0019] Das Lichtventil kann ein polarisationsmodulierendes Lichtventil sein, einschließlich smektischer oder nematischer Flüssigkristall-Lichtventile. Das optische Abbildungssystem kann ferner einen Vorpolarisator aufweisen, der Eingangslight zu vorpolarisiertem Licht polarisiert, wobei das vorpolarisierte Licht das auf den Polarisationsstrahlteiler auffallende Licht aufweist. Das optische Abbildungssystem kann außerdem ein Farberlegungs- und -rekombinationsprisma oder -spiegel und mehrere reflektierende Lichtventile aufweisen. Das Prisma empfängt das polarisierte Licht vom Polarisationsstrahlteiler, bewirkt eine Farberlegung des polarisierten Lichts und lenkt polarisierte Farblichtstrahlen zu jedem Lichtventil. Das optische Abbildungssystem kann

eine geeignete Lichtquelle aufweisen, die das einfallende Licht liefert.

[0020] In alternativen Ausführungsformen kann das reflektierende Lichtventil zumindest einen Teil des ersten polarisierten Strahls zurück zum ursprünglichen Polarisationsstrahlteiler oder zu einem zweiten Polarisationsstrahlteiler reflektieren.

## KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0021] **Fig. 1** zeigt in Draufsicht eine vereinfachte Schemaskizze eines optischen Projektionssystems gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0022] **Fig. 2** zeigt in Draufsicht eine vereinfachte Schemaskizze einer zweiten Ausführungsform eines optischen Projektionssystems gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0023] **Fig. 3** zeigt in Draufsicht eine vereinfachte Schemaskizze einer dritten Ausführungsform eines optischen Projektionssystems gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0024] **Fig. 4** zeigt in Draufsicht eine vereinfachte Schemaskizze einer vierten Ausführungsform eines optischen Projektionssystems gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0025] **Fig. 5** zeigt eine perspektivische Zeichnung eines gekrümmten Polarisationsstrahlteilers, der anstelle einer oder mehrerer Strahlformungslinsen in einem optischen System eingesetzt werden kann.

[0026] **Fig. 6** zeigt eine Einrichtung, die einer mehrschichtigen 3M-Polymer-Polarisationsstrahlteilerfolie eine zweidimensionale Krümmung erteilen soll.

[0027] **Fig. 7** veranschaulicht die Optik eines Mikrodисplays mit Verwendung eines gekrümmten Polarisationsstrahlteilers.

[0028] **Fig. 8** zeigt eine Ausführungsform, in der die Lichtquelle oberhalb des Bildwandlers angeordnet ist. Ein gekrümmter Viertelwellenspiegel (QWM) dient zur Drehung der Polarisation des einfallenden Lichts, das zunächst durch den gekrümmten Cartesischen Polarisationsstrahlteiler durchgelassen wird.

[0029] **Fig. 9** zeigt ein optisches Abbildungssystem mit einem mikrolinsenförmigen Cartesischen Polarisationsstrahlteiler.

[0030] **Fig. 10** zeigt ein optisches Abbildungssystem mit einem Cartesischen Doppelkurven-Polarisationsstrahlteiler und doppelten Lichtquellenebenen.

[0031] **Fig. 11** zeigt eine perspektivische Ansicht eines Strahlendiagramms für einen Hauptstrahl und einen horizontal abgewinkelten schrägen Strahl.

[0032] **Fig. 12** zeigt eine perspektivische Ansicht eines Strahlendiagramms für zwei Typen vertikal abgewinkelter Strahlen.

[0033] **Fig. 13** zeigt eine isometrische Ansicht der Lichteinfallseite eines Polarisationsstrahlteilers, welche die Strahlengänge eines Hauptstrahls und eines vertikal schrägen Strahls darstellt.

[0034] **Fig. 14** zeigt eine isometrische Ansicht der Lichtaustrittseite des in **Fig. 13** dargestellten Polarisationsstrahlteilers, welche die Strahlengänge der gleichen Strahlen darstellt.

[0035] **Fig. 15** zeigt eine Draufsicht des in **Fig. 13** dargestellten Polarisationsstrahlteilers, welche die Strahlengänge der gleichen Strahlen darstellt.

[0036] **Fig. 16** zeigt einen Aufriß der Lichteinfallseite des in **Fig. 13** dargestellten Polarisationsstrahlteilers, der die Strahlengänge der gleichen Strahlen darstellt.

[0037] **Fig. 17** zeigt eine isometrische Ansicht der Lichtaustrittseite eines MacNeilleschen Polarisationsstrahlteilers, welche die Strahlengänge und die Polarisation der reflektierten Strahlen darstellt.

[0038] **Fig. 18** zeigt eine vereinfachte perspektivische Ansicht des Strahlengangs eines schrägen Strahls, der an einem Polarisationsstrahlteiler und an einem reflektierenden Bildwandler reflektiert wird.

[0039] **Fig. 19** zeigt eine isometrische Ansicht der Lichtaustrittseite des in **Fig. 2** dargestellten Cartesischen Polarisationsstrahlteilers, die Strahlengänge und Polarisation der reflektierten Strahlen darstellt.

[0040] **Fig. 20** zeigt eine perspektivische Ansicht der Lichtaustrittseite eines gedrehten Cartesischen Polarisationsstrahlteilers, die Strahlengänge und Polarisation der reflektierten Strahlen darstellt.

[0041] **Fig. 21** zeigt eine Projektion eines Pupillenbildes eines optischen Abbildungssystems mit einer als Polarisationsstrahlteiler verwendeten 3M DBEF-Folie.

[0042] **Fig. 22** zeigt eine Projektion eines Pupillenbildes eines optischen Abbildungssystems mit einem MacNeilleschen Polarisationsstrahlteiler.

[0043] **Fig. 23** zeigt eine Projektion eines Pupillenbildes eines erfindungsgemäßen optischen Abbildungssystems mit dem Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler.

[0044] **Fig. 24** zeigt ein Diagramm des modellierten Depolarisationskontrastverhältnisses als Funktion von der  $f/\#$  für optische Abbildungssysteme mit Verwendung eines Cartesischen Polarisationsstrahlteilers aus weiterentwickelter 3M-Folie (3M advanced film) sowie eines MacNeille-Polarisationsstrahlteilers.

[0045] **Fig. 25** zeigt ein Diagramm des modellierten Depolarisationskontrastverhältnisses als Funktion des Öffnungswinkels für optische Abbildungssysteme mit Verwendung eines mehrschichtigen Cartesischen 3M-Polymer-Polarisationsstrahlteilers sowie eines MacNeille-Polarisationsstrahlteilers.

- [0046] **Fig. 26** zeigt ein konoskopisches Diagramm des Polarisationszustands von ursprünglich unpolarisiertem Licht nach dem Durchgang durch einen linearen absorbierenden Polarisator.
- [0047] **Fig. 27** zeigt ein konoskopisches Diagramm des Polarisationszustands von ursprünglich unpolarisiertem Licht nach Reflexion an einem mehrschichtigen reflektierenden Polymer-Polarisationsstrahlteiler, der bezüglich der Hauptstrahlrichtung um  $45^\circ$  um die Reflexions-Polarisationsachse gedreht ist (wie in **Fig. 2**).
- [0048] **Fig. 28** zeigt ein konoskopisches Diagramm des Polarisationszustands von ursprünglich unpolarisiertem Licht nach Reflexion an einer Folie aus 3M DBEF, die ebenso wie für **Fig. 27** gedreht ist.
- [0049] **Fig. 29** zeigt ein konoskopisches Diagramm des Polarisationszustands von ursprünglich unpolarisiertem Licht nach Reflexion an einem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler.
- [0050] **Fig. 30** zeigt ein konoskopisches Diagramm des Polarisationszustands von ursprünglich unpolarisiertem Licht nach Reflexion an einem mehrschichtigen reflektierenden Polymer-Polarisationsstrahlteiler, der bezüglich der Hauptstrahlrichtung um  $45^\circ$  um die Durchgangs-Polarisationsachse gedreht ist.
- [0051] **Fig. 31** zeigt ein konoskopisches Kontrastverhältnis-Konturdiagramm für einen vertikal orientierten linearen Polarisator, analysiert mit einem zweiten, identischen Polarisator, der in einer zum ersten Polarisator parallelen Ebene liegt.
- [0052] **Fig. 32** zeigt ein konoskopisches Kontrastverhältnis-Konturdiagramm für einen y-orientierten linearen Polarisator, gefolgt von einem zweiachsigen mehrschichtigen reflektierenden Polymer-Polarisator, dessen Reflexionsachse parallel zur y-Achse liegt und dessen Oberflächennormale unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur xy-Ebene ausgerichtet ist, gefolgt von einem analysierenden Polarisator in der yz-Ebene. Der reflektierende Polarisator wurde so konstruiert, daß er die Helligkeit von LCDs über einen breiten Winkelbereich verstärkt.
- [0053] **Fig. 33** zeigt ein konoskopisches Kontrastverhältnis-Konturdiagramm für einen in der xy-Ebene liegenden, y-orientierten linearen Polarisator, gefolgt von einem reflektierenden  $45^\circ$ -MacNeille-Polarisator vom Würfeltyp mit einer Neigungsachse parallel zu y-Achse, gefolgt von einem analysierenden Polarisator in der yz-Ebene.
- [0054] **Fig. 34** zeigt ein konoskopisches Kontrastverhältnis-Konturdiagramm für einen in der xy-Ebene liegenden, y-orientierten linearen Polarisator, gefolgt von einem zweiachsigen mehrschichtigen reflektierenden Polymer-Polarisator, dessen Reflexionsachse parallel zur y-Achse liegt und dessen Oberflächennormale unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur xy-Ebene ausgerichtet ist, gefolgt von einem analysierenden Polarisator in der yz-Ebene. Der reflektierende Polarisator in diesem Beispiel wurde so konstruiert, daß er als Cartesischer Polarisationsstrahlteiler funktioniert.
- [0055] **Fig. 35** zeigt ein konoskopisches Kontrastverhältnis-Konturdiagramm für einen in der xy-Ebene liegenden, x-orientierten linearen Polarisator, gefolgt von einem zweiachsigen mehrschichtigen reflektierenden Polymer-Polarisator, dessen Durchgangsachse parallel zur y-Achse liegt und dessen Oberflächennormale unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur xy-Ebene ausgerichtet ist, gefolgt von einem analysierenden Polarisator in der yz-Ebene. Der reflektierende Polarisator in diesem Beispiel wurde so konstruiert, daß er als Cartesischer Polarisationsstrahlteiler funktioniert.

## AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

- [0056] Die **Fig. 1 – 4** zeigen vereinfachte schematische Darstellungen von typischen Ausführungsformen optischer Abbildungssysteme gemäß der vorliegenden Erfindung. Die vorliegende Erfindung beschreibt verschiedene optische Abbildungssysteme, die vorteilhaft so konstruiert sind, daß sie einen Cartesischen Polarisationsstrahlteiler und eine lichtstarke Hochgeschwindigkeits-beleuchtungsoptik enthalten und ausnutzen. Zur Bequemlichkeit des Lesers werden gleichartige Elemente durch Bezugszeichen gekennzeichnet, deren letzte zwei Stellen gleich sind, jedoch soll durch eine solche Bezeichnungsweise der Umfang der vorliegenden Erfindung nicht eingeschränkt werden.
- [0057] Da ein Cartesischer Polarisationsstrahlteiler eine feste Materialachse der Polarisation aufweist, bezieht sich die vorliegende Erfindung auf Licht mit Polarisationskomponenten, die auf die x- und y-Achsen des Cartesischen Polarisationsstrahlteilers bezogen werden, statt auf die herkömmlichen p und s-Achsen eines MacNeille-Polarisationsstrahlteilers. Für einen Hauptstrahl irgendeiner der **Fig. 1 bis 4** hat die x-Komponente eine in der Reflexionsebene enthaltene Polarisationsrichtung und ist daher identisch mit der p-Polarisation des Hauptstrahls, während die y-Komponente ein senkrecht zur Reflexionsebene gerichtetes E-Feld aufweist und identisch mit der s-Polarisation eines Hauptstrahls ist.
- [0058] **Fig. 1** zeigt ein optisches Display oder Abbildungssystem **10** mit einer Lichtquelle **12**, die einen Lichtstrahl **14** liefert. Die Lichtquelle **12** weist eine Lampe **11** und einen Reflektor **13** auf. Geeignete Lampen sind unter anderem Xenonlampen, Glühlampen, Laser, LED, Metallhalogenidbogenlampen oder Hochdruckquecksilberlichtquellen. Der Lichtstrahl **14** passiert eine Beleuchtungsoptik **15**, die das Licht vorpolarisieren kann, und trifft auf ein Cartesisches Polarisationsstrahlteilererelement **50**.
- [0059] Das Cartesische Polarisationsstrahlteilererelement **50** weist eine Lage weiterentwickelte mehrschichtige 3M-Polymerfolie (3M advanced film) **52** auf, die in einen Glaswürfel **54** eingeschlossen und so orientiert ist,

daß sie einfallendes Licht mit y-Polarisation reflektiert.

[0060] Während MacNeille-Polarisationsstrahlteilersysteme typischerweise in Glaswürfel eingebettet werden müssen, die den spezifischen Brechungsindex aufweisen, der zur Einstellung des Brewsterschen Winkels auf einen gewünschten Wert (typischerweise  $45^\circ$ ) erforderlich ist, ist diese Einbettung für die typischen erfindungsgemäßen Cartesischen Polarisationsstrahlteiler nicht notwendig. Drahtgitterpolarisatoren oder Polarisatoren aus weiterentwickelter 3M-Folie können allein verwendet werden (siehe die **Fig. 2** und **3**), obwohl sie auch in Würfelkonfigurationen verwendet werden können. Die meisten in der vorliegenden Ausführungsform verwendeten Polarisatoren aus weiterentwickelter 3M-Folie funktionieren am besten zwischen Glasscheiben oder als Membran, d. h. in Konfigurationen, in denen beim Lichteintritt in das Materialmedium die Durchlaßwinkel der Folie nach dem Snelliusschen Gesetz zur Foliennormalen hin gedreht werden. Es sind andere Polarisationsstrahlteiler aus weiterentwickelter mehrschichtiger 3M-Folie hergestellt worden, die gut in Glaswürfeln mit beliebigem Brechungsindex funktionieren, in denen beim Lichteintritt aus Luft in das Einbettungsmedium die Durchlaßwinkel der Folie nicht zur Foliennormalen hin gedreht worden sind.

[0061] Für Folien, die gut in Glaswürfeln funktionieren, gelten zusätzliche Anforderungen, um geeignete Werte der anisotropen Brechungsindizes für jede Schicht sicherzustellen, besonders in der zur Folienoberfläche senkrechten Richtung. Konkret sind die Brechungsindizes in Dickenrichtung der Folie in abwechselnden Schichten Idealerweise die gleichen. Dies gilt zusätzlich zur Gleichheit der Brechungsindizes in X-Richtung (Durchlaßrichtung) des Polarisators. Damit ein Polarisator entlang seiner Durchlaßachse für alle Einfallswinkel eine hohe Durchlässigkeit aufweist, müssen beide Brechungsindizes in X- und Z-Richtung (senkrecht zur Folie) der abwechselnden Schichten übereinstimmen. Das Erzielen einer Übereinstimmung bzw. Anpassung sowohl für die X- als auch für die Z-Indizes erfordert eine andere Materialgruppe als diejenige, die bei der Anpassung des X-Index allein eingesetzt wird. Ältere mehrschichtige 3M-Folien, wie z. B. "DBEF"-Folie der 3M-Marke, wurden früher mit Anpassung an den X-Index hergestellt.

[0062] Ein Verfahren zur Anpassung sowohl der X- als auch der Z-Indizes aller Schichten ist das Erteilen einer echten einachsigen Dehnung, wobei man die Folie in X- und Z-Richtung entspannen (d. h. schrumpfen) läßt, während sie in Y-Richtung gedehnt wird. Auf diese Weise sind die X- und Z-Brechungsindizes in einer gegebenen Schicht gleich groß. Daraus folgt dann, daß bei Auswahl eines zweiten Materials, dessen X-Index mit dem des ersten Materials übereinstimmt, die Z-Indizes gleichfalls übereinstimmen müssen, da die Schichten des zweiten Materials auch den gleichen Dehnungsbedingungen unterliegen.

[0063] In vielen praktischen Anwendungen ist eine kleine Fehlanpassung bzw. Nichtübereinstimmung des Z-Index zwischen diesen Schichten akzeptierbar, die vom Winkel des Lichts zu den Folienschichten abhängt. Wenn jedoch die Folie zwischen Glasprismen laminiert, d. h. in ein Medium mit hohem Brechungsindex eingebettet wird, dann werden die Lichtstrahlen nicht zur Normalen der Folienebene hin gebogen. In diesem Fall erfährt der Lichtstrahl die Fehlanpassung des Z-Index in viel höherem Grade als beim Lichteinfall aus Luft, und ein X-polarisierter Strahl wird teilweise oder sogar stark reflektiert. Je größer der Winkel, den der Lichtstrahl mit der Foliennormalen innerhalb der Folie bildet, desto genauer muß die Anpassung des Z-Index sein.

[0064] Die zulässige Größe der Z-Index-Fehlanpassung ist immer von der Fehlanpassung des Y-Index abhängig, da der letztere Wert die Anzahl der Schichten bestimmt, die in dem Polarisator-Dünnschichtstapel erforderlich sind. Das Gesamtreflexionsvermögen eines Dünnschichtstapels wird gleichermaßen durch die Indexfehlanpassung  $\Delta n$  und die Schichtenzahl  $N$  im Stapel bestimmt, d. h. das Produkt  $\Delta n \times N$  bestimmt das Reflexionsvermögen eines Stapels. Zum Beispiel erfordert das Bereitstellen einer Folie mit dem gleichen Reflexionsvermögen, aber der halben Schichtenzahl die zweifache Brechungsindexdifferenz zwischen den Schichten, und so weiter. Das Verhältnis  $\Delta n_z/\Delta n_y$  ist der relevante Parameter, der gesteuert werden muß. Für eine zur Verwendung in Luft vorgesehene Strahlteilerfolie ist das Verhältnis  $\Delta n_z/\Delta n_y$  vorzugsweise kleiner als 0,5, und stärker bevorzugt kleiner als 0,2. Für Folie, die in ein Medium mit höherem Brechungsindex eingebettet ist, wie z. B. in Glas, ist das Verhältnis  $\Delta n_z/\Delta n_y$  vorzugsweise kleiner als 0,2, stärker bevorzugt kleiner als 0,1, und am stärksten bevorzugt kleiner als 0,05.

[0065]  $\Delta n_x$  muß außerdem sehr klein im Vergleich zu  $\Delta n_y$  sein, und wenn  $\Delta n_z$  sehr klein ist, dann ist das Verhältnis für in Luft eingesetzte Folien vorzugsweise kleiner als 0,1. Für eingebettete Folien ist das Verhältnis vorzugsweise kleiner als 0,1, und am stärksten bevorzugt kleiner als 0,01. Wie jedoch in der mitabgetretenen US-Patentanmeldung Nr. 08/958 329 beschrieben, von der relevante Abschnitte hiermit durch Verweis einbezogen werden, kann bei nicht verschwindendem  $\Delta n_z$  eine kleine Fehlanpassung in den X-Indizes zur Verbesserung der Durchlässigkeit für p-polarisiertes Licht benutzt werden.

[0066] Die Fehlanpassung des Z-Index ist für den Durchgang von s-polarisiertem Licht unerheblich. Definitionsgemäß wird der Z-Brechungsindex einer Folie durch s-polarisiertes Licht nicht erfährt. Wie jedoch weiter unten gezeigt wird, sind die Reflexionseigenschaften doppelbrechender mehrschichtiger Polarisatoren bei verschiedenen Azimutwinkeln so beschaffen, daß die Leistung eines Projektionssystems hervorragend ist, wenn der Strahlteiler so konfiguriert ist, daß er y-polarisiertes (annähernd s-polarisiertes) Licht reflektiert und x-polarisiertes (annähernd p-polarisiertes) Licht durchläßt. Ein Strahlteiler, der x-polarisiertes Licht reflektiert und y-polarisiertes Licht durchläßt, würde gut entlang den optischen Hauptachsen arbeiten, aber für einen Licht-

strahl mit einem endlichen Kegelwinkel nimmt der Kontrast mit zunehmendem Kegelwinkel schnell ab. Für Folie, die in einen Würfel eingebettet ist, ist das Problem noch größer. Für optische Systeme mit großem Kegelwinkel, die ein hohes Kontrastverhältnis erfordern, reflektiert der bevorzugte Polarisationsstrahlteiler y-polarisiertes Licht und läßt x-polarisiertes Licht durch.

[0067] Die Verwendung der Würfelkonfiguration ist besonders vorteilhaft in Fällen mit hoher Empfindlichkeit gegen Astigmatismus, wie er z. B. durch den Durchgang von Licht durch eine geneigte Glasplatte entsteht, oder in Fällen, wo eine kürzere optische Weglänge wichtig ist. Die Würfelkonfiguration hat die Nachteile, die von MacNeille-Polarisatoren geteilt werden, daß sie thermisch induzierte spannungsoptische Effekte sowie ein erhöhtes Gewicht aufweist.

[0068] Wie wieder aus **Fig. 1** erkennbar, wird ein polarisierter Strahl **18**, der die y-Komponenten des Strahls **14** aufweist, zu einem Farbzerlegungs-/vereinigungsprisma **36** gelenkt, das den y-polarisierten Strahl **18** in drei Teilstrahlen **20**, **22** und **24** aufspaltet. Die polarisierten Teilstrahlen **20**, **22** bzw. **24** werden an roten, grünen bzw. blauen reflektierenden Bildwandlern **26**, **28** bzw. **30** reflektiert und moduliert. Im allgemeinen weisen gegenwärtige reflektierende LCD-Lichtventile ordentliche und außerordentliche Achsen für ihre dunklen und hellen Zustände auf, die sich am besten in festen Cartesischen Koordinaten beschreiben lassen, und die festen Polarisationsachsen von Cartesischen Polarisationsstrahlteilern eignen sich besser für die Anpassung an die Cartesische Konstruktion der Bildwandler.

[0069] Die reflektierten und modulierten Teilstrahlen werden durch den Kombinator **36** zu einem vereinigten Strahl **32** mit x-Polarisation rekombiniert bzw. wiedervereinigt. Die modulierten Komponenten des vereinigten Strahls **32** passieren das Polarisationsstrahlteiler-element **50** und werden durch Projektionslinsen **34** als Bild projiziert.

[0070] Die als Beispiel angeführte Beleuchtungsoptik **15** in der vorliegenden Ausführungsform kann einen Vorpolarisator oder Polarisationswandler **15a** vor dem Polarisationsstrahlteilerwürfel **50** und einen Reinigungspolarisator **15b** hinter dem Polarisationsstrahlteilerwürfel **50** aufweisen.

[0071] Die Beleuchtungsoptik **15** beleuchtet die Bildwandler **26**, **28** und **30** mit Licht, das eine f/# kleiner oder gleich 2,5 aufweist.

[0072] Die Bildwandler **26**, **28** und **30** können smektische, nematische oder andere geeignete reflektierende Bildwandler sein. Wenn sie smektisch sind, können die Bildwandler **26**, **28** und **30** des optischen Abbildungssystems **10** der **Fig. 1** und **2** ferroelektrische Flüssigkristallanzeige-Bildwandler (FLCD-Bildwandler) sein. Die Kombination aus einem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler und smektischen LCD-Bildwandlern ermöglicht optische Systeme mit sehr niedriger f/#. Smektische LCDs, wie z. B. FLCDs, weisen typischerweise besonders weite Öffnungskegel auf und nutzen daher den Vorteil der niedrigen f/# der erfindungsgemäßen Systeme besser aus. Die Kombination eines mehrschichtigen Polymer-Polarisationsstrahlteilers mit einem reflektierenden FLCD-Bildwandler nutzt den Vorteil der niedrigen f/# und der schnellen Lichtstrahlen, die bei der vorliegenden Erfindung verwendet werden können. Typische smektische Lichtventile sind unter anderem ferroelektrische Flüssigkristallanzeige- (FLCD-), Anti-FLCD- (AFLCD-), analoge FLCD-Lichtventile und Lichtventile mit elektroklinem LCD-Modus. Typische nematische Flüssigkristall-Lichtventile sind unter anderem verdreht, vertikal orientierte, hybrid orientierte Zellen und Pi-Zellen.

[0073] **Fig. 2** zeigt eine zweite Ausführungsform des Projektionssystems **110**, die eine Lichtquelle **112** aufweist, wie z. B. eine Bogenlampe mit einem Reflektor. Die Lichtquelle könnte auch eine Festkörperlichtquelle, wie z. B. Leuchtdioden, oder eine Laserlichtquelle sein. Das System **110** weist ferner einen Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **150**, einen Bildwandler **126**, eine Beleuchtungsoptik **115** und eine Sammellinse **134** auf. Der Polarisationsstrahlteiler **150** ist ein freistehender Cartesischer Polarisationsstrahlteiler, wie z. B. ein Drahtgitterpolarisator, oder eine zwischen Glasscheiben laminierte weiterentwickelte mehrschichtige 3M-Folie. **Fig. 2** zeigt den Strahlengang und die Polarisation des Strahls. Licht mit y-Polarisation (angenäherter s-Polarisation) wird durch x im Kreis angezeigt, wodurch dargestellt wird, daß die Polarisation in die Seite hinein (senkrecht zur Papierebene) gerichtet ist. Licht mit x-Polarisation (angenäherter p-Polarisation) wird durch den ausgezogenen Pfeil dargestellt, der den Polarisationsvektor abbildet. Ausgezogene Linien bezeichnen einfallendes Licht, während gestrichelte Linien Licht darstellen, das von den Bildwandlern mit verändertem Polarisationszustand zurückgeworfen worden ist. Von der Lichtquelle geliefertes Licht wird durch die Beleuchtungsoptik **115** aufbereitet. Die y-Komponenten des Lichts werden durch den Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **150** reflektiert und treffen auf den reflektierenden Bildwandler **126** auf. Der reflektierende Bildwandler reflektiert und moduliert einen Abbildungsstrahl mit x-Polarisation. Der reflektierte x-polarisierte Strahl wird durch den Polarisationsstrahlteiler **150** durchgelassen und durch die Sammellinse **134** fokussiert. Viele konstruktionsspezifische Komponenten eines Projektionssystems, wie z. B. Filter für das Licht, Strahlhomogenisatoren, Polarisationswandler, Relais- oder Feldlinsen und dergleichen, werden aus den Zeichnungen als für diese Diskussion unnötig weggelassen, können aber durch den Fachmann eingesetzt werden.

[0074] **Fig. 3** veranschaulicht eine dritte Ausführungsform eines Projektionssystems **210** gemäß der vorliegenden Erfindung, das gleichfalls die durchgelassenen x-polarisierten Komponenten des Ausgangsstrahls benutzt. Das System **210** weist auf: eine Lichtquelle **212**, einen Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **250**, einen



ersten Bildwandler **226**, einen zweiten Bildwandler **228**, eine Beleuchtungsoptik **215** und eine Projektionslinse **234**. Die Bildwandler **226** und **228** sind sequentielle Farbbildwandler oder monochrome Bildwandler. Licht von der Lichtquelle **212** gelangt durch die Beleuchtungsoptik **215** und fällt auf den Polarisationsstrahlteiler **250** auf. Der Polarisationsstrahlteiler läßt die x-polarisierte Lichtkomponente durch und reflektiert die y-polarisierte Komponente. Die x-polarisierte Komponente wird reflektiert und durch den ersten Bildwandler **226** zu einem y-polarisierten Strahl moduliert, der durch den Polarisationsstrahlteiler **150** in eine Projektionslinse **234** reflektiert wird. Die y-polarisierten Komponenten werden reflektiert und durch den zweiten Bildwandler **228** zu einem x-polarisierten Strahl moduliert, der von dem Polarisationsstrahlteiler **250** in die Projektionslinse **234** durchgelassen wird. Vom Projektor zurückgeworfenes Licht in seinem ursprünglichen Polarisationszustand ist in der Zeichnung nicht abgebildet. Dieses Licht kehrt vom Bildwandler zurück, und der Polarisationsstrahlteiler lenkt das Licht zurück zur Lampe.

[0075] **Fig. 4** zeigt eine vierte typische Ausführungsform eines Projektionssystems **310** gemäß der vorliegenden Erfindung, die eine Lichtquelle **312** aufweist. Durch eine Bogenlampe **311** wird Licht erzeugt und durch einen elliptischen Reflektor **313** gesammelt, der das Licht zur Beleuchtungsoptik **315** sendet. Die Beleuchtungsoptik **315** schließt eine Kollimatorlinse **317**, eine erste Mikrolinsenanordnung **319**, eine zweite Mikrolinsenanordnung **321** und eine Kondensorlinse **327** ein. Zwischen der zweiten Mikrolinsenanordnung **321** und der Kondensorlinse **327** kann sich ein wahlfreier Polarisationswandler **323** anschließen, wie z. B. diejenigen von Geffken-Konstruktion. In Abhängigkeit vom Umwandlungswirkungsgrad des Polarisationswandlers **323** kann der Einbau eines wahlfreien Vorpolarisators **325** vorteilhaft sein, der sich unmittelbar an den Polarisationswandler anschließt. Das Paar von Mikrolinsenanordnungen **319** und **321** empfängt nominell kollimiertes Licht von der Kollimatorlinse **317**. Der Polarisationswandler **323** und der Vorpolarisator **325** polarisieren das Licht in der gewünschten Richtung.

[0076] Die Mikrolinsenanordnungen **319** und **321** und die Kondensorlinse **327** dienen zum Formen und Homogenisieren des Lichts, um die reflektierenden Bildwandler **326**, **328** und **330** gleichmäßig auszuleuchten. Ein Cartesischer Polarisationsstrahlteiler **350** lenkt dann das y-polarisierte Licht zu drei reflektierenden Bildwandlern **326**, **328** und **330** um. Die Polarisationsstrahlteilerfläche **352** kann freistehend, zwischen Glasplatten eingeschlossen oder in ein Glasprisma **354** eingeschlossen sein, wie in **Fig. 4** dargestellt.

[0077] In einer Konfiguration mit drei Bildwandlern, wie z. B. in derjenigen, die in **Fig. 4** dargestellt ist, zerlegt ein Farbzerlegungsprisma **336** das Licht in seine Grundfarben: rot, grün und blau. Zwischen jedem Bildwandler und dem Farbzerlegungsprisma **336** Zwischenlinsen eingesetzt werden, wie z. B. Feldlinsen **338**, **340** und **342**, um die optische Empfindlichkeit des Gesamtsystems weiter zu optimieren. Die Bildwandler **326**, **328** und **330** modulieren den Polarisationszustand des Lichts bei Reflexion in unterschiedlichem Grade in Abhängigkeit von der jeweiligen Bildinformation. Das Farbzerlegungsprisma **336** rekombiniert die roten, grünen und blauen Bilder und leitet das Licht zum Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **350** weiter, der den Polarisationszustand des Bildes analysiert, indem der im wesentlichen nur das x-polarisierte Licht durchläßt. Das y-polarisierte Licht wird zur Lichtquelle **312** zurückgelenkt. Das von dem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **350** durchgelassene Licht wird durch die Projektionslinse **334** gesammelt und zum Betrachten auf einen Auf- oder Durchprojektionsschirm (nicht dargestellt) fokussiert. Ein wahlfreier Nachpolarisator **344** kann zwischen dem Polarisationsstrahlteiler **350** und der Projektionslinse **334** eingesetzt werden. Der Fachmann wird erkennen, daß auch andere optische Konfigurationen möglich sind.

[0078] Die Cartesischen Polarisatoren können sogar entlang einer oder zwei Achsen gekrümmt sein. MacNeille-Polarisationsstrahlteilersysteme oder Polarisationsstrahlteilersysteme mit veränderter Totalreflexion bieten keine derartige Flexibilität.

[0079] Die Nutzung eines hohen Prozentsatzes der Lichtmenge in einem Projektionssystem ist schwierig und erfordert den Einsatz spezialisierter optischer Komponenten. Auf der Rückseite der Lampe werden oft reflektierende Optiken verwendet. Ein Projektionssystem, das einen großen Kegelwinkel (kleine f-Nummer) verwendet, ermöglicht auch einen hohen Wirkungsgrad. Der weiterentwickelte mehrschichtige doppelbrechende 3M-Polarisationsstrahlteiler (PBS) bietet einen der größten Öffnungswinkel für das vollständige sichtbare Spektrum. Weitere Vorteile des mehrschichtigen doppelbrechenden Polarisationsstrahlteilers sind die Möglichkeiten der Kombination seiner Strahlteilungs-/Reflexions-Funktionen mit seinen Flexibilitäts-/Formbarkeits-Eigenschaften. Die **Fig. 5**, **7**, **8** und **9** zeigen alternative Ausführungsformen von optischen Abbildungssystemen gemäß der vorliegenden Erfindung mit gekrümmten oder nicht ebenen, Cartesischen Polarisationsstrahlteilern. Dem Fachmann ist bekannt, daß reflektierende Optiken ein kompakteres und einfacheres System zur Handhabung von Lichtkegeln mit niedriger f-Nummer bieten als Linsenoptiken. Die hier beschriebenen mehrschichtigen Polarisationsstrahlteilerfolien sind sowohl reflektierend als auch lichtdurchlässig, in Abhängigkeit vom Polarisationszustand des einfallenden Lichts. So könnte eine konkave mehrschichtige Polarisationsfolie sowohl als Weitwinkel-Strahlteiler als auch als Teil der Strahlfokussieroptik in einem Projektionssystem eingesetzt werden.

[0080] Ein gekrümmter Polarisationsstrahlteiler könnte anstelle einer oder mehrerer Strahlformungslinsen in dem System eingesetzt werden, wie schematisch in **Fig. 5** dargestellt. **Fig. 5** zeigt ein optisches Abbildungs-

system **410** mit einem gekrümmten Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **450**, einer Lichtquelle **412**, einem reflektierenden LCD-Bildwandler **426** und einer Okularlinse **434**. Die Lichtquelle **412** kann Reflexions- und Brechungs-Strahlformungs- und -aufbereitungselemente enthalten.

[0081] In Abhängigkeit vom System und seiner Endanwendung kann der gekrümmte Polarisationsstrahlteiler **450** entlang einer oder zweier orthogonaler, in der gleichen Ebene liegender Achsen gekrümmt sein, d. h. er kann entweder eine einfache oder eine zusammengesetzte Krümmung aufweisen. Systeme, die einen Polarisationsstrahlteiler nutzen, der eine Krümmung entlang einer Achse aufweist, können Zylinderlinsen zum Formen des Strahls entlang der orthogonalen Achse erfordern.

[0082] Gekrümmte Polarisatoren können sowohl in Aufprojektions- als auch in Durchprojektionssystemen sowie in den sogenannten Mikrodysplays verwendbar sein, welche direkt in das Auge des Betrachters projizieren, oder in Systemen, die durch Reflexion an einer halbdurchlässigen Oberfläche ein virtuelles Bild erzeugen, wie z. B. beim "Headup-Display".

[0083] Die Auslöschung gekreuzter Polarisatoren, dargestellt als Kreisdiagramm (Radialdiagramm) der Auslöschung als Funktion vom Azimutwinkel für einen konstanten Einfallswinkel, bildet die bekannte "Malteserkreuz"-Form.

[0084] Durch Einfügen einer doppelbrechenden Ausgleichfolie oder -platte zwischen den gekreuzten Polarisatoren wird die Auslöschung bei allen Winkeln zwischen den Hauptachsen erhöht und das Kreuz im wesentlichen zu einer kreisförmigen (winkelunabhängigen) Form verbreitert. Ein erheblicher Ausgleich kann auch durch Verwendung des gekrümmten Polarisators erreicht werden, ohne die doppelbrechende Ausgleichfolie zu benötigen.

[0085] Ein zweidimensionaler gekrümmter Polarisationsstrahlteiler ist unter Anwendung des in **Fig. 6** schematisch dargestellten Verfahrens verwirklicht worden. Eine mehrschichtige reflektierende optische 3M-Polarisatorfolie ("MOF") **550** wurde über eine Bohrung **560** in einer Platte **562** gespannt, und es wurde ein Vakuum angelegt, um die Folie **550** durch die Bohrung **560** zu ziehen. Mit einem Heizgebläse wurde Wärme angewendet, um die Folie **550** zu erweichen und die Durchbiegung zu vertiefen. Bei der Abkühlung behält die Folie ihre konkave Form. Die gekrümmte MOF wirkte als gekrümmter Cartesischer Polarisationsstrahlteiler, der das reflektierte Licht einer Polarisation fokussierte und Licht mit dazu orthogonaler Polarisation durchließ. Es wurden mehrere Durchmesser und Erwärmungsdauern versucht. In allen Fällen wurde die Polarisationsauslöschung bis zur äußersten Kante der konkaven Form aufrechterhalten. Ein gekrümmter Polarisationsstrahlteiler mit elliptischem Rand konnte gleichfalls durch Vakuumformen durch eine elliptische Bohrung hindurch hergestellt werden. Die Polarisationsachse des gekrümmten Polarisationsstrahlteilers konnte in Abhängigkeit von der Ausrichtung der optischen Achsen der MOF zur Hauptachse der Bohrung gesteuert werden.

[0086] Der Strahlengang eines Mikrodysplays mit Verwendung eines gekrümmten Polarisationsstrahlteilers wurde demonstriert, wie in **Fig. 7** dargestellt. Licht von einer diffusen Quelle **512** wurde durch eine Beleuchtungsoptik **515** geschickt, vorpolarisiert, an dem gekrümmten Polarisationsstrahlteiler **550** reflektiert und an einem Viertelwellenspiegel (QWM) **558** reflektiert. Die resultierende Polarisationsdrehung ermöglichte dann den Durchgang des Lichts durch den Polarisationsstrahlteiler **550** zu einem Okular **534**. Die Krümmung diente dazu, das Beleuchtungslicht auf den QWM **558** zu konzentrieren, wodurch ein helleres Bild entstand als das von einem ebenen Polarisationsstrahlteiler. Durch Drehen des QWM **558** um  $45^\circ$  um seine Normalenachse wurde im Okular **534** ein Dunkelzustand dargestellt, der ein für Dünnschichtpolarisatoren charakteristisches dunkles zentrales Band aufwies. Es wurde beobachtet, daß das Bild des QWM **558** im Winkelbereich des hellen Zustands in der Horizontalebene zusammengedrückt war.

[0087] Zur Berechnung des geometrischen Ortes der Brennpunkte von sowohl sphärischen als auch elliptischen gekrümmten Spiegeln wurde ein mathematisches Modell verwendet. Für einen elliptischen Querschnitt mit der Elliptizität  $e = a/b$ , wobei  $a$  und  $b$  die Hauptachse bzw. die Nebenachse sind, ist die Brennweite des Spiegels (gemessen vom Boden der "Schüssel" aus)  $F \approx be^2/2$ . Dieses Ergebnis zeigt, daß für kompakte Konstruktionen, d. h. für kurze Brennweiten,  $e < 1$  gilt (abgeplattete Ellipse).

[0088] Die Simulationen zeigten, daß sich für eine gegebene Brennweite kein großer Leistungsvorteil für elliptische Formen ergab. ( $F = R/2$  hat eine sehr ähnliche Leistung). Außerdem zeigte sich, daß bei nahezu senkrechtem Lichteinfall auf den gekrümmten Polarisationsstrahlteiler Verzerrungen des Strahlwinkels und die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung minimiert wurden.

[0089] Wie wieder aus dem in **Fig. 5** dargestellten System **410** erkennbar, wurde vom Bildwandler **426** ab eine gute Ausleuchtung ohne scheinbare Bildverzerrung erzielt, indem die Lichtquelle (ein diffuses, kleines Hintergrundlicht) **421** und der Bildwandler **426** koplanar und entlang der gleichen Achse wie das Okular **434** angeordnet wurden. Außerdem wurde festgestellt, daß der Abstand zwischen der Quelle/Bildwandler-Ebene und dem gekrümmten Polarisationsstrahlteiler **450** nicht besonders kritisch war. Bei der kompaktesten Konstruktion ist der Mittelpunkt des gekrümmten Polarisationsstrahlteilers **450** auf die gemeinsame Kante des Bildwandlers **426** und der angrenzenden Lichtquelle **412** ausgerichtet. Durch Neigen der Lichtquelle **412** wird die Ausleuchtung ein wenig verbessert. Das Ausgangslicht der Lichtquelle wurde durch einen dichroitischen Polarisator polarisiert.

[0090] **Fig. 8** zeigt eine weitere Ausführungsform, das optische Abbildungssystem **610**, wobei die Quelle **612** oberhalb des Bildwandlers **626** angeordnet ist. Ein gekrümmter QWM **658** dient zur Drehung der Polarisierung des einfallenden Lichts, das zunächst durch den gekrümmten Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **650** durchgelassen wird. Die zusätzliche Strahlformung von der Krümmung des QWM **658** kann verwendet werden, um die Ausleuchtung des Bildwandlers **426** zu optimieren.

[0091] Man kann auch die Verzögererfolie weglassen, indem man die Quelle auf der Bildwandlerseite des Polarisationsstrahlteilers anordnet oder den Polarisationsstrahlteiler abschneidet und die Lichtquelle angrenzend an die abgeschnittene Kante anordnet.

[0092] Ein MOF-Polarisator kann zu mehreren gekrümmten Oberflächen geformt werden, um eine Einrichtung zum Abbilden einer inhomogenen Lichtquelle auf eine Ebene oder auf andere gewünschte geometrische Orte zu erzeugen, um die Homogenität zu verbessern. Diese Einrichtung könnte als Ersatz oder zur Verstärkung einer Mikrolinsenanordnung eingesetzt werden, die gewöhnlich in Projektionssystemen verwendet wird, um für eine gleichmäßige Ausleuchtung zu sorgen. **Fig. 9** veranschaulicht ein optisches Abbildungssystem **710**, das einen mikrolinsenförmigen Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **750** aufweist. Experimente haben gezeigt, daß die Lichtquellenfläche **712** optimal trapezförmig war, um eine gleichmäßige Ausleuchtung des Bildwandlers **726** zu erzielen.

[0093] **Fig. 10** zeigt ein optisches Abbildungssystem **810** mit einem Cartesischen Doppelkurven-Polarisationsstrahlteiler **850** und doppelten Lichtquellenebenen **812**. Wie in **Fig. 10b** dargestellt, können eine einzige Lampe **811**, eine Beleuchtungs/Aufbereitungsoptik **815** und eine Mikrolinsenanordnung **817** verwendet werden, um die doppelten Lichtquellenebenen **812** bereitzustellen. Die doppelten Lichtquellenstrahlen werden an dem gekrümmten Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **850** und dann an dem Bildwandler **826** reflektiert. Eine Projektionslinse oder ein Okular **834** bereitet die durchgelassenen Strahlen für die Projektion oder Betrachtung vor. Die Verwendung von zwei Lichtquellen (oder zwei Lichtquellenebenen) ist möglich, wenn zwei gekrümmte Polarisationsstrahlteiler eingesetzt werden, die an einer Kante miteinander verbunden sind (dies könnte ein Formteil sein). Die Anschlußlinie **853** liegt Idealerweise über der Mittellinie des Bildwandlers. Das gleiche Konzept könnte in Projektionssystemen verwendet werden, wo die "Lichtquellenebenen" Ebenen mit homogener Ausleuchtung darstellen.

[0094] Praktisch begrenzen zusammengesetzte Winkeldepolarisationseffekte, die auch als Depolarisationskaskade bezeichnet werden, die Verwendung sehr schneller Optiken in herkömmlichen Projektionssystemen mit reflektierenden Bildwandlern. Die Figuren 11–18 veranschaulichen das Problem der zusammengesetzten Winkeldepolarisationseffekte oder der Depolarisationskaskade. MacNeille-Polarisationsstrahlteilersysteme, die auf der Brewster-Winkel-Reflexion basieren, lassen sich angemessener in Zylinderkoordinaten um die Normalenachse der Polarisationsstrahlteiler-Beschichtung beschreiben, da die Funktion des MacNeille-Polarisationsstrahlteilers vom Einfallswinkel des einfallenden Lichts abhängt. Abbildungssysteme enthalten jedoch Bildwandler, die bezüglich fester orthogonaler Achsen funktionieren. Die Verästelungen dieses qualitativen Unterschieds lassen sich erkennen, indem man die vorpolarisierten Lichtstrahlen, d. h. die in den **Fig. 11** und **12** abgebildeten Strahlen **1-4** betrachtet. In diesen Figuren sind die x-, y- und z-Achsen auf den Hauptstrahl bezogen, wobei die z-Achse parallel zum Ausbreitungsvektor des Hauptstrahls ist und die y-Achse auf die Durchlässigkeitsachse des Vorpolarisators ausgerichtet ist. Die x-, y- und z-Achsen sind für das Licht dargestellt, das sich zwischen einem Vorpolarisator und einem Polarisationsstrahlteiler ausbreitet. Die y-Achse ist im vorliegenden Beispiel in der vertikalen Richtung dargestellt. Der Hauptstrahl ist senkrecht zur Oberfläche des reflektierenden Bildwandlers. Die Achsen der Strahlen nach der Reflexion am Polarisationsstrahlteiler werden mit x', y' und z' bezeichnet. Man beachte, daß die Richtungen y und y' parallel sind.

[0095] Reale Lichtquellen projizieren Lichtbündel in Form eines Kegels, wobei nicht alle Lichtstrahlen vollkommen parallel gerichtet sind. Reale Projektionssysteme verwenden daher im allgemeinen Lichtkegel. Diese Kegel sind durch einen Kegelwinkel definiert. Der Kegelwinkel ist der kleinste Winkel, der alle Strahlen von diesem Lichtbündel einschließt, die durch das Projektionssystem verwendet werden können.

[0096] Die Strahlen **1, 2, 3** und **4** in den **Fig. 11** und **12** veranschaulichen vier verschiedene Typen von Lichtstrahlen, die in einem solchen Lichtkegel zu finden sind. Eine Lichtquelle **70** erzeugt einen Lichtkegel, der zunächst durch einen Vorpolarisator **72** aufbereitet wird. Zu Erläuterungszwecken sind die Strahlen mit großen Ablenkungswerten dargestellt. Dabei versteht sich, daß alle Strahlen auf einen Polarisationsstrahlteiler **74** auftreffen. Der Strahl **1** ist ein Hauptstrahl parallel zu einer z-Achse. Die Strahlen **2-4** sind schräge Strahlen, d. h. Strahlen, die nicht parallel zu der Hauptachse (z) sind. Der Ausbreitungsvektor  $k_2$  des Strahls **2** weist eine x-Komponente auf und ist horizontal abgewinkelt, d. h. das Ende des  $k_2$ -Vektors ist in der horizontalen xz-Ebene horizontal gegen das Ende eines Hauptstrahls verschoben, der von der gleichen Stelle am Vorpolarisator ausgeht wie der Strahl **2**. Der Ausbreitungsvektor des Strahls **3**,  $k_3$ , weist eine vertikale Komponente auf und ist vertikal abgewinkelt (das Ende des Vektors  $k_3$  ist in der vertikalen yz-Ebene gegen das Ende eines Hauptstrahls vertikal verschoben, der von der gleichen Stelle am Vorpolarisator ausgeht wie der Strahl **3**). Der Strahl **4** ist sowohl vertikal als auch horizontal abgewinkelt. Die relativen Beträge jedes dieser vier Strahltypen im Lichtkegel eines Projektionssystems sind von den Details des Beleuchtungssystems abhängig. Eine gewöhn-

liche Metallhalogenid- oder Xenonlampen-Lichtquelle in einem typischen Beleuchtungssystem wird gemäß einfachen Phasenraumbetrachtungen sehr wenige Strahlen vom Typ 1, ebenso viele Strahlen vom Typ 2 wie vom Typ 3 und mehr Strahlen vom Typ 4 als von irgendeinem anderen Typ liefern.

[0097] Der Strahl **1** von **Fig. 11** ist ein Hauptstrahl des Projektionssystems und wird durch den Vorpolarisator **72** in der y-Richtung vorpolarisiert. Der Strahl **1** wird zu 100% durch einen ideal reflektierenden Polarisator reflektiert, der so ausgerichtet ist, daß er entweder y- oder s-polarisiertes Licht reflektiert, gleichgültig, ob es sich um einen Cartesischen Polarisator oder einen MacNeille-Polarisator handelt. Die reine y-Polarisation dieses Strahls ist auch eine reine s-Polarisation für den MacNeille-Polarisationsstrahlteiler, d. h. der Polarisationsvektor ist bei seiner Reflexion durch den Polarisationsstrahlteiler senkrecht zur Reflexionsebene für den Strahl (die xz-Ebene von **Fig. 11**). Wenn der Strahl **1** später an einem Spiegel oder einem spiegelähnlichen Bildwandler reflektiert wird, der in Richtung oder senkrecht zur z'-Achse angeordnet ist, bleibt er nach der Reflexion sowohl rein y- als auch rein s-polarisiert und wird mit hohem Wirkungsgrad in die Lichtquelle zurück reflektiert. Daher liefern Lichtstrahlen ähnlich dem Strahl **1** einen sehr guten Dunkelzustand mit geringer Streuung und ein sehr hohes Kontrastverhältnis, wenn sie zusammen mit einem Cartesischen oder einem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler verwendet werden. Leider können die meisten Lichtquellen kein vollkommen parallel gerichtetes Licht liefern.

[0098] Der Strahl **2** ist vom Strahl **1** horizontal abgelenkt worden, so daß der Strahl **2** eine Ausbreitungsrichtung (einen  $k_2$ -Vektor) mit einer x-Komponente aufweist. Der Strahl **2** ist in der xz-Ebene enthalten, d. h. der Strahl **2** weist eine Winkelverschiebung innerhalb der Horizontalebene auf. Da die xz-Ebene immer noch die Reflexionsebene ist, ist der Strahl **2** sowohl vor als auch nach der Reflexion an dem Polarisationsstrahlteiler sowie nach der Reflexion an einem spiegelähnlichen Bildwandler, der in Richtung und senkrecht zur z'-Achse angeordnet ist, noch rein y-polarisiert. Der Strahl **2** hat außerdem die Eigenschaft, daß die y-Polarisation identisch mit der s-Polarisation ist, so daß wiederum sowohl ideale MacNeillesche als auch ideale Cartesische Polarisatoren für Strahlen vom Typ des Strahls **2** einen äquivalenten hohen Kontrast liefern dürften, solange die Ablenkung nicht dazu führt, daß der Strahl zu stark vom Brewsterschen Winkel abweicht. Wenn dies geschieht, reflektiert der MacNeille-Polarisator sowohl s- als auch p-polarisiertes Licht, wodurch der vom Bildwandler zurückkehrende Strahl zur Lampe zurückgeworfen wird. Der Strahl **3** in **Fig. 12** ist vom Strahl **1** so abgelenkt worden, daß der Strahl **3** in der yz-Ebene enthalten ist. Der Strahl **3** ist in Bezug auf den Strahl **1** vertikal geneigt und entlang der Vertikalebene winkelschoben. Jetzt enthält der Strahl **3** zusätzlich zur Polarisation in der reinen y-Richtung auch eine Polarisationskomponente in der z-Richtung. Bei der späteren Reflexion an einem reflektierenden Bildwandler, wie in **Fig. 18** dargestellt, ist die Reflexionsebene für den entstehenden Strahl **3''** nicht mehr die gleiche wie für den Strahl **3'**. Da der Polarisationsvektor des Strahls **3''** durch die Reflexion nicht beeinflusst worden ist, bedeutet diese Drehung der Reflexionsebene, daß der Strahl **3''** nicht mehr rein s-polarisiert, sondern jetzt teilweise p-polarisiert ist. Dadurch wird eine effektive Depolarisation infolge Reflexion verursacht, die wir als Teil einer "Depolarisationskaskade" bezeichnen. Der Depolarisationseffekt wird im folgenden näher betrachtet, nachdem zunächst die Unterschiede in der Art und Weise analysiert werden, wie MacNeillesche und Cartesische Polarisationsstrahlteiler einfallendes Licht polarisieren.

[0099] Die **Fig. 13-20** geben eine bessere Darstellung der Reflexion eines Strahls **1**, des Hauptstrahls, sowie des vertikal geneigten Strahls **3** an einem Polarisationsstrahlteiler. Nach der Reflexion an dem Polarisationsstrahlteiler drehen sich die x- und die z-Achse um die y-Achse, damit die Ausrichtung der z-Achse auf die Ausbreitungsrichtung des Hauptstrahls erhalten bleibt. Die gedrehten Achsen werden mit x', y' und z' bezeichnet, und die reflektierten Strahlen werden als Strahl **1'** bzw. Strahl **3'** bezeichnet.

[0100] Wie aus den **Fig. 13-20** erkennbar, breitet sich der durch den ausgezogenen Vektor dargestellte Hauptstrahl **1** in z-Richtung aus. Die **Fig. 13-16** veranschaulichen die Wege der Strahlen **1** und **3** bei Reflexion an einem Polarisationsstrahlteiler **74**. Der Polarisationsstrahlteiler **74** weist einen in gestrichelten Linien dargestellten Würfel **76** mit einer Polarisationsstrahlteilerfläche **78** auf, die entlang einer inneren Diagonalebene des Würfels angeordnet ist. Der Würfel weist eine Einfallfläche **80** auf, welche die einfallenden Lichtstrahlen empfängt, und eine Austrittsfläche **458**, durch welche die an der Polarisationsstrahlteilerfläche reflektierten Strahlen aus dem Würfel austreten.

[0101] **Fig. 13** zeigt eine perspektivische Ansicht der Einfallseite, und **Fig. 14** zeigt eine perspektivische Ansicht der Austrittsseite. **Fig. 15** zeigt eine Draufsicht einer Deckfläche **84**, und **Fig. 16** zeigt einen Aufriß der Einfallseite des Polarisationsstrahlteilers **74**. Der Strahl **3**, dargestellt durch den strichpunktierten Vektor, breitet sich unter einem Winkel von 30° bezüglich des Strahls **1** entlang der yz-Ebene aus. Der Strahl **1** ist auch in der gleichen vertikalen yz-Ebene enthalten. Zu Erläuterungszwecken sind beide Strahlen mit dem gleichen Kontaktpunkt P an der Fläche des Polarisationsstrahlteilers **74** dargestellt worden, markiert durch den Schnittpunkt von zueinander senkrechten strichpunktierten Achsen. Nach Reflexion am Polarisationsstrahlteiler **74** breitet sich der Strahl **1'** in der negativen x-(z')-Richtung aus, während der Strahl **3'** in der xy-(yz')-Ebene um 30° abgelenkt wird.

[0102] **Fig. 17** zeigt das Äquivalent zu **Fig. 14**, wobei die Polarisationsstrahlteilerfläche vom herkömmlichen MacNeilleschen Typ ist, und zeigt die Auswirkungen der Reflexion auf den Polarisationszustand von ursprüng-

lich unpolarisierten Lichtstrahlen **1** und **3**. Die Polarisationszustände der reflektierten Komponenten der Strahlen **1'** und **3'** werden durch kleine Richtungspfeile veranschaulicht. Die Normale an die Reflexionsfläche ist durch  $\hat{n}$  dargestellt. Es läßt sich erkennen, daß die s-polarisierten Zustände sowohl des Strahls **1** als auch des Strahls **3** reflektiert werden. Da jedoch herkömmliche reflektierende Polarisatoren auf der Basis der Einfallsebene der ankommenden Strahlen funktionieren, sind die reflektierten Polarisationszustände für den Strahl **1'** und den Strahl **3'** jeweils senkrecht zur Einfallsebene für den entsprechenden Strahl. Dementsprechend ist nach der Reflexion an dem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler der Polarisationszustand des Strahls **3'** aus der yz'-Ebene herausgedreht, wie in **Fig. 17** dargestellt. Das heißt, in einem System mit einem herkömmlichen MacNeille-Polarisator ist die Reflexion eines vertikal geneigten Strahls in Bezug auf die Reflexion des Hauptstrahls depolarisiert. Je größer der Neigungswinkel, desto größer ist die Depolarisationswirkung. Für einen Neigungswinkel von  $30^\circ$  besteht die Depolarisationswirkung in einer Drehung der Reflexionsebene und infolgedessen des Polarisationszustands von s-polarisiertem Licht um  $39,2^\circ$  aus der gewünschten yz'-Ebene heraus.

[0103] Im Gegensatz zu **Fig. 17** zeigt **Fig. 19** die Reflexion (Strahlen **1'** und **3'**) der beiden unpolarisierten Strahlen **1** und **3** an dem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **50** des Anzeigesystems **10**. Der Cartesische Polarisationsstrahlteiler **50** weist eine feste vertikale Reflexionsachse auf. Der Cartesische Polarisationsstrahlteiler **50** weist eine weiterentwickelte mehrschichtige doppelbrechende 3M-Folie oder einen anderen geeigneten Cartesischen Polarisationsstrahlteiler auf, wie z.B.

[0104] einen Drahtgitterpolarisator oder irgendeinen anderen Polarisationsstrahlteiler mit Cartesischem Polarisator.

[0105] **Fig. 18** zeigt im vereinfachten Detail die Reflexion des Strahls **3'** am Polarisationsstrahlteiler **74** und die nachfolgende Reflexion des Strahls **3''** an einem reflektierenden Bildwandler **86**. Bei dem vorliegenden Modell wird ein Spiegel als idealer Bildwandler verwendet, um die Kontrastverschlechterung zu vermeiden, die mit Leistungsfaktoren des Bildwandlers verbunden ist, wie z. B. der Brechung und Streuung infolge Pixelierung oder Streuverzögerung im Dunkelzustand des Bildwandlers. Ein Spiegel bewirkt keine Drehung des Polarisationszustands des Lichts und repräsentiert die Funktion eines idealen reflektierenden LCD-Bildwandlers für die meisten nematischen Moden im Dunkelzustand.

[0106] Der in **Fig. 12** dargestellte Depolarisationseffekt wird verstärkt, wenn der Strahl **3''** an dem Bildwandler **86** reflektiert wird. Quantitativ gilt: wenn der Polarisationszustand des Strahls **3'** um einen Winkel  $\theta$  von der yz'-Ebene abweicht, dann weicht der Polarisationsvektor des von dem spiegelähnlichen Bildwandler zurückkehrenden Strahls **3''** um einen Winkel  $2\theta$  vom s-Polarisationszustand ab und erleidet daher eine Depolarisationskaskade. Dieser rein geometrische Effekt, der von der Drehung der Reflexionsebene herrührt, führt dazu, daß der Bespiegelte Strahl **3''** eine p-Komponente aufweist, die durch den MacNeille-Polarisationsstrahlteiler hindurchtritt und den Kontrast im Dunkelzustand für das System verschlechtert. Das Depolarisationskaskadenproblem wird durch die Gegenwart weiterer geneigter reflektierender Flächen weiter erschwert, wie z. B. durch Farbzerlegungsflächen, die zwischen dem Polarisationsstrahlteiler und dem Bildwandler angeordnet sind. Eine ausführliche Behandlung der Depolarisationsargumente bei schrägen Strahlen ist auch zu finden in Alan E. Rosenbluth et al., "Contrast Losses in Projection Display from Depolarization by Tilted Beam Splitter Coatings" (Kontrastverluste bei der Projektionsanzeige infolge Depolarisation durch geneigte Strahlteilerbeschichtungen), 1997 International Display Research Conference, S. 226-9 (nachstehend als "Rosenbluth IDRC" bezeichnet), und in Rosenbluth Contrast Properties, wobei relevante Abschnitte aus beiden Quellen hiermit durch Verweis einbezogen werden.

[0107] In Rosenbluth Contrast Properties wird ein Verfahren zum Ausgleich der Depolarisation erwähnt, wonach eine zusätzliche Komponente, ein  $\lambda/4$ - bzw. Viertelwellen-Verzögerungsplättchen, parallel oder senkrecht zur Polarisationsrichtung des Hauptstrahls eingesetzt wird. Bei niedrigen f/# tritt jedoch eine durch den Polarisationsstrahlteiler ausgelöste Verstärkung der Depolarisation infolge von schrägen Strahlen auf, die an anderen geneigten Flächen reflektiert werden, wie z. B. an denjenigen, welche die Farbkomponenten des Lichts zerlegen und rekombinieren. Rosenbluth rät vom Gebrauch reflektierender Interferenzschichten ab, indem er darauf hinweist, daß "strahlteilende Interferenzschichten Polarisationskreuzkopplung über Verbundwinkel-Depolarisation verursachen, wie ... für eine Polarisationsstrahlteilerschicht ... dargestellt ... Die Depolarisation führt zu unerwünschter Intensität im Dunkelzustandsbild und bewirkt eine Kontrastverschlechterung proportional zu  $NA^{-2}$ ". Siehe Rosenbluth Contrast Properties, S. 383-84. Rosenbluth stellt weiter fest, daß "typische Bedingungen für einen Kontrast  $> 100:1$  für einen PBS/TNLC-Modul, der ohne Viertelwellen-Verzögerer arbeitet, NA auf  $\sim 0,15$  (f/3,3) begrenzen". Siehe Rosenbluth Contrast Properties, S. 382. Demgemäß erkennt Rosenbluth, daß der "Depolarisationskaskaden-Effekt" herkömmlicher Polarisatoren die f/# von Projektoren auf der Basis von MacNeille-Polarisationsstrahlteilern effektiv auf einen Wert von mehr als etwa 3,3 begrenzt und dadurch die Lichtdurchflußleistung dieser Systeme begrenzt.

[0108] Im allgemeinen reflektiert der Cartesische Polarisator **50** Licht, das y-polarisiert ist, und läßt Licht durch, das x-polarisiert ist. Wie in **Fig. 19** erkennbar, gilt dies sogar für unpolarisiertes Licht. Da der Cartesische Polarisationsstrahlteiler **50** eine feste Reflexionsachse aufweist, die dem Material des Polarisations-

strahlteilers eigen ist und nicht vom Einfallswinkel der Lichtstrahlen abhängt, wird die Polarisation eines ursprünglich y-polarisierten Strahls **3**, wenn dieser als schräger Strahl **3'** reflektiert wird, bezüglich der Polarisation des reflektierten Hauptstrahls **1'** nicht wesentlich gedreht.

[0109] Der Polarisationszustand des reflektierten Strahls **3'** ist darauf beschränkt, daß er in der yz'-Ebene liegt, die den reflektierten Strahl und die vertikale Achse des Polarisationsstrahlteilers **50** enthält. Der reflektierte Strahl **3'** weist keine wesentliche x'-Komponente auf.

[0110] Dementsprechend wird nachfolgenden geneigten Reflexionsflächen unabhängig vom Einfallswinkel der schrägen Strahlen y-polarisiertes Licht zugeführt. Die Reflexionsflächen können zwar eine gewisse eigene Depolarisation einbringen, verstärken aber die vorher existierende Depolarisation des Strahls nicht, da diese Depolarisation nicht existiert oder minimal ist. Dieser Effekt gewährleistet, daß dem LCD-Bildwandler ein Strahl angeboten wird, der nahezu rein y-polarisiert ist, und minimiert den vor dem Erreichen des Bildwandlers eingebrachten Drehungsgrad.

[0111] In dem Fall, wo der Strahl **3'** an dem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler **50** reflektiert wird, treten die in Verbindung mit den **Fig. 12** und **18** beschriebene Depolarisationskaskade und die Kontrastverschlechterung nicht auf. Ein Cartesischer Polarisationsstrahlteiler erfordert kein einfallendes Licht, das sich in einem s-Polarisationszustand befindet, und hat keinen Vorteil davon.

[0112] Die vorliegende Erfindung ermöglicht Ausführungsformen von optischen Abbildungssystemen, die Lichtstrahlen mit einem sehr breiten Einfallswinkelbereich nutzen können. Erfindungsgemäße optische Systeme weisen Beleuchtungsoptiken mit f/# von weniger als 2,5 mit akzeptierbarem Systemkontrast auf. Ein akzeptierbarer Kontrast ist definiert als mindestens 100:1 über alle interessierenden Farbbänder in Projektionsystemen mit Verwendung eines Reflexionsspiegels als idealem Bildwandler. Das erfindungsgemäße System **10** mit dem Cartesischen Polarisator **50** ist experimentell mit einer Beleuchtungsoptik getestet worden, die eine Linsenlichtstärke von f/1,8 und dabei ein Kontrastverhältnis von mehr als 200:1 aufweist.

[0113] Zusammenfassend läßt sich sagen, daß erfindungsgemäße optische Systeme die Depolarisation durch Verwendung eines Cartesischen im Gegensatz zu einem MacNeilleschen Polarisationsstrahlteiler minimieren. Durch Verständnis und Minimieren des Depolarisationseffekts gestattet die vorliegende Erfindung die Verwendung von Optiken mit äußerst niedrigen f/#.

[0114] Das erfindungsgemäße System bietet weitere Vorteile für schräge Strahlen, die in Bezug auf den Hauptstrahl sowohl vertikal als auch horizontal abgewinkelt sind. Wie wieder aus **Fig. 12** erkennbar, ist der Strahl **4** sowohl vertikal als auch horizontal winkelschief. Der Polarisationsvektor für den Strahl **4** enthält Komponenten in x-Richtung sowie in y- und z-Richtung. Alle für einen reflektierten Strahl **3'** beschriebenen Depolarisationseffekte treten an einem reflektierten Strahl **4'** in einem System auf, das einen herkömmlichen, von der "Einfallsebene" abhängigen Polarisator enthält. Außerdem wird einem LCD-Bildwandler zusammen mit der dominierenden y-Polarisation eine zusätzliche Komponente von x'-polarisiertem Licht zugeführt. Die depolarisierte Komponente wird bei Reflexion an nachfolgenden geneigten reflektierenden Flächen verstärkt, wie z. B. an einem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler oder einer Farbzerlegungsfläche. Die verstärkte Depolarisationskomponente verursacht die gleiche Verschlechterung im Dunkelzustand wie für Strahlen vom Typ 3. Da die Bildwandler gewöhnlich so optimiert sind, daß sie mit nur einer Polarisation von Licht funktionieren, kann zusätzlich zu diesem Effekt eine weitere Kontrastverschlechterung auftreten, die auf das Vorhandensein der x'-polarisierten Komponente in dem Licht vom MacNeille-Polarisationsstrahlteiler zurückzuführen ist.

[0115] Das erfindungsgemäße optische Abbildungssystem mit Verwendung von Cartesischen Polarisationsstrahlteilern wird andererseits im allgemeinen die reflektierte x-Polarisationskomponente minimieren und daher eine hervorragende Leistung liefern.

[0116] Die vorliegende Erfindung offenbart ferner zusätzliche Vorteile für die Verwendung von reflektierenden Cartesischen Polarisatoren in einem Projektionssystem. Wie in den erläuterten Ausführungsformen dargestellt, können die Cartesischen Polarisatoren auf beliebige Einfallswinkel ausgerichtet oder geformt werden, um das Volumen zu minimieren, eine Trapezverzerrung zu erzielen oder auf andere Weise die Funktion des Projektionssystems zu optimieren. In einer typischen Ausführungsform ist der Cartesische Polarisationsstrahlteiler unter einem Winkel zwischen 40° und 50° bezüglich des Hauptstrahls ausgerichtet.

[0117] Da der Polarisationsstrahlteiler **50** eine festgesetzte Polarisationsachse aufweist, ist die Ausrichtung des Polarisationsstrahlteilers **50** wichtig. **Fig. 20** zeigt die Polarisationsrichtung der Strahlen **1'** und **3'**, wenn der Polarisationsstrahlteiler **50** um 90° um die Oberflächennormale gedreht wird. Die Materialachse der Polarisationsstrahlteiler-Reflexion ist jetzt horizontal statt vertikal. In diesem Fall erfährt der Polarisationszustand eine ähnliche, aber entgegengesetzte Drehung wie die für den MacNeille-Polarisationsstrahlteiler von **Fig. 17**. Für bessere Ergebnisse ist es vorzuziehen, daß die Polarisationsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung **k3** des Strahls **3'** und in der durch die Reflexions-Materialachse und **k3** definierten Ebene enthalten ist. Die Drehung des Polarisationszustands von Strahl **3'** in Bezug auf den Strahl **1'** ist in **Fig. 20** dargestellt.

[0118] Die **Fig. 24** und **25** veranschaulichen die Ergebnisse einer Computermodellierung des Depolarisationskontrastverhältnisses als Funktion von der f/# und vom Öffnungswinkel für herkömmliche Polarisationsstrahlteilersysteme und den typischen Cartesischen 3M-Folienpolarisationsstrahlteiler **50**. Es läßt sich beob-

achten, daß die Cartesischen Polarisationsstrahlteilersysteme gemäß der vorliegenden Erfindung ein viel besseres Kontrastverhältnis bei niedrigeren  $f/\#$  und bei größeren Öffnungswinkeln bieten.

[0119] Die Vorteile der vorliegenden Erfindung lassen sich im Lichte der folgenden Beispiele besser verstehen.

#### Beispiel 1

##### Funktion eines Prüfstands für ein Projektionssystem mit Lichtleitfaserbeleuchtung

[0120] Um die besten Verwendungsarten für Cartesische Polarisatoren in einem geknickten Strahlengang zu verstehen, wurden eine Konfiguration mit reflektierendem Bildwandler, zwei Bildwandlertypen, Bildwandler auf FLC-D-Basis und Bildwandler auf nematischer Basis getrennt betrachtet.

[0121] Eine kompakte und kostengünstige LCD-Projektorkonfiguration mit Verwendung von reflektierenden LC-Mikrodisplays, für die der Polarisationsstrahlteiler sowohl als Polarisator als auch als Analysator dient, ist in **Fig. 2** dargestellt. Eine Projektionsdisplay-Prüfstandimplementierung gemäß **Fig. 2** wurde gebaut und zum Vergleich der Funktion eines Systems gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet. Ein erstes System wurde getestet, das einen Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler enthielt, während ein zweites System mit Verwendung eines Hochleistungs-Polarisationsstrahlteilers auf der Basis der Brewster-Winkel-Reflexion getestet wurde. Eine zwischen zwei 0,3 mm dicken oder zwei 0,7 mm dicken Glasplatten laminierte mehrschichtige 3M-Polymer-Polarisationsstrahlteilerfolie wurde als repräsentativer Cartesischer Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler verwendet. Als Polarisationsstrahlteiler mit Brewster-Winkel-Reflexion wurde ein MacNeillescher Hochleistungs-Polarisationsstrahlteilerwürfel mit hoher Auslöschung verwendet, wie z. B. diejenigen, die von Balzers Thin Film, Inc., Golden, Colorado, beziehbar sind.

[0122] Die Funktion des MacNeille-Polarisationsstrahlteilerwürfels ist nachstehend zusammengefaßt.

Tabelle 1

	Hohe Auslöschung
Soll- $f/\#$	$f/2,5$
Auslöschung	500:1
Material	SF2
Maße	32 mm × 32 mm × 32 mm * 0,25 mm
freie Öffnung	30 mm × 30 mm

[0123] Polarisationsstrahlteilerkomponenten wurden in einem optischen System mit einer Beleuchtungsoptik zwischen  $f/1,8$  und  $f/8,0$  getestet, zunächst mit Lichtleitfaserbeleuchtung.

[0124] Das Beleuchtungsprofil der Lichtleitfaserbeleuchtung variierte stetig, war annähernd Lambertsch und bewirkte keine gleichmäßige Ausleuchtung des Bildwandlers.

[0125] Um Variable zu vermeiden, die auf eine nicht ideale Funktion der verwendeten Bildwandler zurückzuführen sind, wurden die Effekte des reflektierenden Bildwandlers modelliert, indem der Bildwandler durch einen Viertelwellenfilm ersetzt wurde, wie z. B. durch den Viertelwellenfilm von Edmund Scientific, Barrington, NJ, der auf einen Oberflächenspiegel auflaminiert wurde. Bei einer Drehung der optischen Achse des Films um  $45^\circ$  zur Eingangspolarisation wurde ein helles Bild auf dem Schirm projiziert. Ein Dunkelzustand trat auf, wenn der Viertelwellenfilm entfernt und ein blanker Aluminiumspiegel an die Stelle des Bildwandlers gesetzt wurde. Die Anordnung modellierte Flüssigkristall-Moden, die den Flüssigkristall vertikal zur optischen Achse drehen, wie z. B. TN- oder VHN-Moden (vertikal ausgerichtete nematische Moden). Ein alternativer Dunkelzustand trat auf, wenn der Viertelwellenfilm im System belassen, aber so gedreht wurde, daß die optische Achse des Films parallel (oder senkrecht) zur Eingangspolarisation gedreht war. Die alternative Anordnung modellierte Flüssigkristall-Moden, die einen Verzögerer in einer solchen Orientierung aufweisen, wie z. B. FLC-Bildwandler oder ideale Bildwandler, die in den obigen Moden mit einem Viertelwellen-Ausgleichsfilm über dem Bildwandler funktionieren.

[0126] Typischerweise werden Kontrastmessungen ausgeführt, indem der Lichtdurchfluß an neun Stellen des Projektionsschirms sowohl für dunkle als auch für helle Zustände gemessen wird und dann das Verhältnis dieser Messungen berechnet wird. Das Verhältnis wird als dynamischer Kontrastbereich bezeichnet. Der dynamische Kontrastbereich ist eine Messung des Kontrastverhältnisses. Das dynamische Kontrastbereichsverhältnis ist definiert als projizierter Lichtdurchfluß im hellsten Zustand, geteilt durch den Lichtdurchfluß im dunkelsten Zustand. Da, wie oben angedeutet, das Licht der Lichtleitfaser den Lichtwandler nicht gleichmäßig ausleuchtet, wurde für den Fall mit Lichtleitfaser-Beleuchtung eine Einzelpunktmessung im Mittelpunkt des Bildschirms angewandt, wo das Licht am hellsten ist. Ergebnisse zum dynamischen Kontrastbereich sind daher entweder als Einzelpunktwerte im Mittelpunkt des Bildschirms für Lichtleitfaser-Beleuchtung oder in allen an-

deren Fällen als Mittelwerte von neun Punkten zu verstehen.

[0127] Für den Fall eines Dunkelzustands bei einem blanken Spiegel unter Lichtleitfaser-Beleuchtung wurden dynamische Bereiche und der Lichtdurchfluß als Funktion von der  $f/\#$  gemessen. Der Cartesische Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler wies bei niedrigen  $f/\#$  ein wesentlich besseres Kontrastverhalten auf als die MacNeille-Würfel.

Tabelle 2

$f/\#$	Cartes. Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler Fluß (lm)	Cartes. Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler Dynamikbereich	MacNeille-Polarisationsstrahlteiler Fluß (lm)	MacNeille-Polarisationsstrahlteiler Dynamikbereich
1,8	232,1	211:1	241,0	38:1
2,0	222,6	219:1	227,0	41:1
2,4	194,0	251:1	193,0	53:1
2,8	149,4	306:1	151,0	69:1
3,3	112,3	383:1	114,0	96:1
4,0	80,6	507:1	82,5	135:1
4,7	56,3	590:1	57,7	186:1
5,6	38,7	608:1	40,2	236:1
6,7	27,4	863:1	27,9	279:1
8,0	18,7	884:1	19,9	398:1

[0128] Die Zerlegung der Leistung in Farbbänder ist vorzuziehen, jedoch erwies sich eine solche Zerlegung bei Lichtleitfaser-Beleuchtung wegen der niedrigen verfügbaren Helligkeitsgrade als nicht ausführbar, besonders im blauen Spektrum. Der Begriff "Farbbänder" bezieht sich auf Wellenlängenbänder, in die weißes Licht für eine unabhängige Modellierung zerlegt wird, bevor es zu einem Farbbild rekombiniert wird. Diese Bänder sind typischerweise weniger als 100 nm breit, z. B. 50-70 nm, und werden oft so gewählt, daß sie kein Licht enthalten, das für den Farbumfang nachteilig ist, wie z. B. gelbes und cyanblaues Licht in einem Dreibänder-Rot/Grün/Blau-Abbildungssystem. Die typischen Daten in Tabelle 2 demonstrieren zwar nicht explizit getrennte rote, grüne, blaue Kontrastpegel von mehr als 100:1 für das erfindungsgemäße System, aber die unten stehenden Tabellen zeigen Kontrastpegel von mehr als 100:1 für andere Beleuchtungsquellen. Dennoch ist klar, daß für einen quasi-Lambertschen Weißlichtkontrast der Cartesische Polarisationsstrahlteiler dem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler deutlich überlegen ist.

[0129] Der gemessene Durchfluß war zwar für das MacNeillesche und das Cartesische Weitwinkelsystem ähnlich, aber es ist zu beachten, daß der Cartesische Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler keinen Antireflexbelag enthielt, während der Mac-Neillesche Polarisationsstrahlteiler mit einem Antireflexbelag versehen war. Nach den Meßdaten der Lichtdurchlässigkeit als Funktion des Winkels wird erwartet, daß das Potential für einen verbesserten Durchfluß für die mehrschichtigen 3M-Polymerfolien besser sein wird.

[0130] Die qualitative Leistung der verschiedenen optischen Abbildungssysteme wurde gleichfalls untersucht, indem die Pupille der Projektionslinse auf den Schirm projiziert wurde. Durch eine derartige Projektion werden Einfallswinkel in Orte auf dem Schirm abgebildet. Konoskopische Kontrastdiagramme sind photopisch gemittelte Darstellungen der Pupillenbilder. Zur Abbildung der Pupillen wurde eine Digitalkamera benutzt. Die resultierenden Projektionen sind in den **Fig. 21-23** dargestellt.

[0131] Die **Fig. 21-23** veranschaulichen das Licht im Dunkelzustand, das nach dem Durchgang durch den Projektorprüfstand von **Fig. 2** einschließlich der Vor- und Nachpolarisatoren an der Pupille der  $f/2$ -Projektionslinse vorhanden ist. An der Pupille der Projektionslinse wird Licht nach dem Winkel räumlich sortiert. Daher sind diese Bilder Abbildungen von konoskopischen Diagrammen der Lichtdurchlässigkeit im Dunkelzustand als Funktion vom Einfallswinkel. Diese Bilder können mit den **Fig. 32-34** verglichen werden, die berechnete Kontrastergebnisse darstellen. Für diese Ergebnisse, die weiter unten ausführlicher beschrieben werden, wurde ein Viertelwellenfilm benutzt, um einen hellen Zustand zur Berechnung von Kontrastverhältnissen zu liefern,



und ein Spiegel wurde zur Darstellung des in den Figuren abgebildeten Dunkelzustands benutzt. Die Bilder der **Fig. 21-23** wurden mit einer Digitalkamera mit automatischer Verstärkungseinstellung aufgenommen, um eine gute Bildqualität zu liefern; sonst wurden alle Bilder unter identischen Bedingungen aufgenommen. Da die Kamera die Verstärkung reguliert, können diese Bilder nur qualitativ verwendet werden. Die jedem Bild zugeordneten Gesamtbildschirm-Kontrastwerte werden weiter unten zum Vergleich angegeben.

[0132] **Fig. 22** veranschaulicht das Verhalten im Dunkelzustand eines MacNeille-Polarisators. In einer Farbdarstellung weist sie entlang der linken Seite eine merkliche Rötung auf, die dem Licht entspricht, das unter Winkeln auf die Polarisationsstrahlteilerschicht auffällt, die um weniger als  $45^\circ$  von der Normalen abweichen. Sie weist ein ziemlich tiefes Malteserband mit gutem Kontrast auf, aber das Band ist auch recht schmal, und die am oberen und am unteren Ende des Bildes vorhandenen schrägen Strahlen vom Typ 3 und 4 verursachen eine beträchtliche Helligkeitszunahme. Der mit diesem Pupillenbild verbundene Weißkontrast auf dem Schirm beträgt 53:1, jedoch kann der Kontrast über ein bestimmtes Farbband wegen der beobachteten Rotstreuung niedriger als dieser Wert sein.

[0133] **Fig. 21** zeigt das Pupillenbild für einen Dunkelzustand des typischen Systems mit Verwendung von 3M DBEF-Folie. Dieses Bild weist ein viel weniger dunkles, aber breiteres Malteserband auf. Das auf den Schirm projizierte Bild zeigte eine leichte Rottfärbung in vertikalen Bändern quer über das Bild sowie eine ausgeprägte Blau/Grün-Färbung des Malteserbandes, besonders auf der linken Seite des Bandes. Die Röte ist weniger ausgeprägt als bei dem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler. Das breitere Malteserband und die für diesen Polarisator erkennbare geringere Streuung der schrägen Strahlen entsprechen der Erwartung, da es sich um einen Cartesischen Polarisator handelt. Der Grund für die unzureichende Leistung ist, daß der Polarisator nicht für hohe Auslöschung ausgelegt worden ist. Dies zeigt sich in der Helligkeit seines Malteserbandes relativ zu derjenigen des MacNeille-Polarisationsstrahlteilers. Der bei diesem DBEF-Polarisationsstrahlteiler gemessene Weißlichtkontrast betrug 95:1, jedoch war dieser Kontrast nicht über das gesamte sichtbare Band gleichmäßig. Um dies zu demonstrieren, wurde in diesem Falle versucht, trotz der niedrigen Helligkeitsgrade den Kontrast der roten, grünen und blauen Farbbänder zu messen. Der Kontrast des roten Bandes für diesen DBEF-Polarisationsstrahlteiler wurde mit 104:1 gemessen, der Kontrast des grünen Bandes mit 94:1 und der Kontrast des blauen Bandes mit 79:1. Dieser DBEF-Polarisationsstrahlteiler wäre daher kein akzeptierbarer Polarisationsstrahlteiler für Projektionszwecke mit hohem Kontrast. Schließlich zeigt **Fig. 23** die Leistung im Dunkelzustand des mehrschichtigen 3M-Polymer-Polarisationsstrahlteilers. Die Gesamtdunkelheit des Bildes ist auffallend, trotz der automatischen Verstärkungseinstellung der Kamera. Das Malteserband ist viel breiter als bei dem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler oder dem DBEF-Polarisationsstrahlteiler, und die Streuung von Strahlen vom Typ 3 und 4 ist viel weniger stark als in einem der anderen Fälle. Der bei diesem Polarisationsstrahlteiler gemessene Weißlichtkontrast betrug 222:1. Der Farbbandkontrast für diesen Polarisationsstrahlteiler wird ausführlicher in Beispiel 2 beschrieben.

[0134] Die **Fig. 31-35** zeigen Ergebnisse, die ausführlicher und mehr quantitativ darstellen, wie ein optisches Abbildungssystem mit Cartesischem Polarisator die Leistung des Beleuchtungsabschnitts eines Projektionsystems verbessert. Zum Modellieren des Durchgangs oder der Reflexion eines Stokesschen Vektors an Oberflächen oder mehrschichtigen Stapeln wurde ein Computercode verwendet. Lichtstärken für die verschiedenen Polarisationszustände erhielt man durch Gewichten des Ergebnisses bei jeder Wellenlänge mit dem Wert des photopischen spektralen Hellempfindungsgrades CIE 1931 und der Strahlungsdichte eines Lambertischen Beleuchtungskörpers gleicher Energie und Integration über alle Wellenlängen von 400 bis 700 nm. Auf diese Weise erhielt man Ergebnisse wie z. B. den Polarisationszustand und das Kontrastverhältnis für jeden Strahl in einem kegelförmigen Bündel. Zur Darstellung dieser Daten zeigen die **Fig. 31-35** konoskopische Diagramme.

[0135] Ein konoskopisches Diagramm zeigt Daten, die mit den Polarkoordinatenwinkeln  $\theta$  und  $\phi$  variieren, unter Verwendung eines zweidimensionalen Polarkoordinatensystems mit  $\theta$  als Radialkoordinate. Dadurch wird die obere Halbkugel auf eine Scheibe abgebildet, und Daten werden entlang Ringen mit konstantem  $\theta$  und Strahlen mit konstantem  $\phi$  dargestellt. Konoskopische Diagramme werden gewöhnlich zur Darstellung des Winkelverhaltens von Vorrichtungen wie z. B. Flüssigkristallanzeigen durch ein Diagramm des Winkelkontrastverhältnisses benutzt, d. h. des Kontrastverhältnisses (CR) als Funktion vom Betrachtungswinkel. Man bildet das Verhältnis der Helligkeit im hellen Zustand zur Helligkeit im dunklen Zustand für Strahlen bei verschiedenen Winkeln und trägt die Konturen mit konstantem CR konoskopisch auf. Außerdem wurde ein Verfahren zur konoskopischen Darstellung von Polarisationsdatensätzen entwickelt.

[0136] **Fig. 31** zeigt ein konoskopisches CR-Umrißdiagramm, das für einen vertikalen oder Y-orientierten linearen Polarisator berechnet wurde, der in der XY-Ebene liegt und mit einem zweiten, identischen Polarisator analysiert wird, der in einer zur ersten Ebene parallelen Ebene liegt. (Die Orientierung des Polarisators wird benutzt, um auf die Orientierung seiner Transmissionsachse zu verweisen.) Der helle Zustand trat auf, wenn der Analysator parallel zur Y-Achse orientiert war, und der dunkle Zustand, wenn der Analysator senkrecht dazu orientiert war. Das Unterscheidungsmuster wird als Malteserkreuz bezeichnet, wobei die Bereiche mit hohem Kontrast um die Hauptebenen herum, die durch  $\phi = 0, 180^\circ$  und  $\phi = \pm 90^\circ$  definiert sind, die dunklen Arme

des Kreuzes bilden. Da die Veränderung der Lichtstärke im hellen Zustand mit dem Winkel typischerweise ziemlich klein ist, sind auch die Bereiche mit hohem Winkelkontrastverhältnis (CR) sehr dunkel. In diesem Fall ist die Ähnlichkeit mit einem tatsächlichen Malteserkreuz wegen des kleinen Winkelbereichs gering. Für  $\theta \geq 60^\circ$  ist sie viel größer.

[0137] Man kann auch ein konoskopisches Format zur Darstellung großer Mengen von winkelabhängigen Polarisationsdaten in einem einzigen Diagramm verwenden. Eine gebräuchliche Weise, den Polarisationszustand eines Lichtstrahls zu beschreiben, ist die Verwendung seiner Polarisationsellipse, d. h. der Kurve, die von dem Endpunkt des elektrischen Feldvektors während einer Schwingungsperiode überstrichen wird. Die Ellipse liefert eine graphische Darstellung des Betrages und der Richtung des Polarisationszustands des Lichtstrahls bezüglich eines Paares orthogonaler Bezugsachsen, die in einer Ebene senkrecht zur Strahlrichtung liegen. Wichtige Spezialfälle sind unter anderem die Zirkularpolarisation (wo die Ellipse zu einem Kreis wird) und die lineare Polarisation (wo die Ellipse zu einer Geraden entartet).

[0138] Für beliebiges  $\theta$  und  $\phi$  kann die Polarisations Ebene in dem durch  $\theta$  und  $\phi$  definierten lokalen sp-Koordinatensystem (um  $-\phi$ ) gedreht und in einem globalen XY-Koordinatensystem dargestellt werden. Diese Transformation ermöglicht die Darstellung mehrerer winkelabhängiger Polarisationsdatensätze mit einem einzigen gemeinsamen Bezugssystem. Auf diese Weise dargestellt, würde z. B. eine schmale vertikale Ellipse eine nahezu lineare Polarisation in der YZ-Ebene anzeigen. Zu beachten ist, daß eine lineare Polarisation parallel zur Y-Achse ein Spezialfall ist, der für  $\theta = 0$  oder bei  $\phi = 0$  oder  $180^\circ$  auftritt, denn es passiert nur in diesen Fällen, daß die Y-Achse tatsächlich in einer zur Strahlrichtung senkrechten Ebene liegt. Eine ähnliche Interpretation ergibt sich für den Fall einer schmalen horizontalen Ellipse. In einer Verfeinerung dieses Verfahrens wird die Größe einer Ellipse mit dem Polarisationsgrad (DP) des Lichts gewichtet. (Der DP ist der Anteil der gesamten Lichtintensität in einem wohldefinierten Polarisationszustand. Natürliches Licht ist statistisch polarisiert und hat einen  $DP \approx 0$ .)

[0139] **Fig. 26** zeigt die berechneten Polarisationszustände von ursprünglich unpolarisierten Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch einen vertikalen oder Y-gerichteten Polarisator unter den Winkeln  $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  und  $\phi = 0^\circ, 30^\circ \dots 330^\circ$ . Die Ellipse bei  $\theta = 30^\circ$  und  $\phi = 60^\circ$  ist besonders gekennzeichnet worden. Dieses Modell ist für einen typischen linearen Polarisator von hoher Güte vorgesehen, weshalb die Ellipsen im wesentlichen senkrechte Linien sind. Zu beachten ist jedoch, daß bei großen Einfallswinkeln außerhalb der Hauptebenen eine leichte Drehung der Ellipsen aus der Vertikalen heraus auftritt. (Der Effekt ist recht auffällig für  $\theta > 50^\circ$ .) In diesen Richtungen aus dem Polarisator austretendes Licht ist weniger vertikal und mehr horizontal polarisiert als Licht, das sich in anderen Richtungen ausbreitet. Dies ist die Quelle des Malteserkreuzes. Die Ellipsenstruktur für einen gekreuzten Polarisator (in horizontaler oder X-Richtung) wäre identisch mit der um  $90^\circ$  gedrehten **Fig. 26**. Innerhalb der Hauptebenen wären die Ellipsen für die gekreuzten Polarisatoren orthogonal, und der Lichtdurchgang wird entlang diesen Richtungen blockiert. Bei großen Einfallswinkeln und außerhalb der Hauptebenen sind die Ellipsen für die beiden Polarisatoren nicht mehr orthogonal (tatsächlich sind sie in entgegengesetzte Richtungen gedreht), was darauf schließen läßt, daß Licht durchsickern muß.

[0140] **Fig. 34** zeigt ein konoskopisches CR-Umrißdiagramm für einen y-orientierten linearen Polarisator, der in der xy-Ebene liegt, gefolgt von einem zweiachsigen mehrschichtigen reflektierenden Polymer-Polarisator mit einer Reflexionsachse parallel zur y-Achse und einer Oberflächennormalen, die in einem Winkel von  $45^\circ$  zur xy-Ebene orientiert ist. Dieser besondere reflektierende Polarisator wurde speziell zur Verwendung als Polarisationsstrahlteiler vom Cartesischen Typ konstruiert. Ein analysierender Polarisator (der mit dem ersten linearen Polarisator identisch ist) wurde in der yz-Ebene angeordnet. Der helle Zustand trat auf, wenn der Analysator so orientiert war, daß er parallel zur y-Achse polarisiertes Licht durchließ, und der dunkle Zustand trat auf, wenn der Analysator so orientiert war, daß er parallel zur y-Achse polarisiertes Licht blockierte. Das in **Fig. 34** dargestellte Muster von CR als Funktion vom Winkel wird als Malteserband bezeichnet und ist ähnlich dem Muster, das durch nicht koplanare Polarisatoren gebildet wird. (Da in diesem Fall die Ebene des zweiten Polarisators um die y-Achse gedreht ist, wird das Malteserkreuzmuster entlang der X-Achse verschoben. Dadurch zeigt sich, daß das Malteserband ein Arm des Malteserkreuzes ist.) Senkrechter Einfall tritt auf, wenn  $\phi = 180^\circ$  und  $\theta = 45^\circ$  ist. Entlang der negativen ( $\theta = 180^\circ$ ) x-Achse treffen dann die Strahlen näher zur Normalenrichtung auf die Oberfläche des Strahlteilers auf. Die Verbesserung des Reflexionswirkungsgrades bei kleinerem Winkel führt dann dazu, daß das Band entlang der negativen x-Achse breiter ist.

[0141] Das für die Kombination aus Polarisator und Strahlteiler berechnete höchste Winkelkontrastverhältnis (CR) war viel größer als für den Polarisator allein, während das niedrigste berechnete CR viel kleiner war. Es gibt zwei Einwirkungsarten des reflektierenden Polarisators auf Licht vom ersten Polarisator. Die erste Einwirkung erfolgt durch eine Verringerung der Menge des unpolarisierten Lichts. Eine Verringerung des unpolarisierten Lichts ist eine Verringerung des unerwünschten Polarisationsgrades. Der reflektierende Polarisator erhöht tatsächlich den Polarisationsgrad (DP) des Lichts über einen begrenzten Winkelbereich. Aus dem ersten Polarisator tritt Licht mit hohem DP aus, in diesem Falle von etwa 99,80 bis 99,90, aber durch Kaskadieren bzw. Hintereinanderschalten mit dem Strahlteiler wird der DP auf bis zu 99,98 erhöht. Die zweite Einwirkungsart des reflektierenden Polarisators auf Licht vom ersten Polarisator besteht darin, daß er dessen Polarisationscharak-

ter ändert und entweder die lineare Polarisation dreht oder Elliptizität einführt. **Fig. 27** zeigt die berechneten Polarisationsellipsen für das vertikal polarisierte Licht nach Reflexion durch den Polarisationsstrahlteiler. Ein Vergleich mit **Fig. 26** zeigt, daß der reflektierende Polarisator zwar keine Elliptizität hinzugefügt, aber die Polarisation gedreht hat. Bereiche mit Ellipsen, die merklich gegen die Vertikale gedreht sind, erkennt man als die gleichen Bereiche mit niedrigem Winkelkontrastverhältnis (CR) in **Fig. 34**.

[0142] Eine Möglichkeit zur Veranschaulichung des oben beschriebenen Effekts ist das Depolarisationskontrastverhältnis (DCR) als Funktion der  $f/\#$  von optischen Abbildungssystemen mit einem herkömmlichen Polarisationsstrahlteiler und Systemen mit einem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler. Die **Fig. 24** und **25** zeigen Diagramme dieser Ergebnisse. Das Depolarisationskontrastverhältnis ist definiert als das Verhältnis des Durchlaßgrades für reflektiertes Licht, das aus einem Vorpolarisator/Polarisationsstrahlteiler durch einen vertikalen (y-) Analysator austritt, zu Licht, das durch einen horizontalen (x'-) Analysator austritt. Der Fachmann wird erkennen, daß der Cartesische Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler im Vergleich zum MacNeille-Polarisationsstrahlteiler bei niedrigen  $f/\#$  ein ungewöhnlich gutes DCR aufweist.

[0143] Das Winkelkontrastverhältnis (CR) ist dem Depolarisationskontrastverhältnis (DCR) sehr ähnlich. Es ist ein Maß für die Fähigkeit des Strahlteilers, die Polarisation des von ihm reflektierten Lichts beizubehalten. Das Depolarisationskontrastverhältnis (DCR) in Abhängigkeit von Winkel wird jedoch durch Integration der Lichtstärke im hellen und dunklen Zustand über alle  $\phi$  bis zu einem bestimmten Wert von  $\theta$  und durch Bestimmen ihres Verhältnisses und nicht durch Integration des Winkelkontrastverhältnisses (CR) berechnet. Die für die Kombination aus Polarisator und Strahlteiler in **Fig. 34** berechneten DCR-Werte sind in den **Fig. 24** und **25** dargestellt. Erwartungsgemäß weist die Kombination aus Polarisator und Strahlteiler für große  $f/\#$  (kleine Winkel) einen größeren DCR-Wert auf.

[0144] **Fig. 32** zeigt außerdem das berechnete Winkelkontrastverhältnis (CR) für einen y-orientierten linearen Polarisator, der in der xy-Ebene liegt, gefolgt von einem reflektierenden Polarisator mit einer Reflexionsachse parallel zur y-Achse und einer im Winkel von  $45^\circ$  zur xy-Ebene orientierten Oberflächennormalen. Der zweiaxige mehrschichtige reflektierende Polymer-Polarisator aus weiterentwickelter 3M-Folie (3M advanced film) in diesem Beispiel wurde ursprünglich entwickelt, um die Helligkeit von LCDs über einen breiten Winkelbereich zu verbessern, ähnlich der hellkeitsverbessernden Doppelfolie von 3M [3M Dual Brightness Enhancing Film (DBEF)]. Das in **Fig. 32** dargestellte Muster für das Winkelkontrastverhältnis (CR) weist im Vergleich zu **Fig. 34** ein schmaleres Band mit sehr hohem Kontrast auf. Die Überlegenheit des mit der weiterentwickelten 3M-Folie konstruierten optischen Abbildungssystems für  $f/\#$  von weniger als etwa  $f/14$  ( $\theta \geq 2^\circ$ ) ist deutlich in den **Fig. 32** und **34** dargestellt. Obwohl dies aus dem Vergleich des DBEF-Polarisationsellipsendiagramms (**Fig. 28**) mit dem Strahlteilerdiagramm (**Fig. 27**) nicht offensichtlich ist, bietet der Strahlteiler tatsächlich eine stärker vertikale Polarisation über einen größeren Winkelbereich. Außerdem erzeugt er Licht mit einem größeren Polarisationsgrad (DP).

[0145] Die beiden gerade diskutierten reflektierenden Polarisatoren sind im wesentlichen Cartesische Polarisatoren. Im Vergleich dazu ist ein MacNeille-Polarisator kein Cartesischer Polarisator. Seine mehrschichtige optische Beschichtung besteht aus isotropen Materialien und ist bei der Reflexion einer Polarisation und der Durchlässigkeit für eine zweite Polarisation von den Brewsterschen Winkelphänomenen abhängig. **Fig. 33** zeigt das berechnete Winkelkontrastverhältnis (CR) für einen y-orientierten linearen Polarisator, der in der xy-Ebene liegt, gefolgt von einem reflektierenden  $45^\circ$ -MacNeille-Polarisator vom Würfeltyp mit zur y-Achse paralleler Neigungsachse. Das Kontrastverhältnis (CR) wurde berechnet, indem der analysierende Polarisator (identisch mit dem ersten linearen Polarisator) in der yz-Ebene parallel zur Austrittsfläche des Würfels angeordnet wurde. Das Muster des Winkelkontrastverhältnisses (CR) unterscheidet sich von denjenigen der beiden Cartesischen Polarisatoren darin, daß es einen kleineren Bereich mit hohem CR-Wert aufweist, der entlang der positiven x-Achse ein wenig größer wird. Die **Fig. 24** und **25** zeigen, daß dieser spezielle MacNeille-Polarisator bei  $f/2$  wesentlich schlechter ist als einer der Cartesischen Polarisatoren und über einen viel kleineren Kegelwinkelbereich einen brauchbaren Kontrast liefert.

[0146] **Fig. 29**, ein konoskopisches Diagramm der Polarisationsellipsen für den mit ursprünglich unpolarisiertem Licht beleuchteten MacNeille-Polarisator, zeigt gleichfalls ein von den Cartesischen Polarisatoren sehr verschiedenes Verhalten. Die Abhängigkeit von den Brewsterschen Phänomenen ist ganz klar, besonders bei der starken Drehung der Ellipsen um die  $\phi = 90^\circ$ -Achse (ausgerichtet auf die y-Achse). Entlang der y-Achse wird mit zunehmendem Einfallswinkel die Reflexionsebene der auf die  $45^\circ$ -Beschichtung auftreffenden Strahlen gedreht. Da die Beschichtung s-polarisiertes Licht reflektiert, muß sich die Polarisation des reflektierten Strahls gleichfalls drehen. Diese schrägen Strahlen werden durch den MacNeille-Polarisator am meisten gedreht, wobei der Drehungsgrad der Polarisation mit zunehmendem Einfallswinkel wächst.

[0147] Zu beachten ist, daß ein Cartesischer Polarisator in einer Strahlteileranwendung unter Umständen falsch angewandt werden kann. Um diesen Punkt zu veranschaulichen, wurde das Winkelkontrastverhältnis (CR) für einen horizontalen oder x-orientierten linearen Polarisator berechnet, der in der xy-Ebene liegt, gefolgt von einem reflektierenden Polarisator mit zur y-Achse paralleler Durchlässigkeitsachse und einer in einem Winkel von  $45^\circ$  zur xy-Ebene ausgerichteten Oberflächennormalen. In diesem Experiment wurde der gleiche

reflektierende Polarisator verwendet wie derjenige, der in dem obigen zweiten Beispiel als Polarisationsstrahlteiler eingesetzt wurde, lediglich um  $90^\circ$  um seine Normale gedreht, so daß er horizontal polarisiertes Licht reflektiert. **Fig. 35** zeigt, daß das Malteserband in diesem Fall ziemlich schmal ist und einen sehr kleinen Bereich mit guter Leistung aufweist. Die Ergebnisse wurden in **Fig. 30** bestätigt, wo zu erkennen ist, daß der mit unpolarisiertem Licht beleuchtete horizontale Polarisationsstrahlteiler Licht mit Polarisationszuständen durchläßt, die stark aus der gewünschten Richtung, in diesem Fall der x-Richtung, herausgedreht sind.

[0148] Eine Untersuchung von **Fig. 35** zeigt, daß die Strahlteilerfolie, die so orientiert ist, daß sie horizontal polarisiertes Licht reflektiert, die Polarisation schlecht aufrechterhält, obwohl sie ein guter Cartesischer Polarisator ist, wenn sie zur Reflexion von vertikal polarisiertem Licht ausgerichtet ist. In den früheren Beispielen waren die Durchlässigkeitsachse des ersten Polarisators und die Reflexionsachse des zweiten parallel, und die reflektierte Komponente bestand größtenteils aus s-polarisiertem Licht. In diesem Fall sind die Durchlässigkeitsachse des ersten Polarisators und die Reflexionsachse des zweiten Polarisators lediglich koplanar, und die reflektierte Komponente besteht überwiegend aus p-polarisiertem Licht. Offenbar erfordert die Fähigkeit dieses Cartesischen Polarisators zur Reflexion von polarisiertem Licht ohne Drehung eine bevorzugte Ausrichtung seiner Reflexionsachse, um die Änderungen der Reflexion mit dem Einfallswinkel zu minimieren.

[0149] Die Ergebnisse für die Analyse mit Lichtleitfaserbeleuchtung zeigen, daß ein verdreht nematisches (TN-) Bildwandlersystem mit dem MacNeille-Polarisationsstrahlteiler mit hoher Auslöschung keinen so hohen Kontrast liefert wie ein TN-Bildwandlersystem mit einem Cartesischen Polarisator.

## Beispiel 2

[0150] Funktion eines Prüfstands für ein Projektionssystem mit Röntsch-Beleuchtung Zweitens wurden die Systeme bei gleichen Parametern wie in Beispiel 1 mit Beleuchtung durch eine gepaarte Mikrolinsenanordnung (Röntsch-Beleuchtung) getestet, wie in **Fig. 4** dargestellt. In dem Fall mit Röntsch-Beleuchtung war das Beleuchtungsprofil wegen des Integrators der Mikrolinsenanordnung stark strukturiert, und der Bildwandler wurde gleichmäßiger ausgeleuchtet. Röntsch-Beleuchtung wird gewöhnlich in elektronischen Projektoren verwendet.

[0151] Die optischen Abbildungssysteme wurden unter Verwendung von Komponenten mit  $f/\#$  zwischen 1,8 und 8,0 getestet. Der dynamische Bereich wurde gemessen, wie oben beschrieben.

[0152] Für den Fall eines MacNeilleschen Würfels mit Röntsch-Beleuchtung wurden die folgenden dynamischen Bereiche und Lichtdurchflußwerte mit und ohne Viertelwellenkompensationsfilm gemessen. Die Viertelwellenkompensation erfolgt durch Einsetzen eines Viertelwellenkompensationsfilms (QWF) mit einem Winkel von  $0^\circ$  zur Polarisationsrichtung des auf den Bildwandler auffallenden Lichts zur Herstellung eines Dunkelzustands. Die Konfiguration modelliert einen FLC-D-Bildwandler. Der Spiegel wurde nur im Dunkelzustand zum Modellieren eines nematischen Bildwandlers verwendet. Im vorliegenden Beispiel war eine ausreichende Beleuchtung verfügbar, um eine Angabe der Ergebnisse nach Farbband zu ermöglichen.

Tabelle 3

Dynamikbereich des Systems mit MacNeille-Polarisationsstrahlteiler in Röntsch-Beleuchtung

Dunkel- zustand	Spiegel	Spiegel	Spiegel	Spiegel mit QWF	Spiegel mit QWF	Spiegel mit QWF
f/#	MacNeille Grün- Dynamik- bereich	MacNeille Rot- Dynamik- bereich	MacNeille Blau- Dynamik- bereich	MacNeille Grün- Dynamik- bereich	MacNeille Rot- Dynamik- bereich	MacNeille Blau- Dynamik- bereich
1,8	31:1	31:1	29:1	93:1	91:1	63:1
2,0	33:1	34:1	30:1	94:1	93:1	65:1
2,4	38:1	39:1	36:1	101:1	101:1	73:1
2,8	42:1	45:1	40:1	147:1	140:1	94:1
3,3	67:1	77:1	61:1	271:1	298:1	136:1
4,0	88:1	104:1	81:1	336:1	368:1	167:1
4,7	157:1	166:1	129:1	519:1	452:1	258:1
5,6	405:1	333:1	241:1	826:1	599:1	378:1
6,7	509:1	442:1	300:1	1019:1	694:1	420:1
8,0	577:1	496:1	287:1	1129:1	662:1	430:1

Tabelle 4

Systemdurchfluß bei MacNeille-Polarisationsstrahlteiler in Röntsch-Beleuchtung

f/#	MacNeille Grün-Lichtstrom (lm)	MacNeille Rot-Lichtstrom (lm)	MacNeille Blau-Lichtstrom (lm)
1,8	1110,0	163,0	74,0
2,0	1070,0	158,0	70,9
2,4	990,0	145,0	65,7
2,8	959,0	140,0	62,9
3,3	852,0	125,0	55,9
4,0	685,0	103,0	45,1
4,7	545,0	81,4	36,1
5,6	413,0	59,9	26,5
6,7	326,0	48,6	21,0
8,0	271,0	39,7	17,2

[0153] Mit einem Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler aufgenommene Messungen lieferten die folgenden Ergebnisse:

Tabelle 5

Dynamikbereich des Systems mit Cartesischem Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler in Räntsch-Beleuchtung

Dunkel- zustand	Spiegel	Spiegel	Spiegel	Spiegel mit QWF	Spiegel mit QWF	Spiegel mit QWF
f/#	Cartes. Weitw.- Polaris.  Grün- Dynamik- bereich	Cartes. Weitw.- Polaris.  Rot- Dynamik- bereich	Cartes. Weitw.- Polaris.  Blau- Dynamik- bereich	Cartes. Weitw.- Polaris.  Grün- Dynamik- bereich	Cartes. Weitw.- Polaris.  Rot- Dynamik- bereich	Cartes. Weitw.- Polaris.  Blau- Dynamik- bereich
1,8	206:1	205:1	124:1	280:1	245:1	175:1
2,0	214:1	215:1	130:1	302:1	277:1	190:1
2,4	230:1	212:1	132:1	304:1	300:1	199:1
2,8	268:1	283:1	157:1	347:1	324:1	226:1
3,3	344:1	345:1	161:1	460:1	407:1	259:1
4,0	405:1	378:1	165:1	653:1	567:1	271:1
4,7	469:1	432:1	191:1	831:1	692:1	324:1
5,6	457:1	450:1	172:1	938:1	707:1	343:1
6,7	538:1	466:1	221:1	1018:1	746:1	310:1
8,0	614:1	662:1	216:1	1005:1	827:1	360:1

Tabelle 6

Systemdurchfluß bei Cartesischem Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler in Räntsch-Beleuchtung

f/#	Cartesischer Weitw.-Polaris. Grün-Lichtstrom (lm)	Cartesischer Weitw.-Polaris. Rot-Lichtstrom (lm)	Cartesischer Weitw.-Polaris. Blau-Lichtstrom (lm)
1,8	1219,0	173,8	77,7
2,0	1166,0	164,3	74,5
2,4	1060,0	146,3	67,4
2,8	978,4	141,0	59,9
3,3	853,3	120,8	49,4
4,0	699,6	96,1	40,2
4,7	537,4	73,3	34,3
5,6	367,8	52,5	21,8
6,7	302,1	39,5	16,4
8,0	234,2	35,1	11,4

[0154] Beispiel 2 ähnelt stärker der Anordnung eines tatsächlichen Projektionssystems. In diesem Beispiel ist die Kontrastleistung des MacNeilleschen Würfels viel geringer als die des Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteilers; der Unterschied ist dabei viel größer als der bei Lichtleitfaserbeleuchtung beobachtete Unterschied.

## Zusammenfassung der Ergebnisse

[0155] Es wurde beobachtet, daß auf reflektierenden nematischen LCDs basierende elektronische Projektionssysteme mit Cartesischen Polarisationsstrahlteilern aus weiterentwickelter 3M-Folie eine Reihe von Vorteilen gegenüber Systemen mit MacNeille-Polarisationsstrahlteilern aufweisen. Dazu gehören:

1. Systeme mit Cartesischen Polarisationsstrahlteilern liefern bei niedrigen  $f/\#$  für alle untersuchten Beleuchtungsprofile einen höheren Kontrast als ein System mit MacNeille-Polarisationsstrahlteiler.
2. Systeme mit Cartesischen Polarisationsstrahlteilern liefern für alle gemessenen Farbbänder einen höheren Kontrast als ähnliche Systeme mit MacNeille-Polarisationsstrahlteilern. Es wird erwartet, daß der höhere Kontrast auch in Systemen mit Köhler-Beleuchtung und kritischer Beleuchtung vorhanden ist. Ein so hoher Kontrast gestattet dem Konstrukteur des Beleuchtungssystems eine Optimierung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung und des Durchflusses unter weniger Zwangsbedingungen, die durch Kontrastüberlegungen für den Polarisationsstrahlteiler auferlegt werden.

[0156] Gemäß theoretischen Betrachtungen zur Untermauerung dieser Arbeit sind die für den getesteten Cartesischen Polarisationsstrahlteiler erzielten allgemeinen Ergebnisse unter Umständen auf jeden Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler anwendbar. Alternative Ausführungsformen können andere geeignete Cartesische Polarisationsstrahlteiler aufweisen, wie z. B. Drahtgitterpolarisatoren.

[0157] Ohne sich durch theoretische Betrachtungen festlegen zu wollen, ist festgestellt worden, daß ein akzeptierbarer Kontrast bei Winkeln, die merklich vom senkrechten Einfall abweichen, für FLC-D-Bildwandler leichter erzielbar ist als für verdreht nematische Bildwandler (TN-Bildwandler). Dementsprechend bieten FLC-D-Bildwandler bei sehr kleinen  $f/\#$  gegenüber TN-Bildwandlern einen besseren Kontrast und verbessern dadurch den möglichen Wirkungsgrad der Lichtausnutzung für FLC-D- gegenüber TN-Bildwandlern, wenn sie in Verbindung mit einem Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler eingesetzt werden. Die Kombination von Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteilern und FLC-D-Bildwandlern ermöglicht die Verwendung von "schnellen" optischen Strahlen beispielsweise in sequentiellen Farbsystemen, wo das Farbzerlegungsprisma die  $f/\#$  nicht begrenzt. Bei dieser oder irgendeiner anderen Systemart, welche die Verwendung von  $f/\#$  unter 2 zuläßt, ermöglicht der Kontrastvorteil des FLC-D bei "schnellen" optischen Strahlen einen Lichtdurchfluß mit höherem Wirkungsgrad.

[0158] Der Fachmann wird erkennen, daß die vorliegende Erfindung bei der Entwicklung optischer Projektionssysteme oder anderer Abbildungssysteme, die polarisiertes Licht verwenden, angewandt werden kann. Die vorliegende Erfindung ist zwar unter Bezugnahme auf typische bevorzugte Ausführungsformen beschrieben worden, aber die Erfindung kann in anderen konkreten Foren ausgeführt werden, ohne vom Grundgedanken der Erfindung abzuweichen. Dementsprechend versteht es sich, daß die hierin beschriebenen und dargestellten Ausführungsformen nur als Beispiele angegeben werden und nicht als Einschränkung des Umfangs der Erfindung aufzufassen sind. Weitere Abwandlungen und Modifikationen können in Übereinstimmung mit dem Umfang der vorliegenden Erfindung vorgenommen werden.

### Patentansprüche

1. Optisches Abbildungssystem (**10**), das aufweist: mindestens ein reflektierendes Lichtventil (**26**); eine Lichtventilbeleuchtungsoptik (**15**), die einen Beleuchtungslichtstrahl erzeugt, der mit einer  $f/\#$  von 2,5 oder weniger auf das mindestens eine reflektierende Lichtventil auffällt; und einen zwischen dem mindestens einen reflektierenden Lichtventil und der Lichtventilbeleuchtungsoptik angeordneten Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler (**50**), wobei der Strahlteiler eine strukturelle Orientierung aufweist, die feste Polarisationsachsen definiert, und einfallendes Licht in einen ersten und einen zweiten weitgehend polarisierten Strahl mit auf das feste Koordinatensystem bezogenen Polarisationszuständen aufspaltet, so daß der Beleuchtungsstrahl in einem ersten Polarisationszustand durch den Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler zu dem mindestens einen reflektierenden Lichtventil hindurchtritt; wobei das an dem mindestens einen reflektierenden Lichtventil reflektierte Abbildungslicht in einem zum ersten Polarisationszustand orthogonalen zweiten Polarisationszustand durch den Cartesischen Weitwinkel-Polarisationsstrahlteiler hindurchtritt und in jedem projizierten Farbband im sichtbaren Spektralbereich ein Kontrastverhältnis von mindestens 100 zu 1 aufweist.

2. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei das System einen minimalen Eintrittskegelwinkel von etwa 12 Grad aufweist.

3. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei das Kontrastverhältnis größer als 150 zu 1 ist.

4. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei die Lichtventilbeleuchtungsoptik eine  $f/\#$  von

höchstens 2,0 aufweist.

5. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 4, wobei das Kontrastverhältnis größer als 150 zu 1 ist.
6. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei das Lichtventil ein polarisationsmodulierendes Lichtventil ist.
7. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei das reflektierende Lichtventil ein smektisches Flüssigkristall-Lichtventil ist.
8. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei das reflektierende Lichtventil ein nematisches Flüssigkristall-Lichtventil ist.
9. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 7, wobei das reflektierende Lichtventil ein ferroelektrisches Flüssigkristalldisplay (FLCD) ist.
10. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, das ferner einen Viertelwellenkompensator aufweist, der optisch zwischen dem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler und dem reflektierenden Lichtventil angeordnet ist.
11. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, das ferner einen Vorpolarisator (**15a**) aufweist, wobei der Vorpolarisator Eingangslicht zu vorpolarisiertem Licht polarisiert, wobei das vorpolarisierte Licht das auf den Polarisationsstrahlteiler auffallende Licht aufweist.
12. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, das ferner ein Farbzerlegungs- und -rekombinationsprisma (36) und mehrere reflektierende Lichtventile aufweist, wobei das Prisma das polarisierte Licht vom Polarisationsstrahlteiler empfängt, das polarisierte Licht in Farben zerlegt und polarisierte Farblichtstrahlen zu jedem Lichtventil lenkt.
13. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei das reflektierende Lichtventil zumindest einen Teil des ersten polarisierten Strahls zu dem Cartesischen Polarisationsstrahlteiler zurück reflektiert.
14. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der erste polarisierte Strahl einen Mittelstrahl aufweist, und der Bildwandler eine Reflexionsfläche aufweist, die eine Reflexionsebene definiert, wobei der Mittelstrahl senkrecht zur Reflexionsebene ist.
15. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der Cartesische Polarisationsstrahlteiler eine mehrschichtige doppelbrechende Folie aufweist.
16. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der Polarisationsstrahlteiler eine mehrschichtige Folie aufweist.
17. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der Polarisationsstrahlteiler einen Drahtgitterpolarisator aufweist.
18. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei die Beleuchtungsoptik eine  $f/\#$  kleiner oder gleich 1,8 aufweist.
19. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der Cartesische Polarisationsstrahlteiler eine Drehachse und eine Materialachse aufweist, in deren Richtung das reflektierte Licht im wesentlichen polarisiert ist, wobei die Drehachse parallel zur Materialachse orientiert ist.
20. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der Cartesische Polarisationsstrahlteiler entlang mindestens einer Achse gekrümmt ist.
21. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, wobei der Cartesische Polarisationsstrahlteiler bezüglich eines Mittelstrahls um  $40^\circ$  bis  $50^\circ$  gedreht ist.
22. Optisches Abbildungssystem nach Anspruch 1, das ferner aufweist:
  - a) ein Farbzerlegungsprisma (**36**), das optisch so ausgerichtet ist, daß es die erste Polarisationskomponente



empfängt, wobei das Farbzerlegungsprisma die erste Polarisationskomponente in rote, grüne und blaue Strahlen zerlegt;

b) mindestens drei reflektierende Lichtventile (**26, 28, 30**), die optisch so ausgerichtet sind, daß sie den roten, grünen bzw. blauen Lichtstrahl empfangen, wobei an den mindestens drei reflektierenden Lichtventilen über den Cartesischen Polarisationsstrahlteiler reflektiertes Abbildungslicht einen Dynamikbereich von mindestens 150 zu 1 aufweist.

Es folgen 25 Blatt Zeichnungen

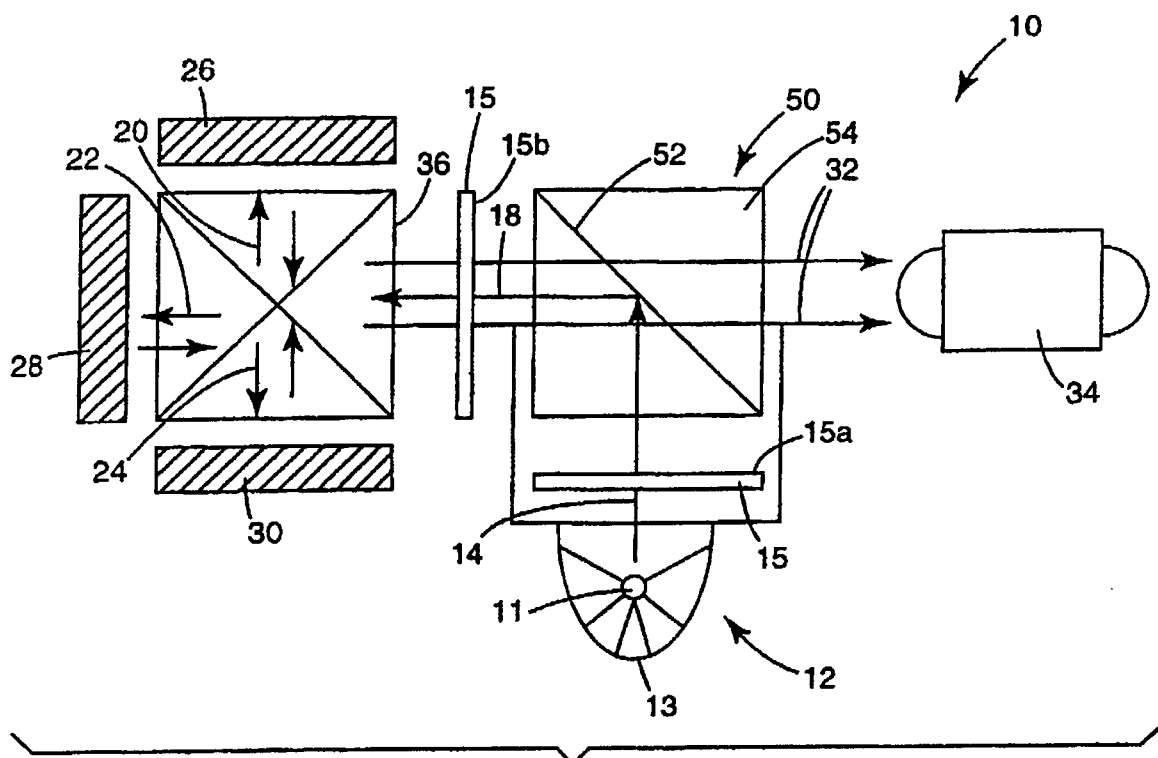


Fig. 1

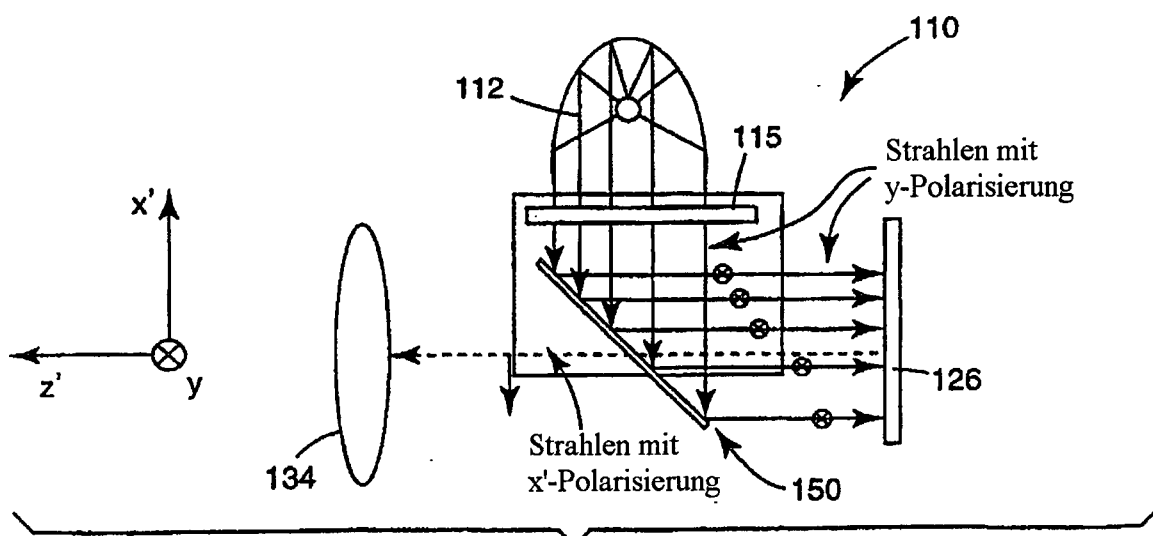


Fig. 2

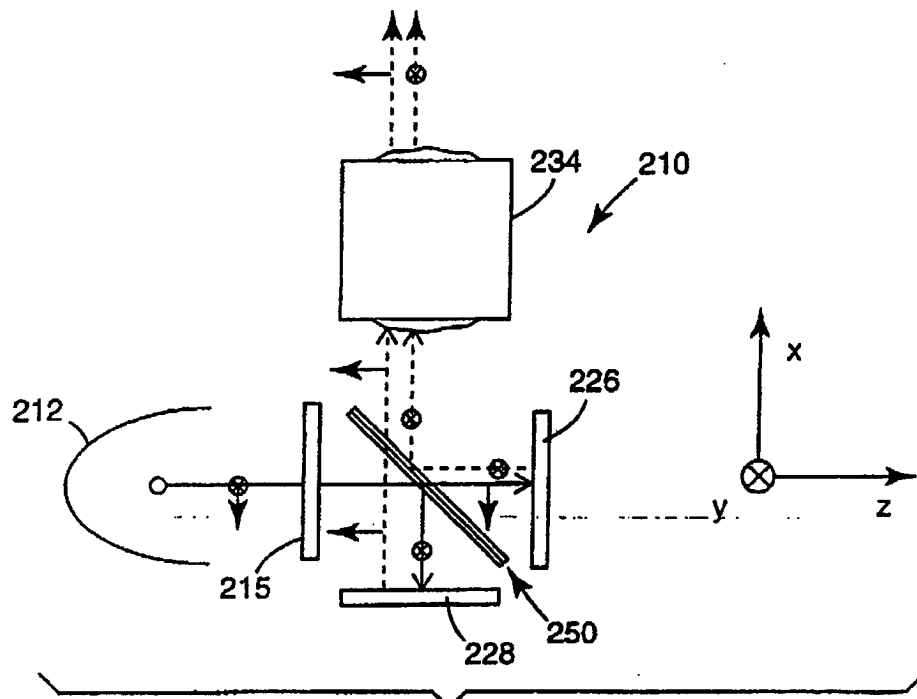


Fig. 3

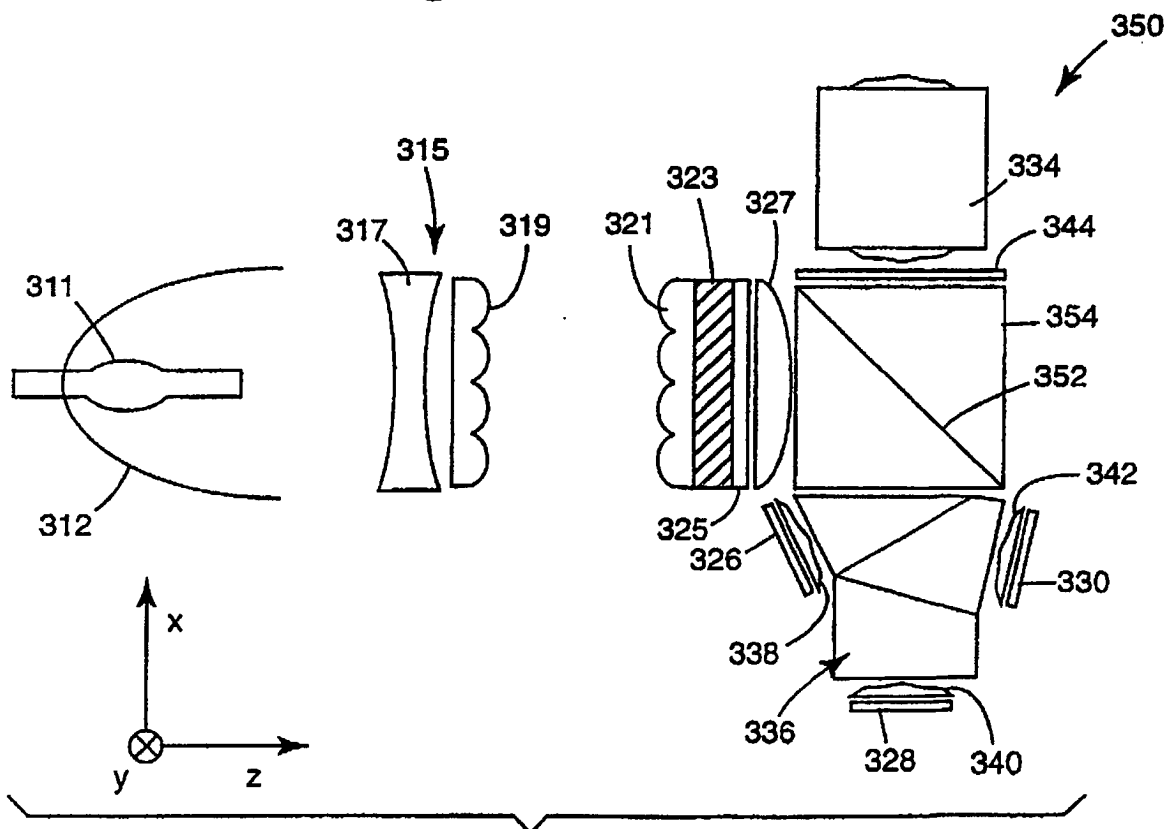


Fig. 4

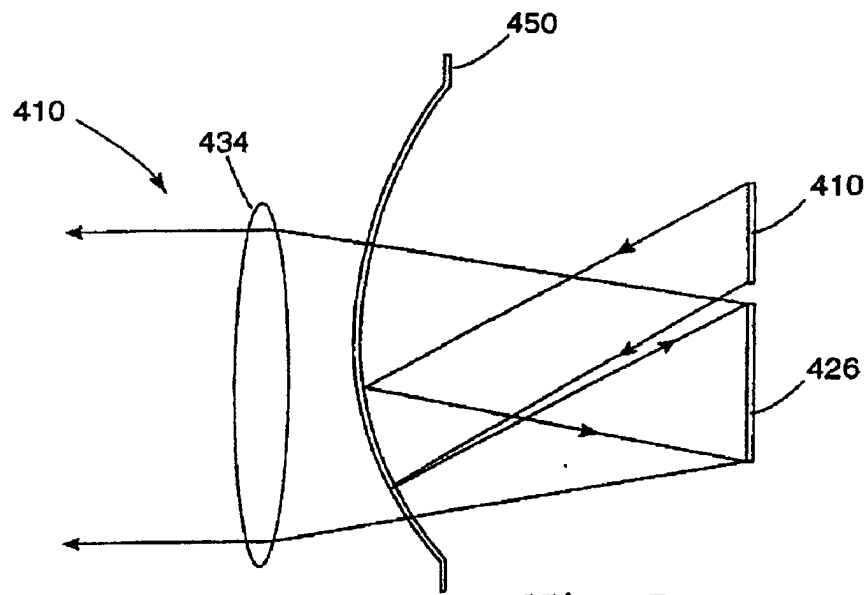


Fig. 5

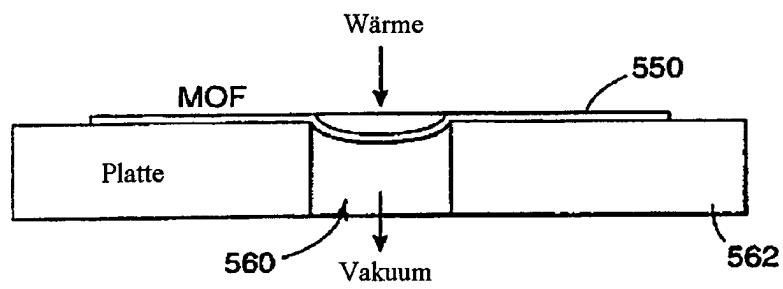


Fig. 6

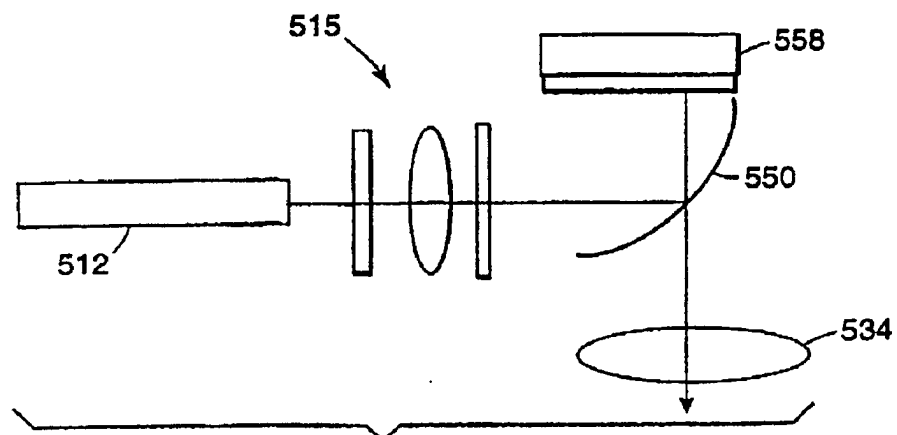


Fig. 7

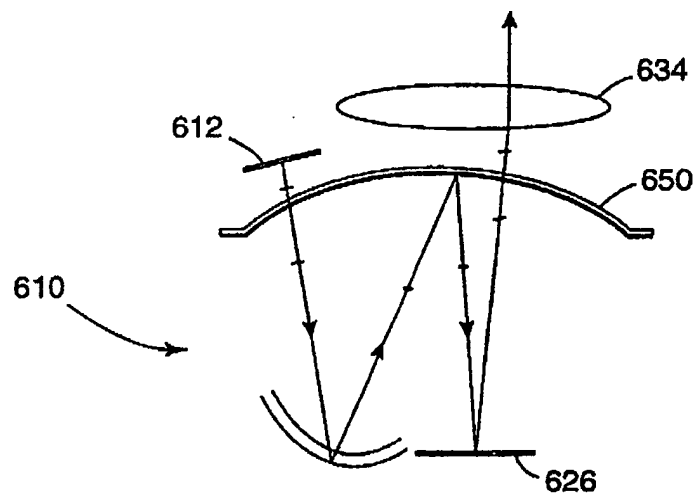


Fig. 8

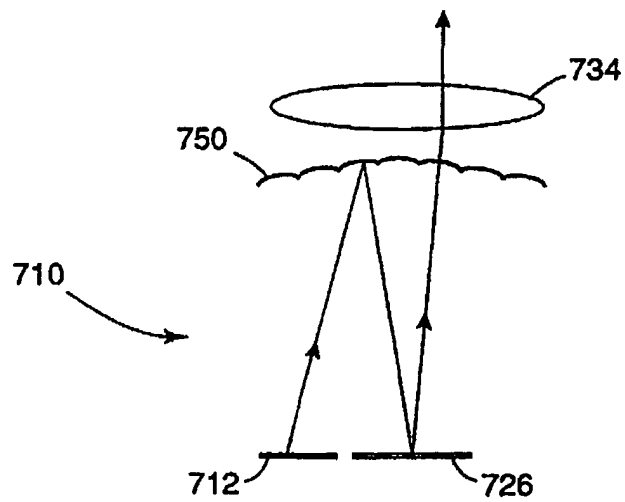


Fig. 9

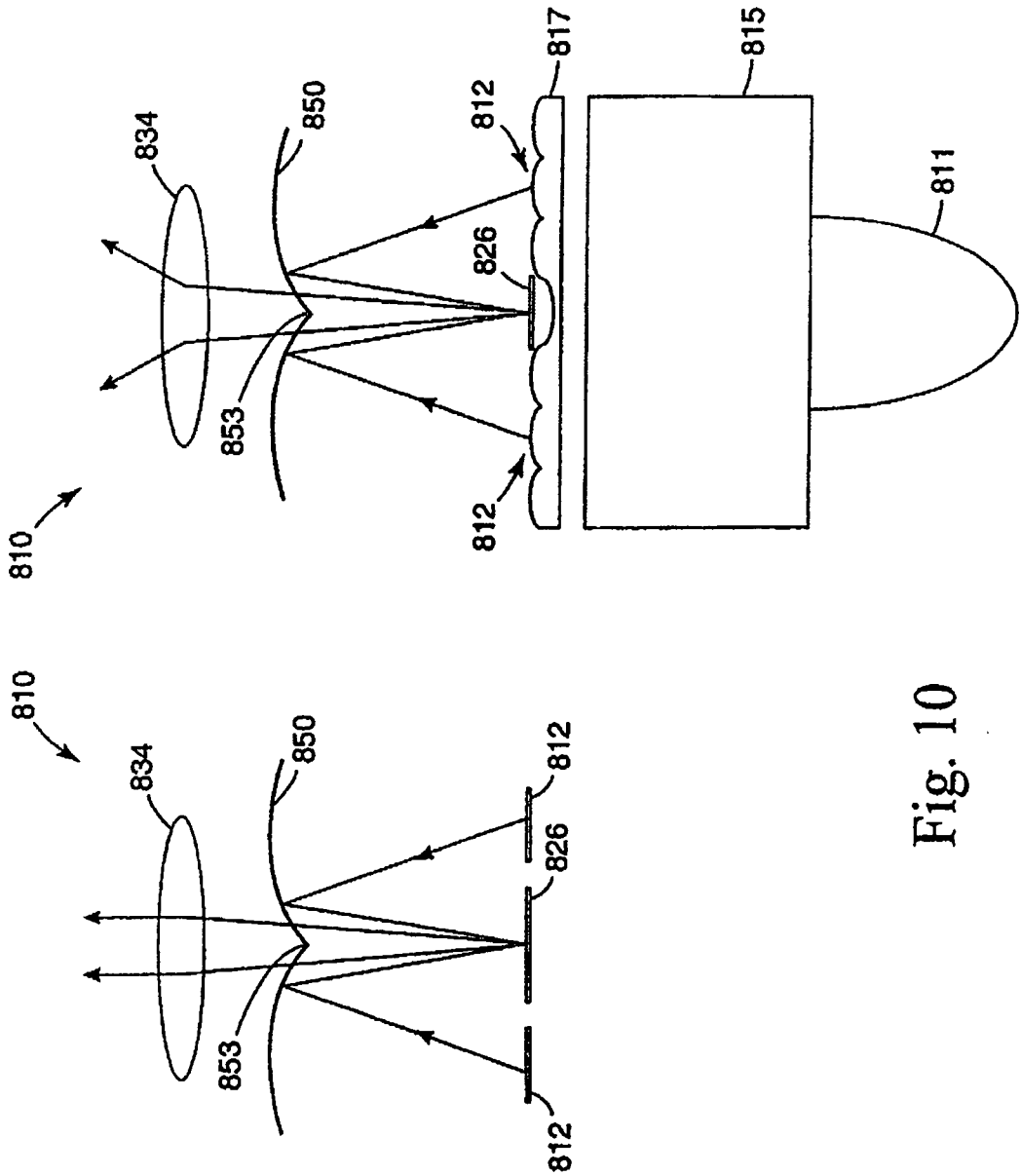
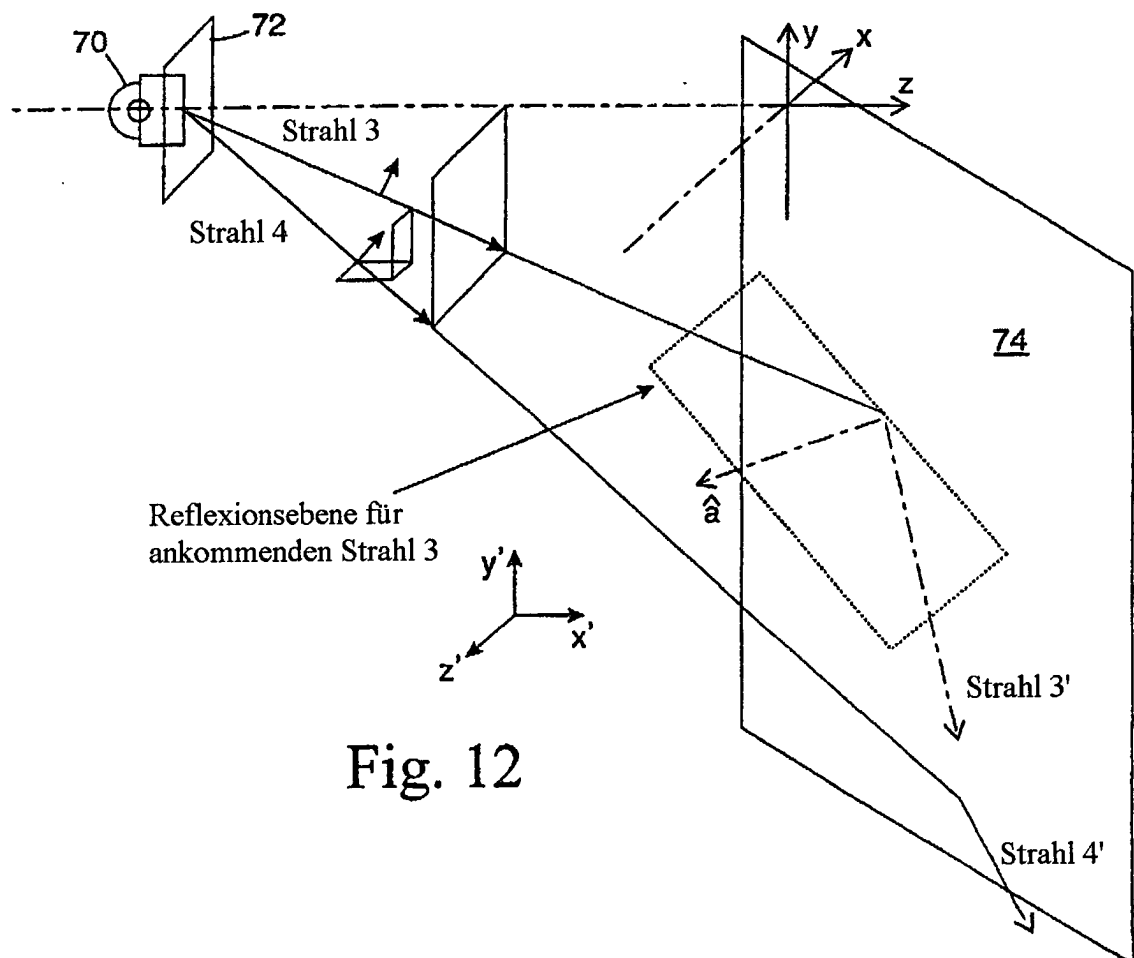
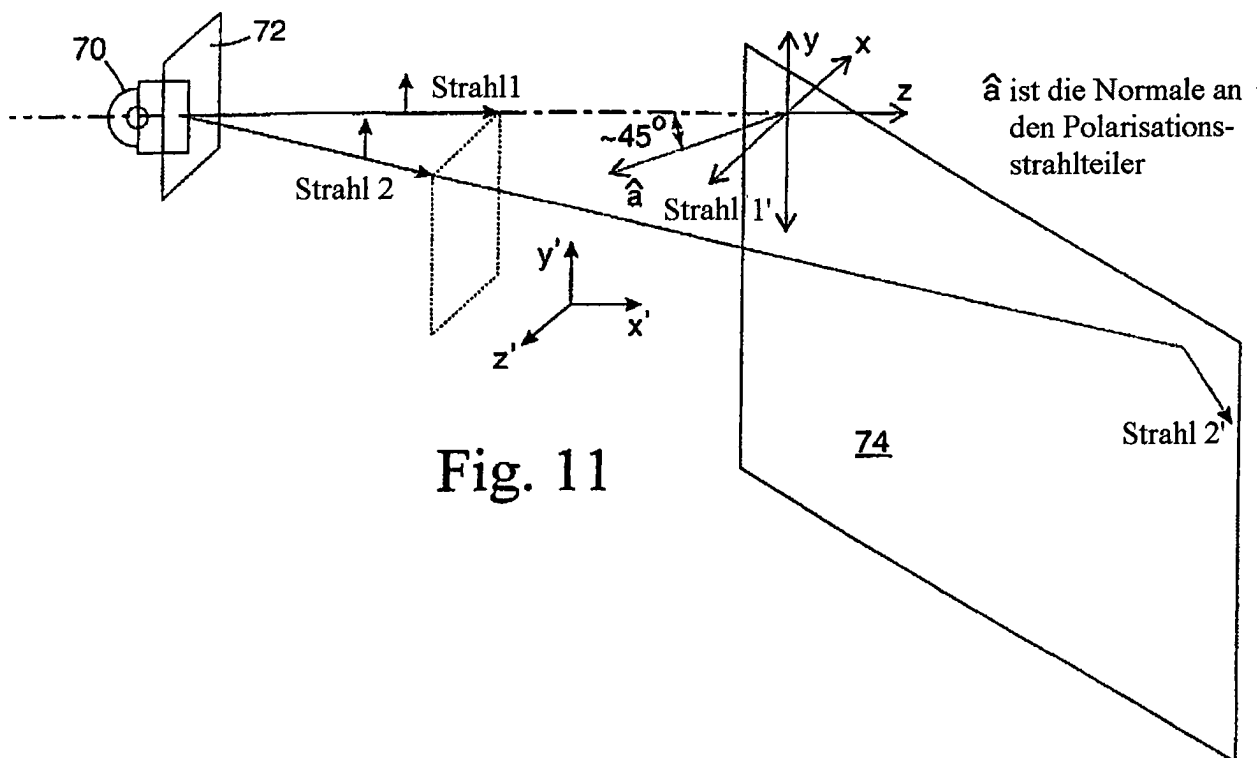


Fig. 10



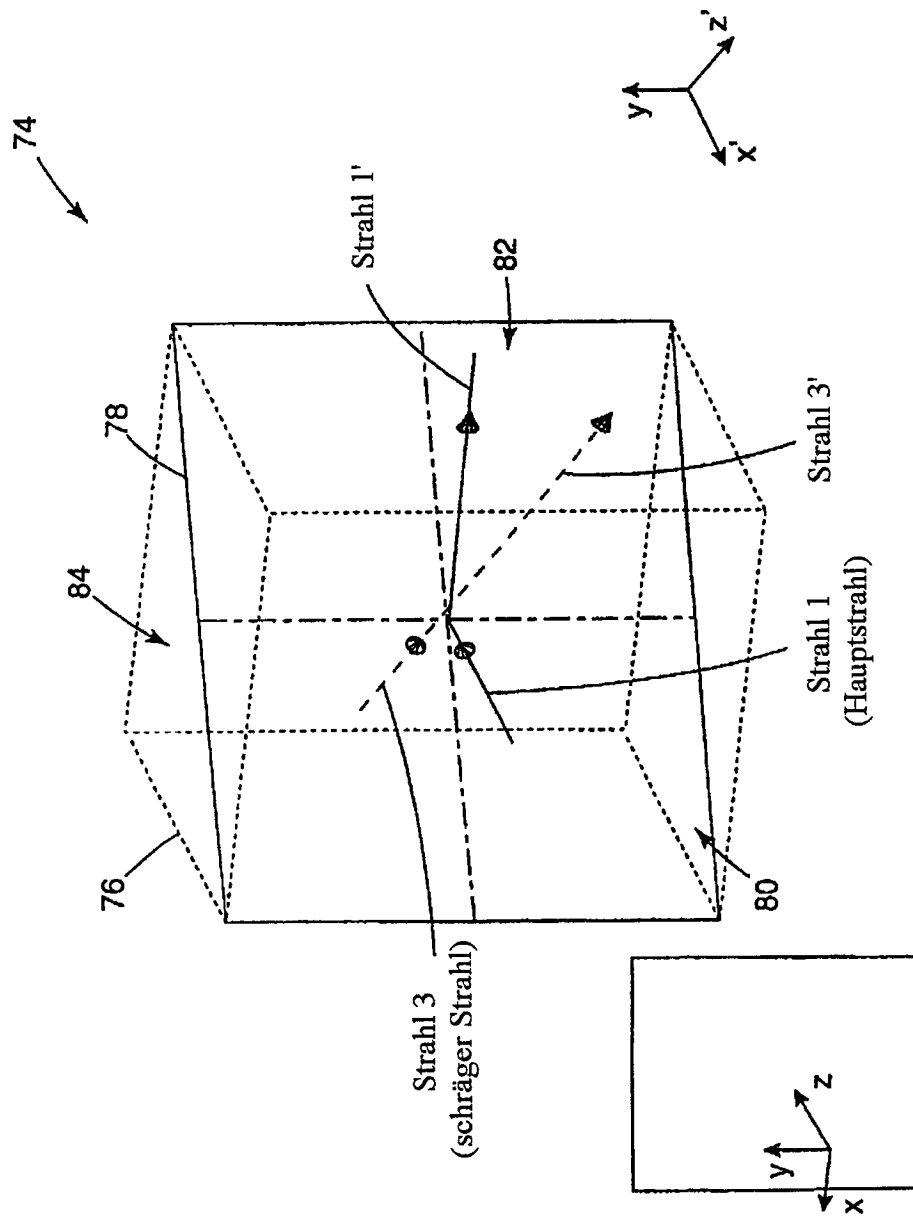


Fig. 13



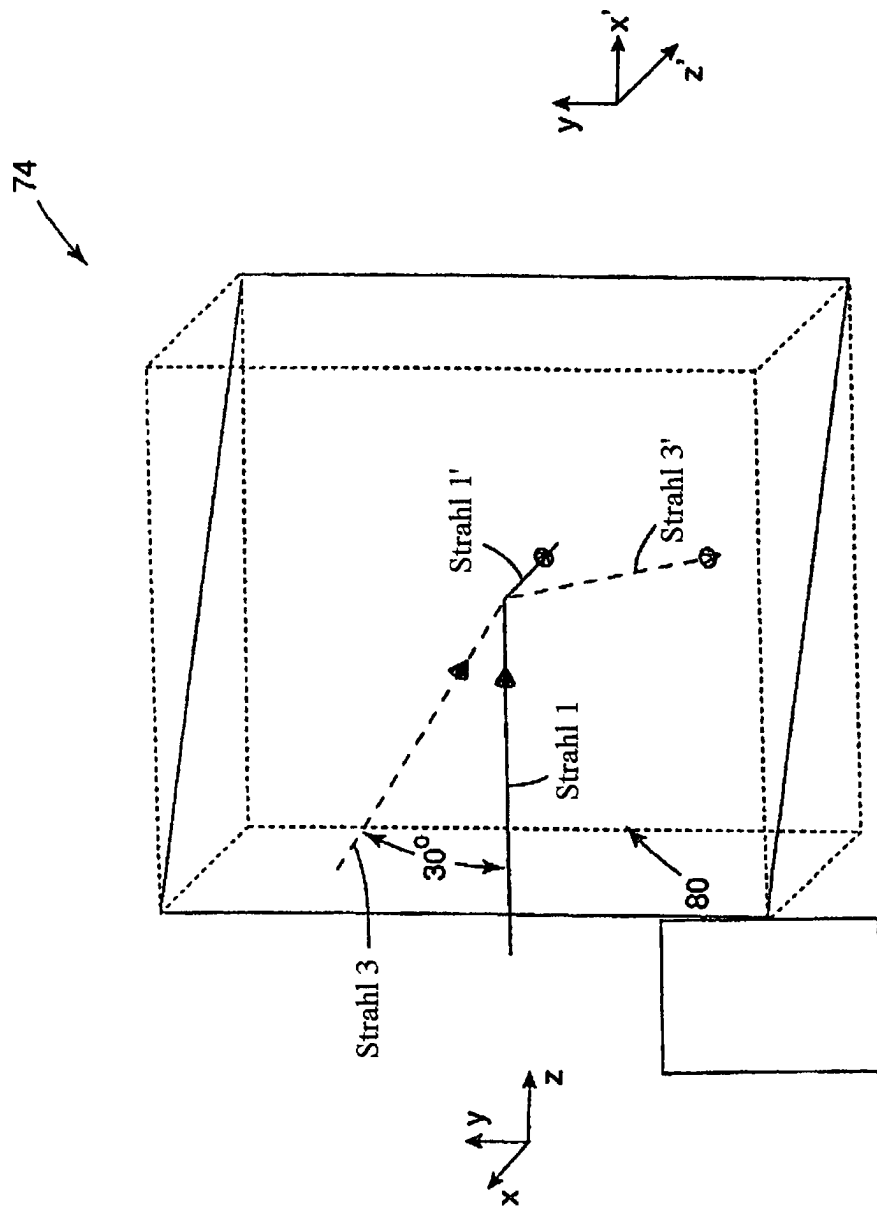
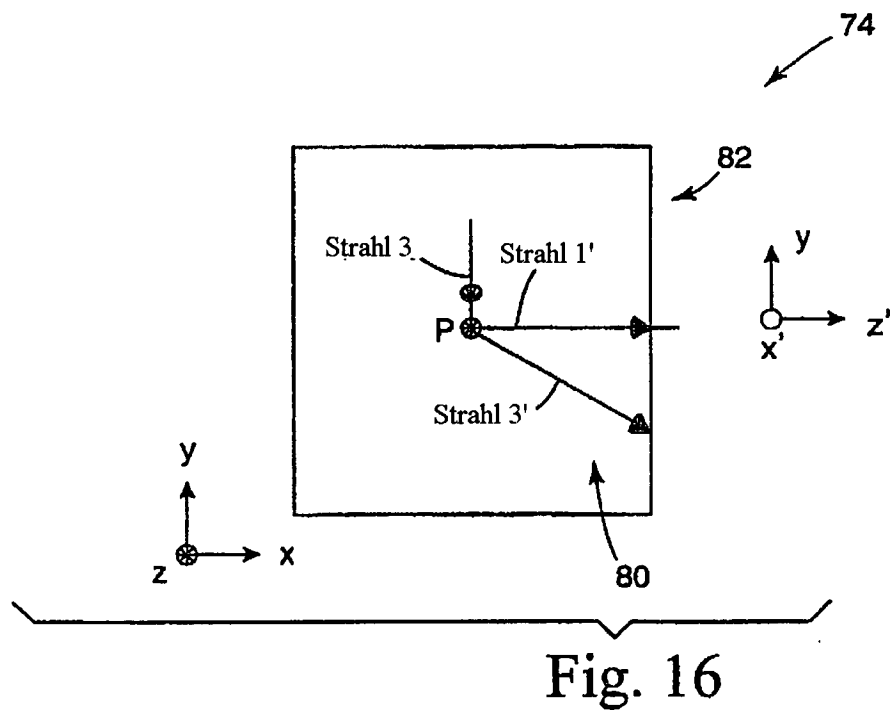
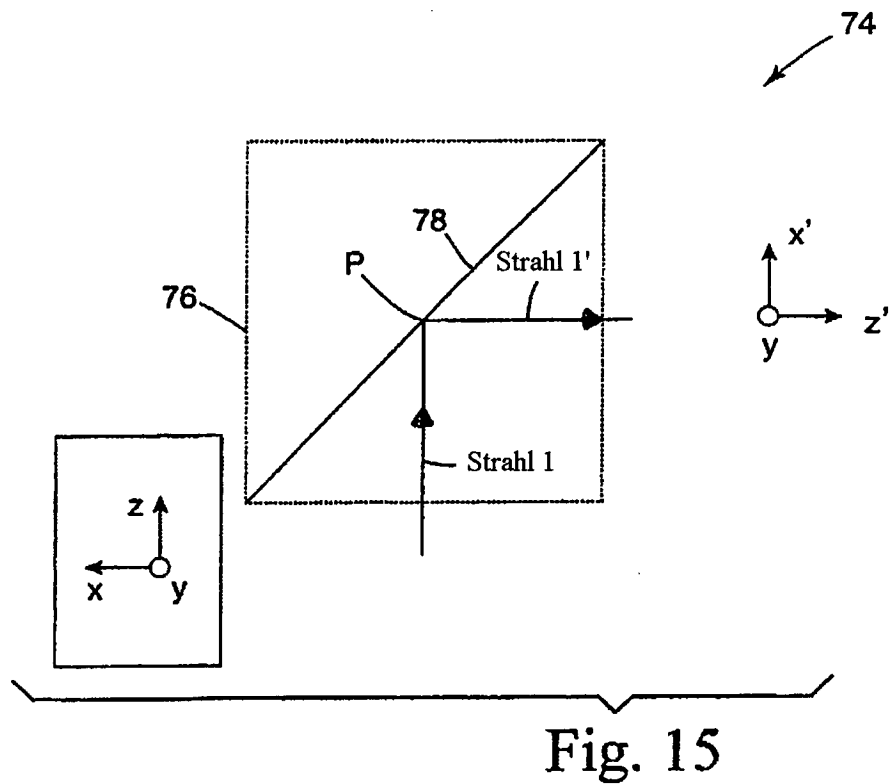


Fig. 14



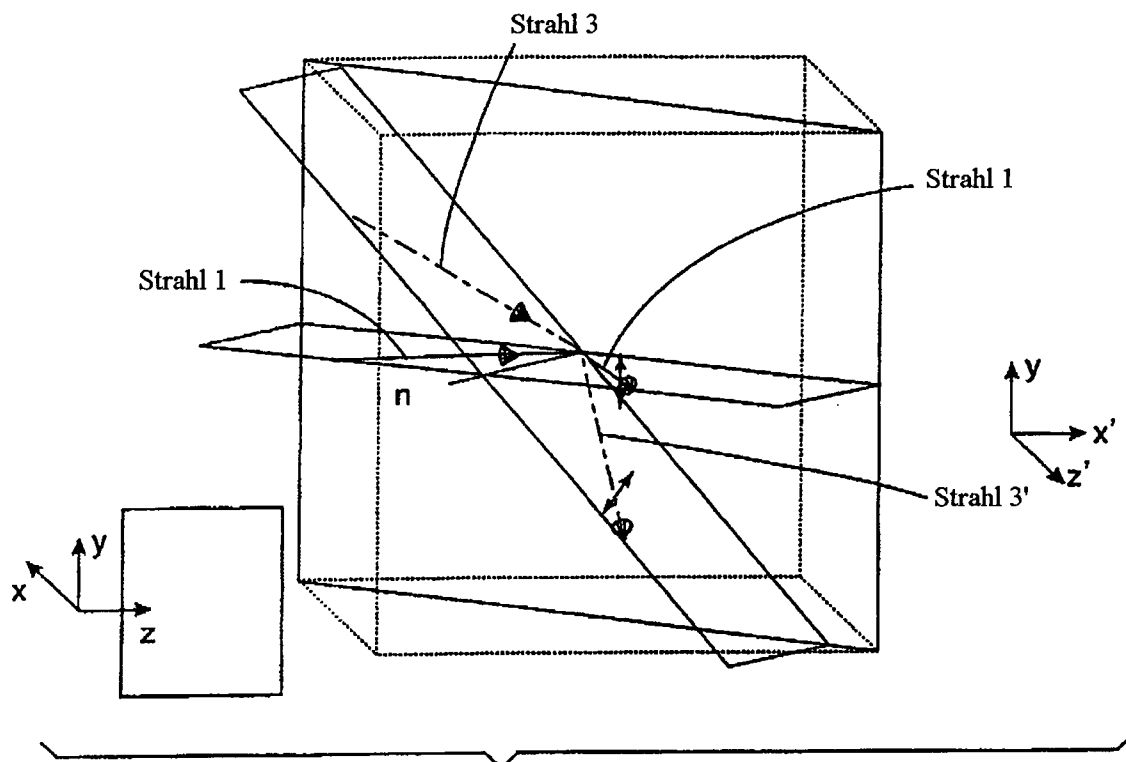


Fig. 17

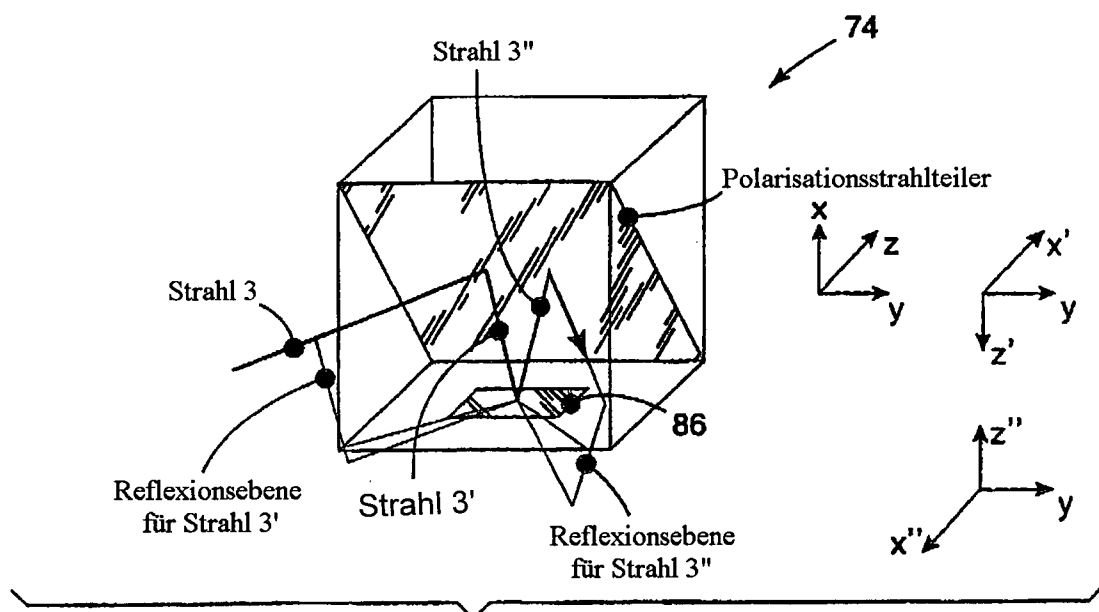


Fig. 18

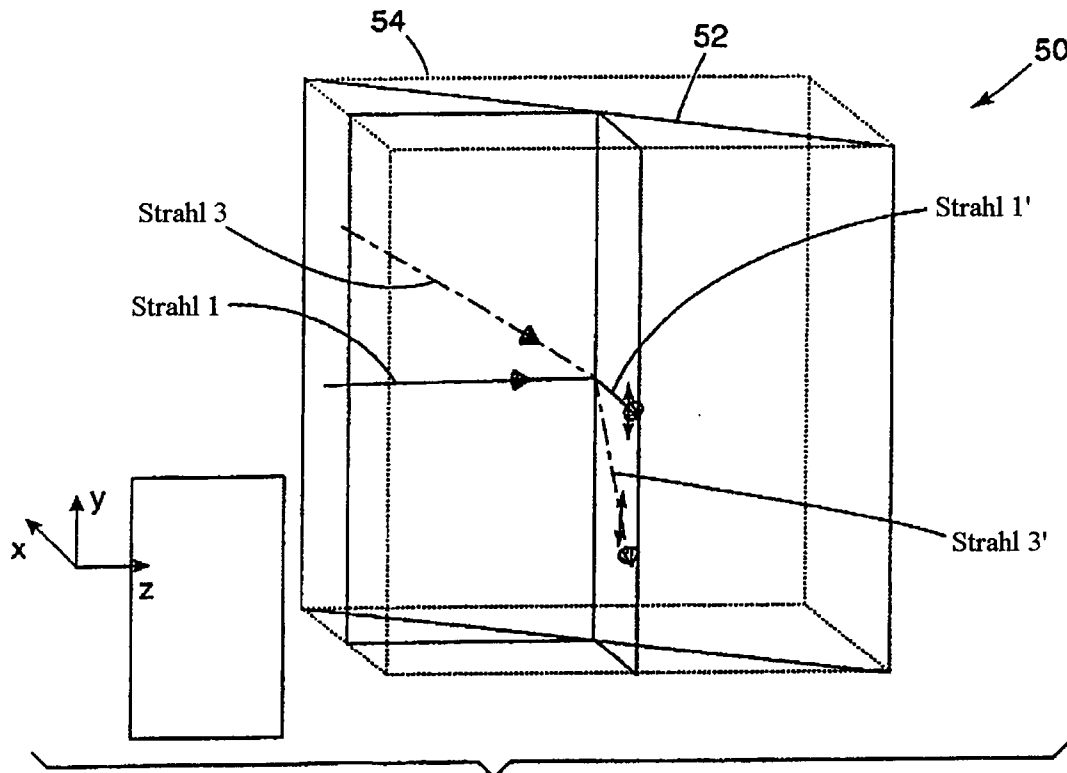


Fig. 19

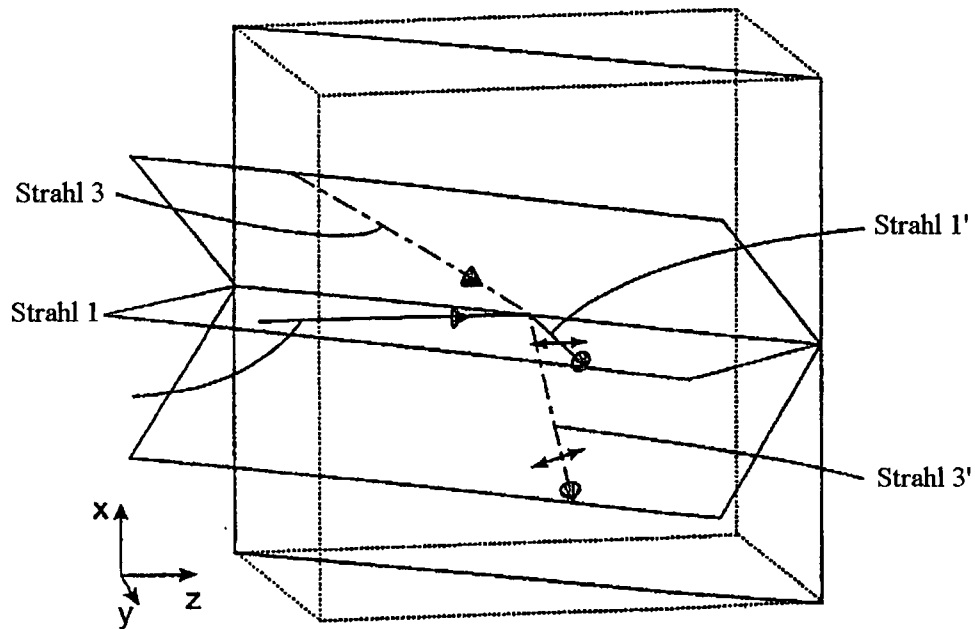


Fig. 20

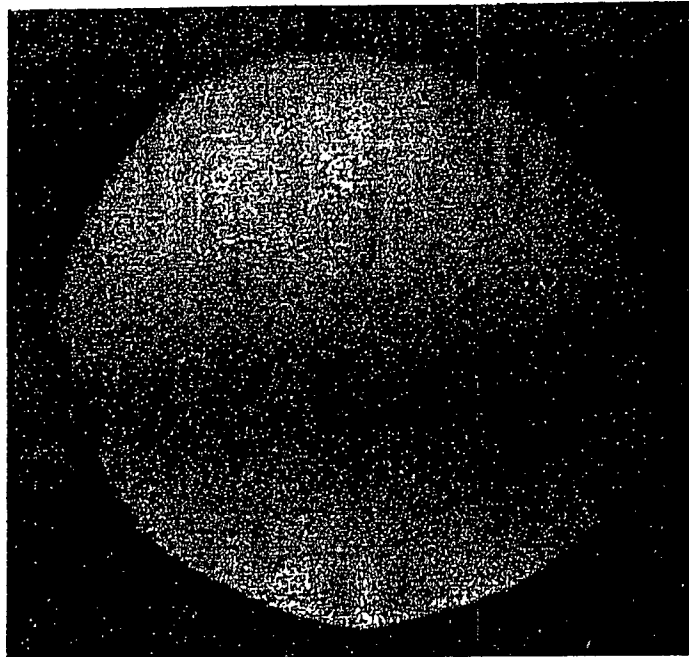


Fig. 21

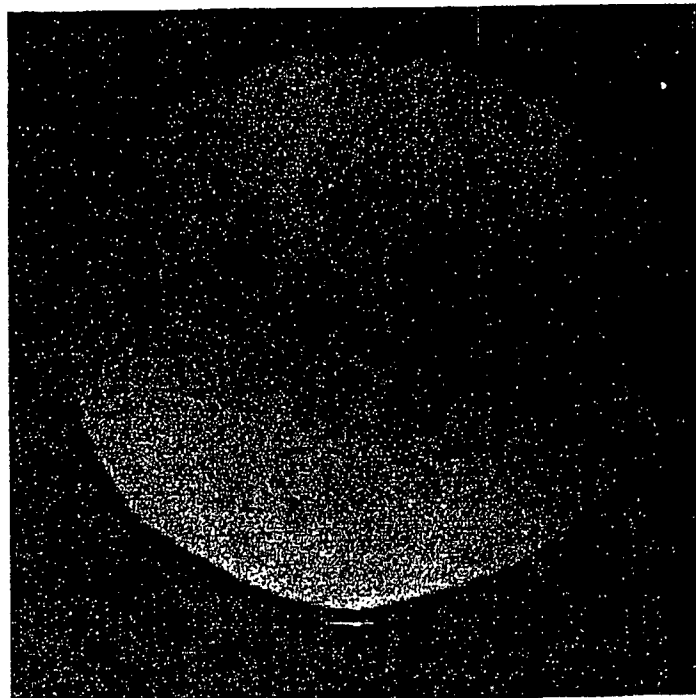


Fig. 22

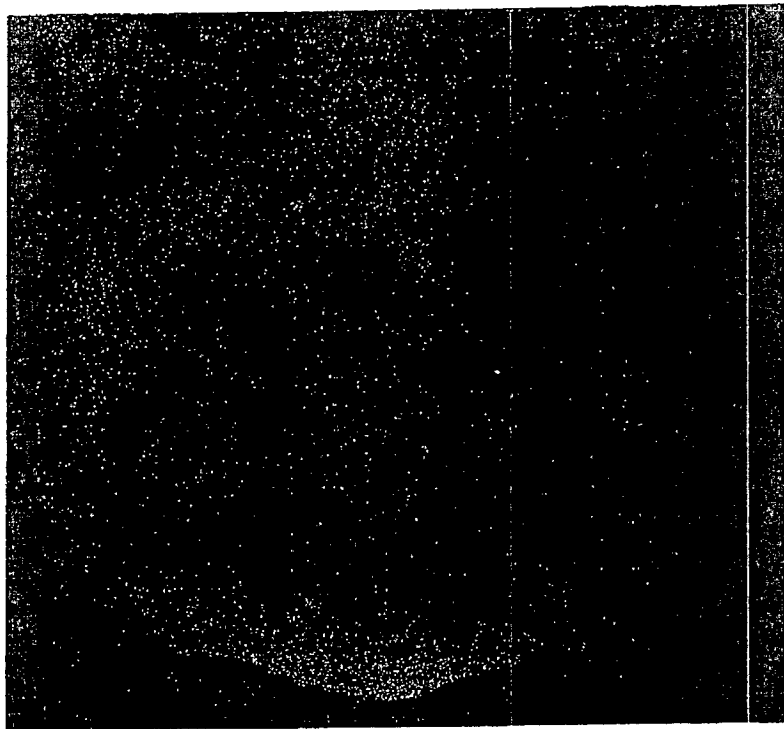


Fig. 23

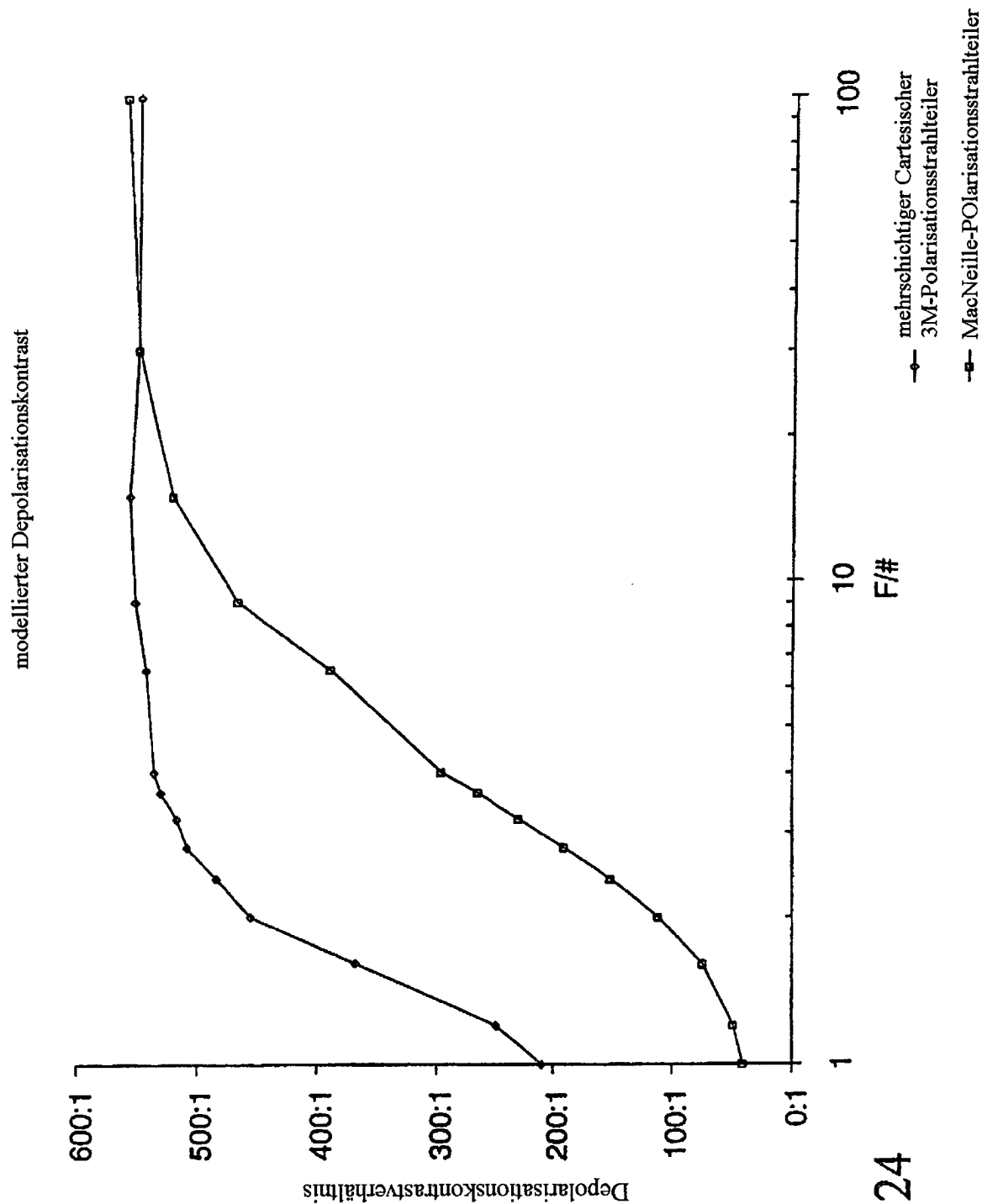


Fig. 24

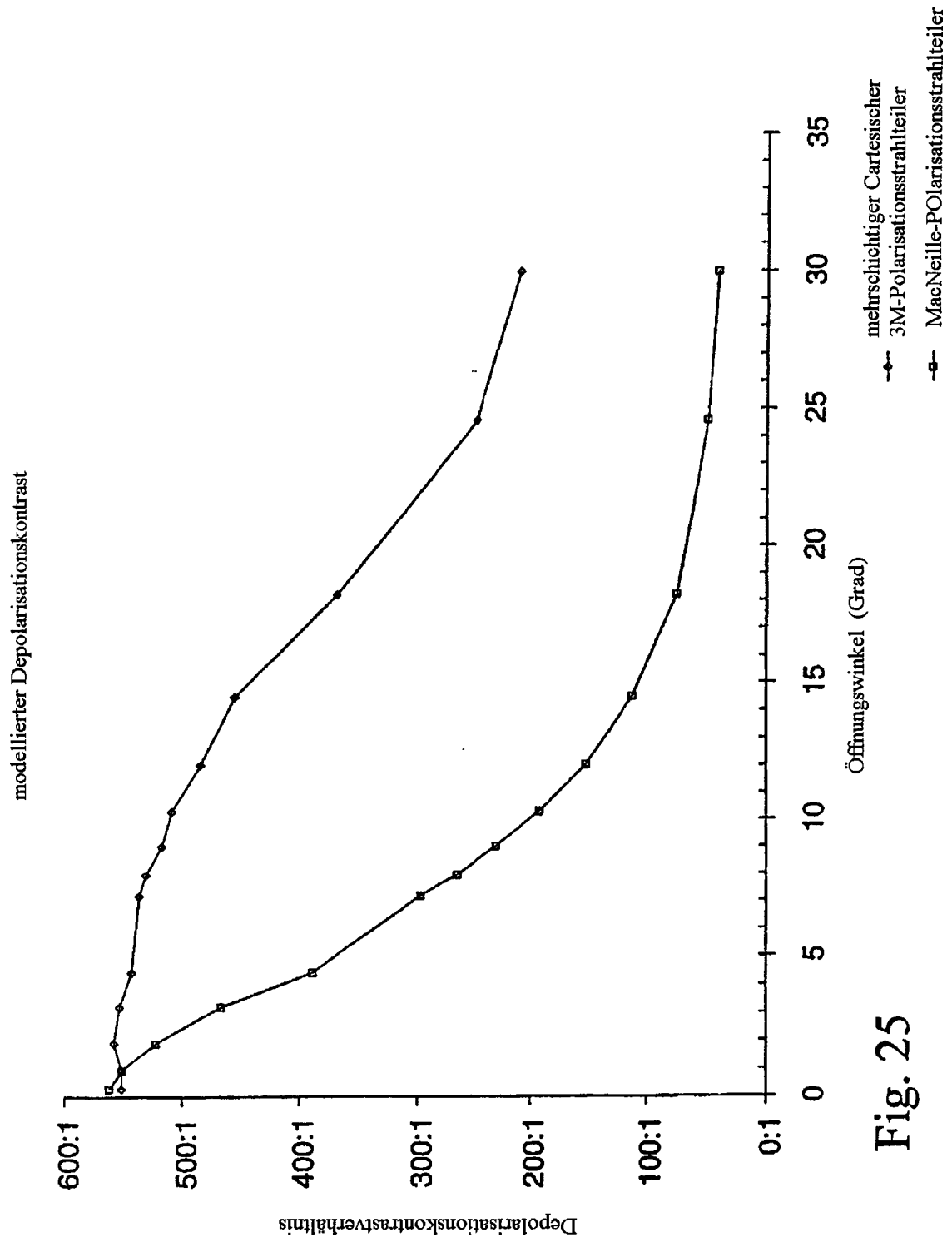


Fig. 25



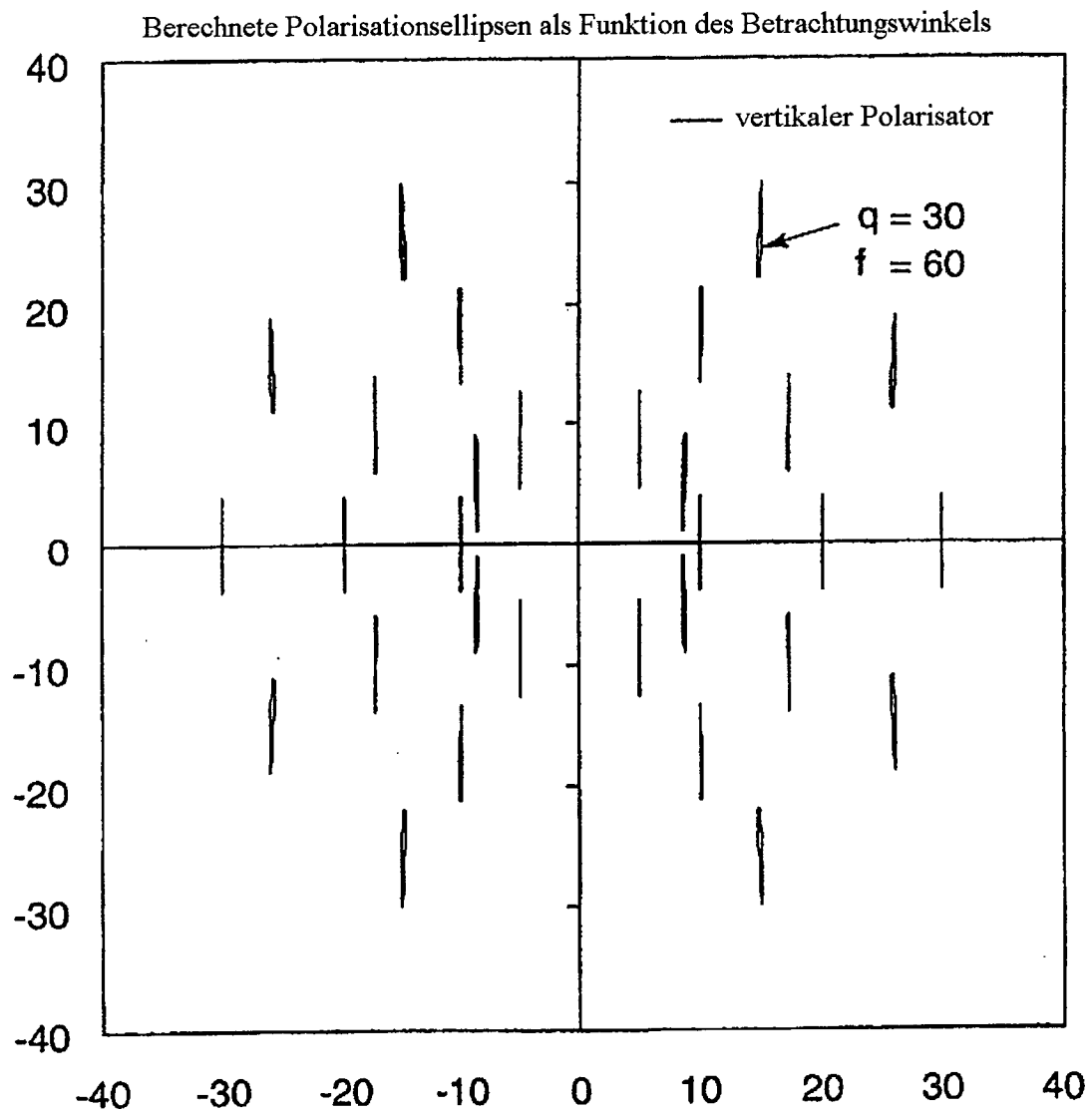


Fig. 26

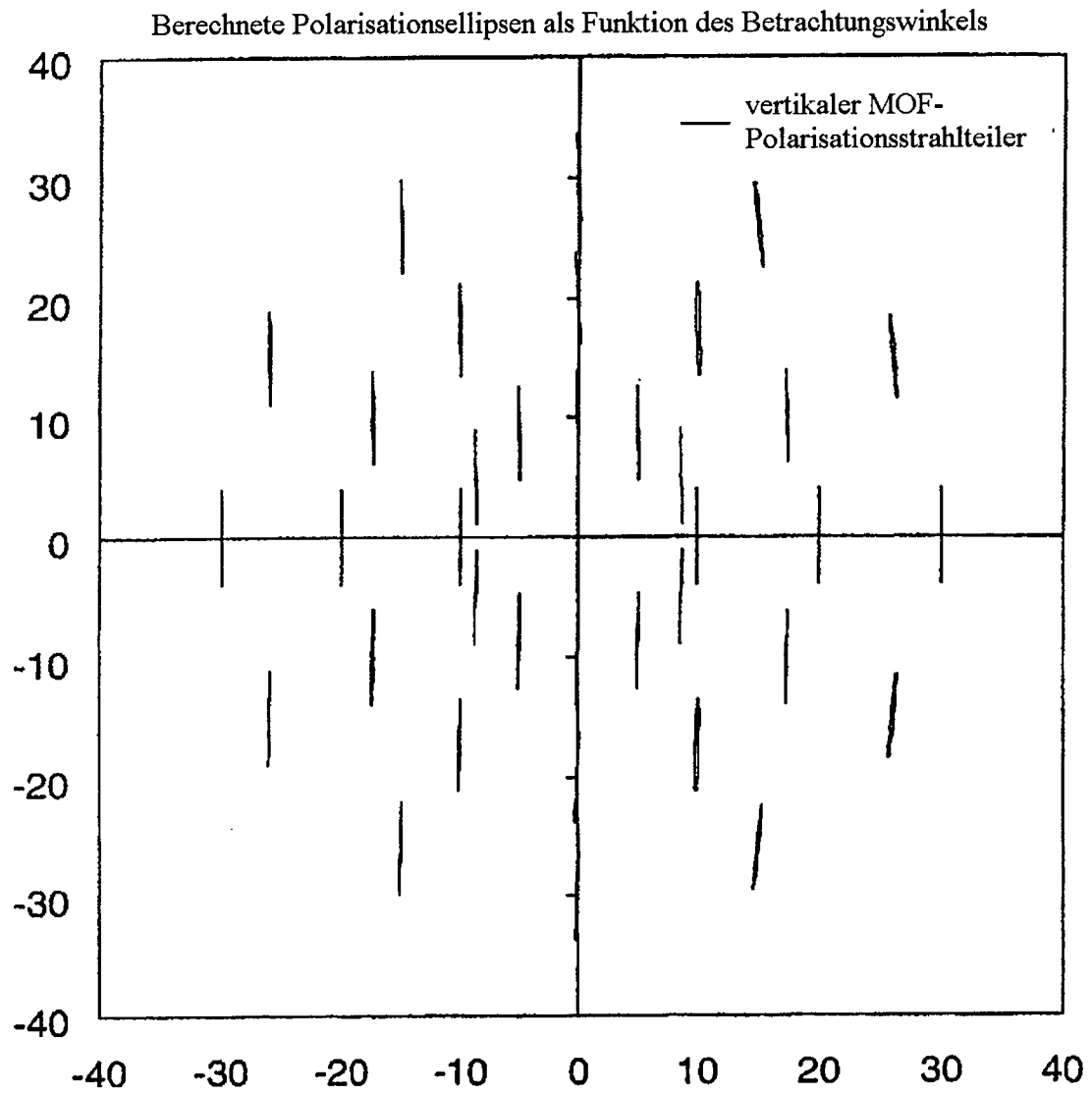


Fig. 27

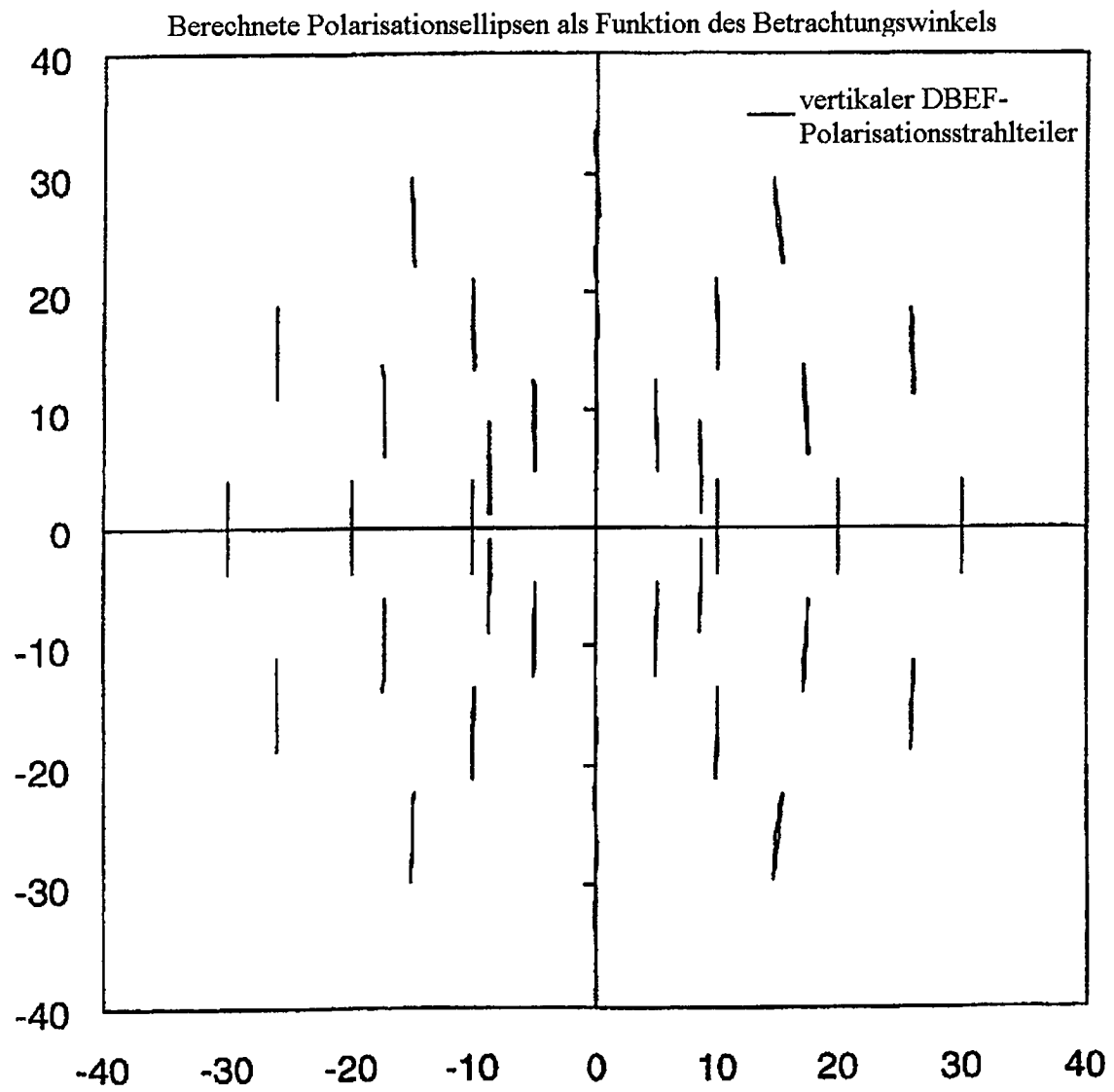


Fig. 28

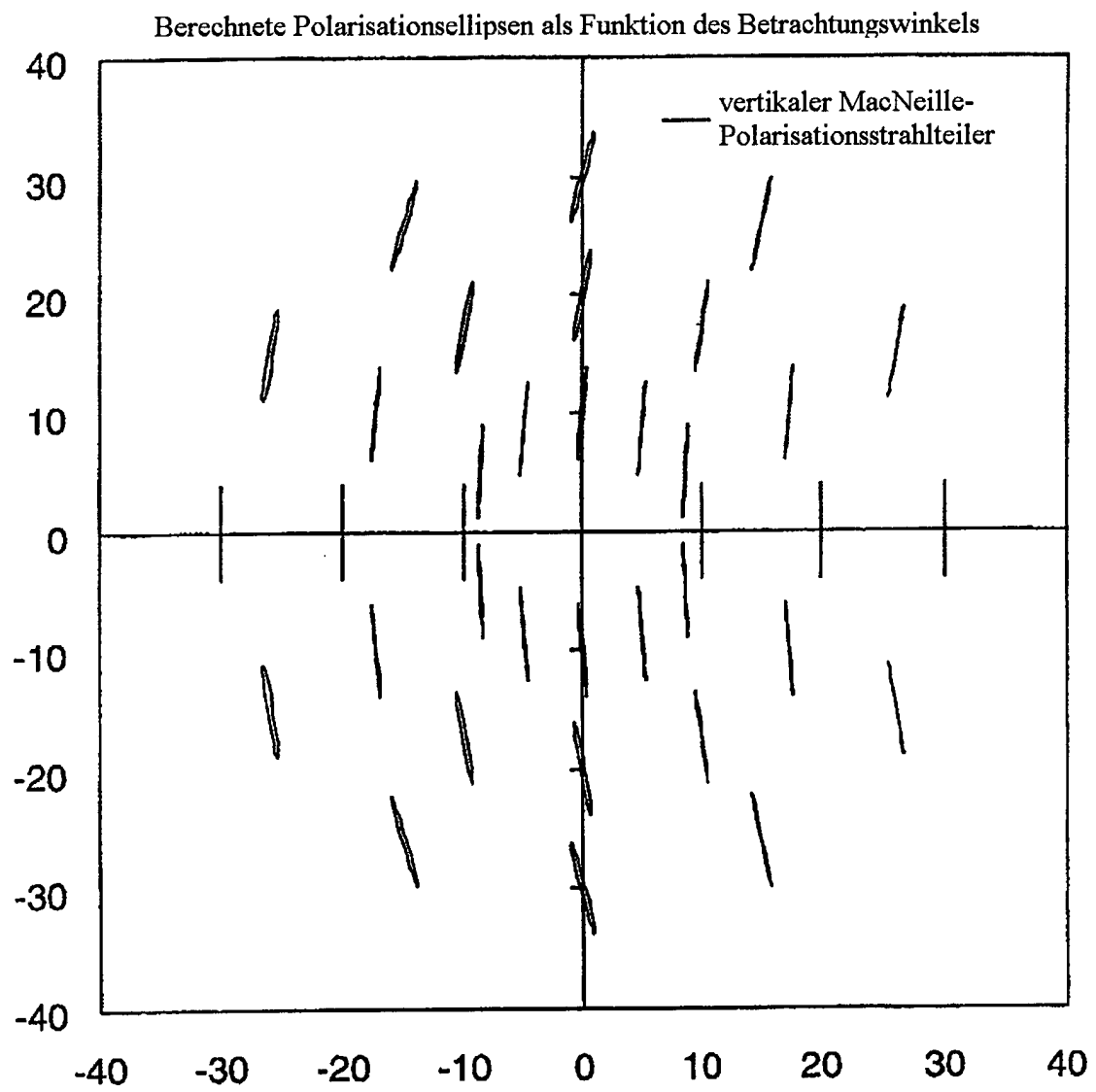


Fig. 29

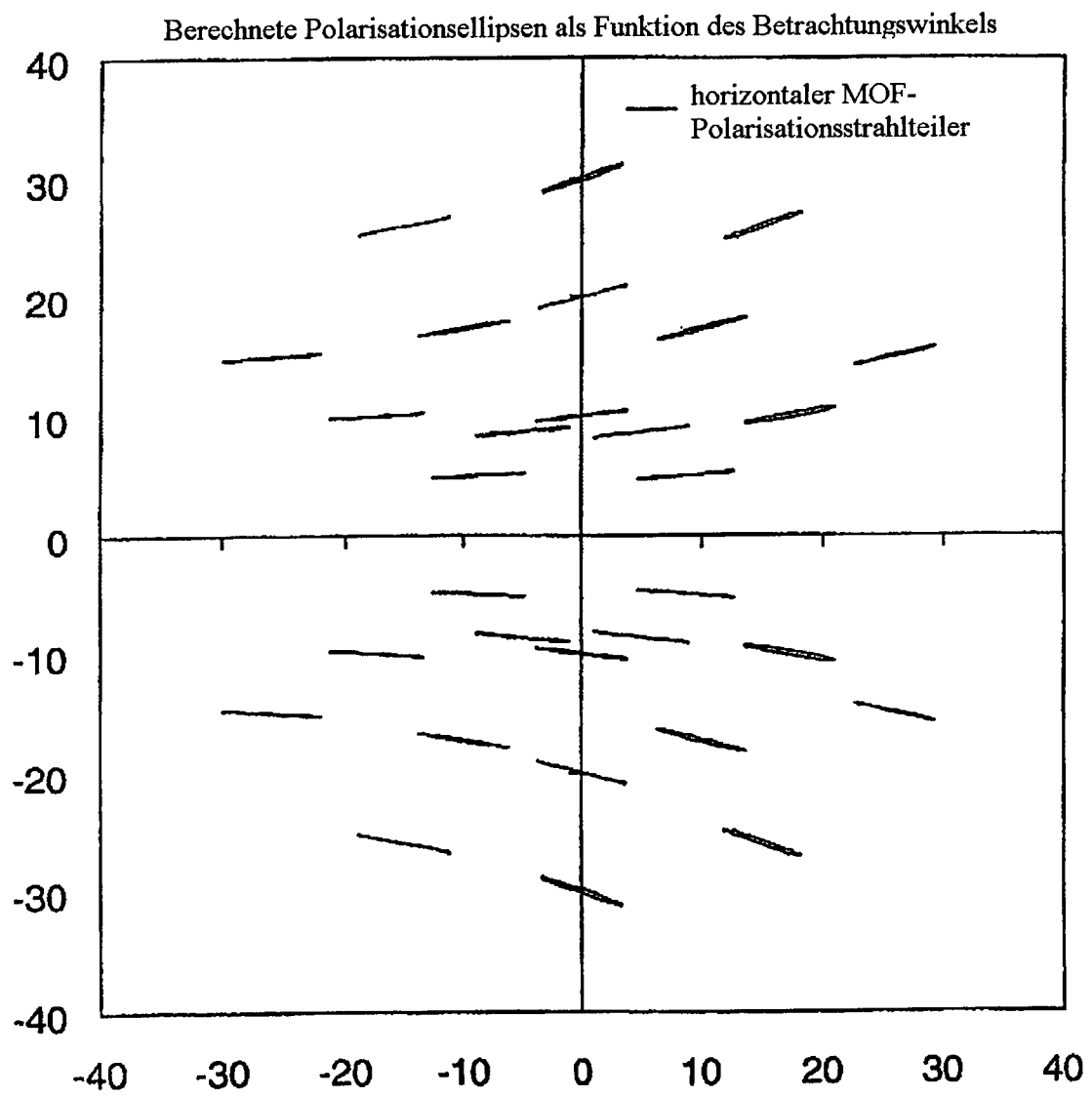


Fig. 30

Winkelkontrastverhältnis eines dichroitischen Polarisators

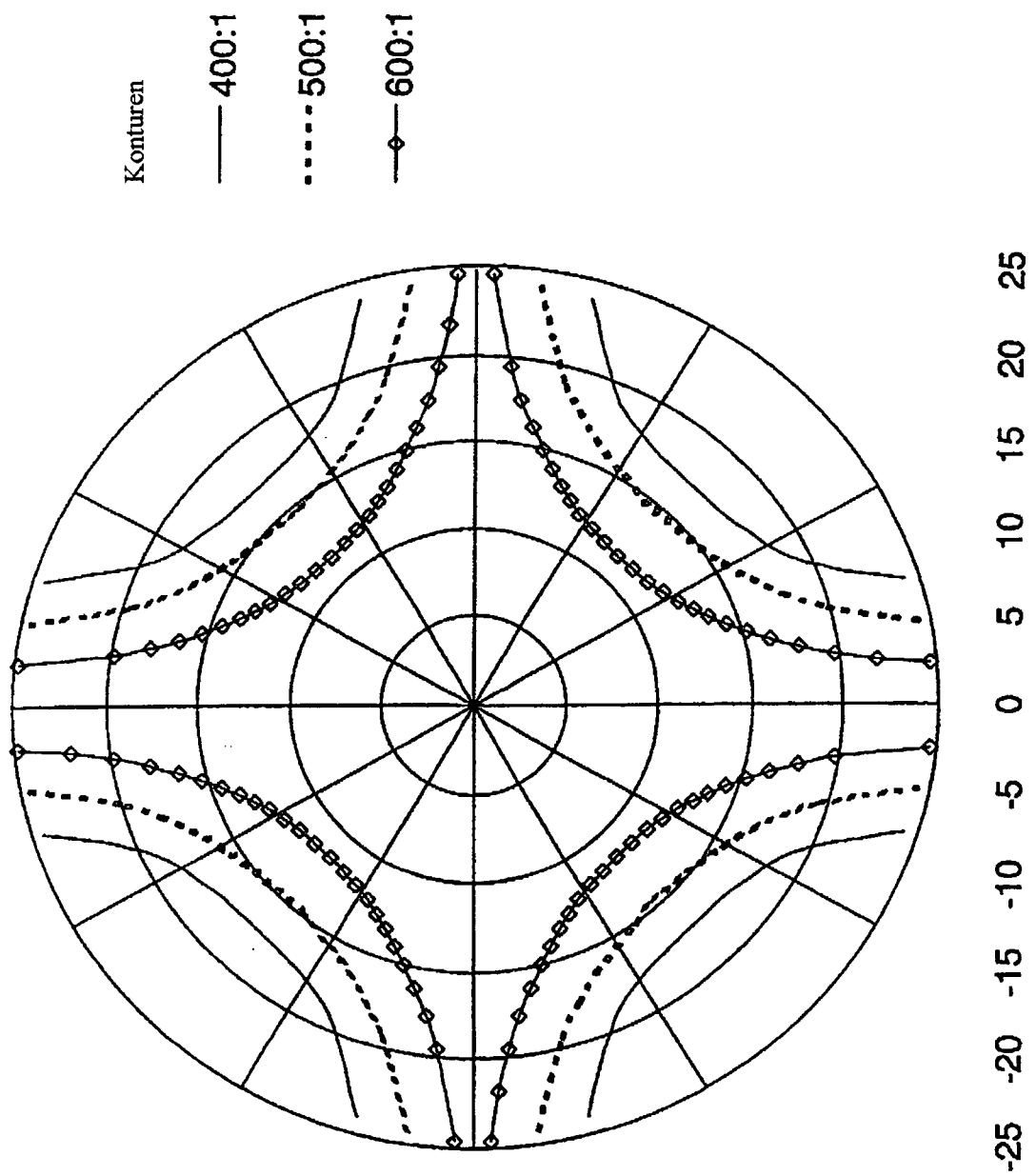


Fig. 31

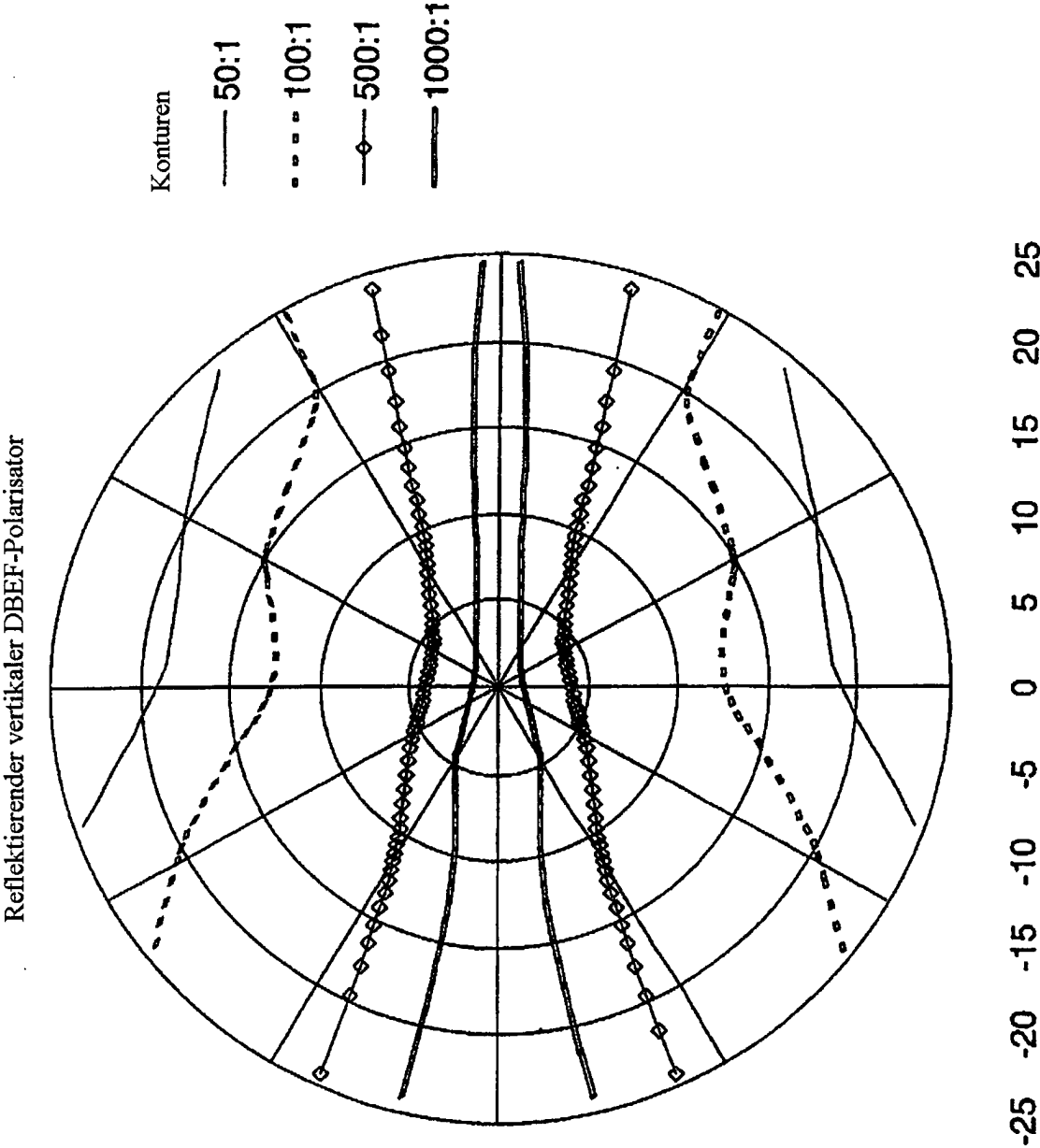


Fig. 32

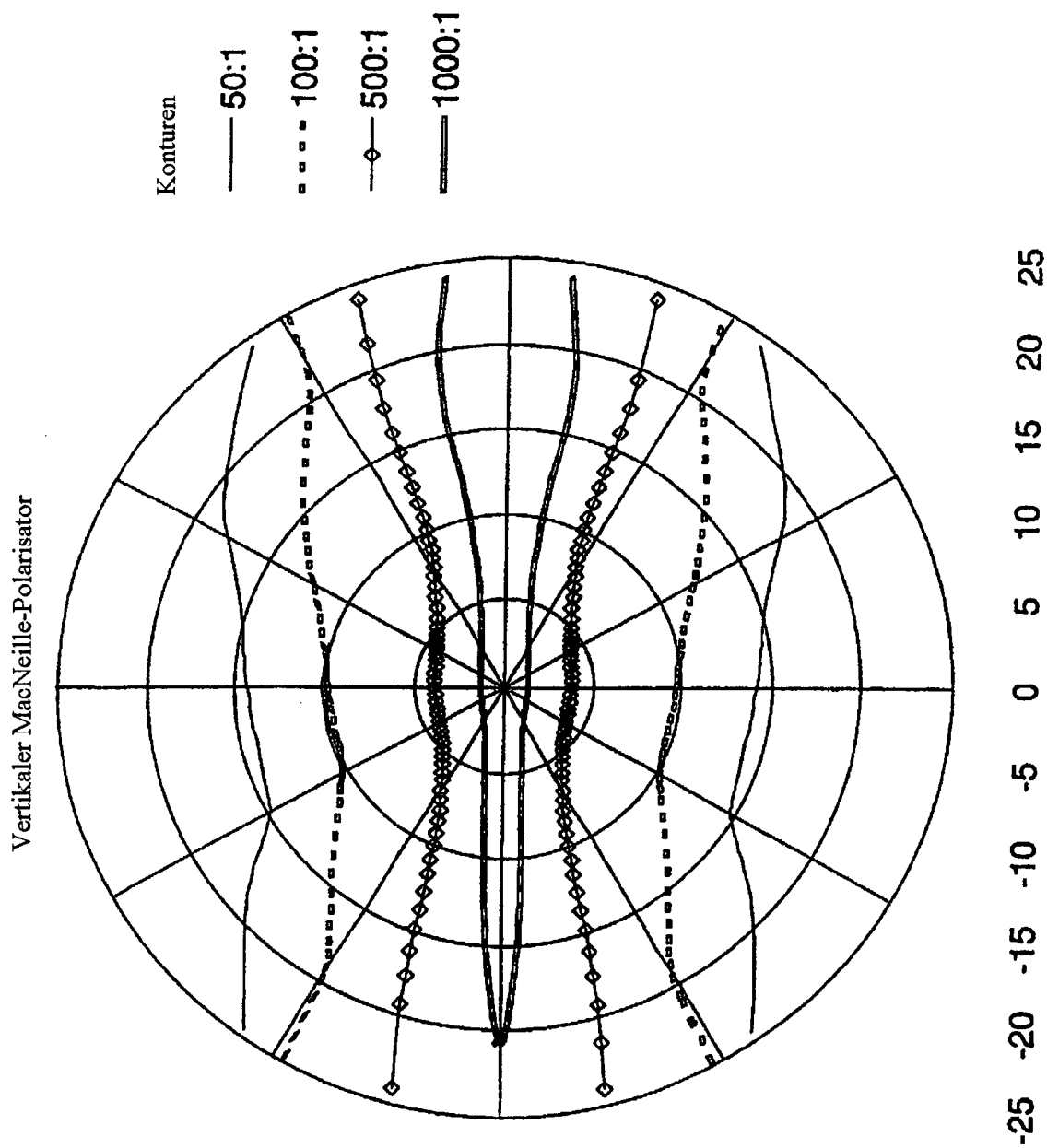


Fig. 33



Vertikaler reflektierender Polarisator  
vom Polarisationsstrahlteiler-Typ

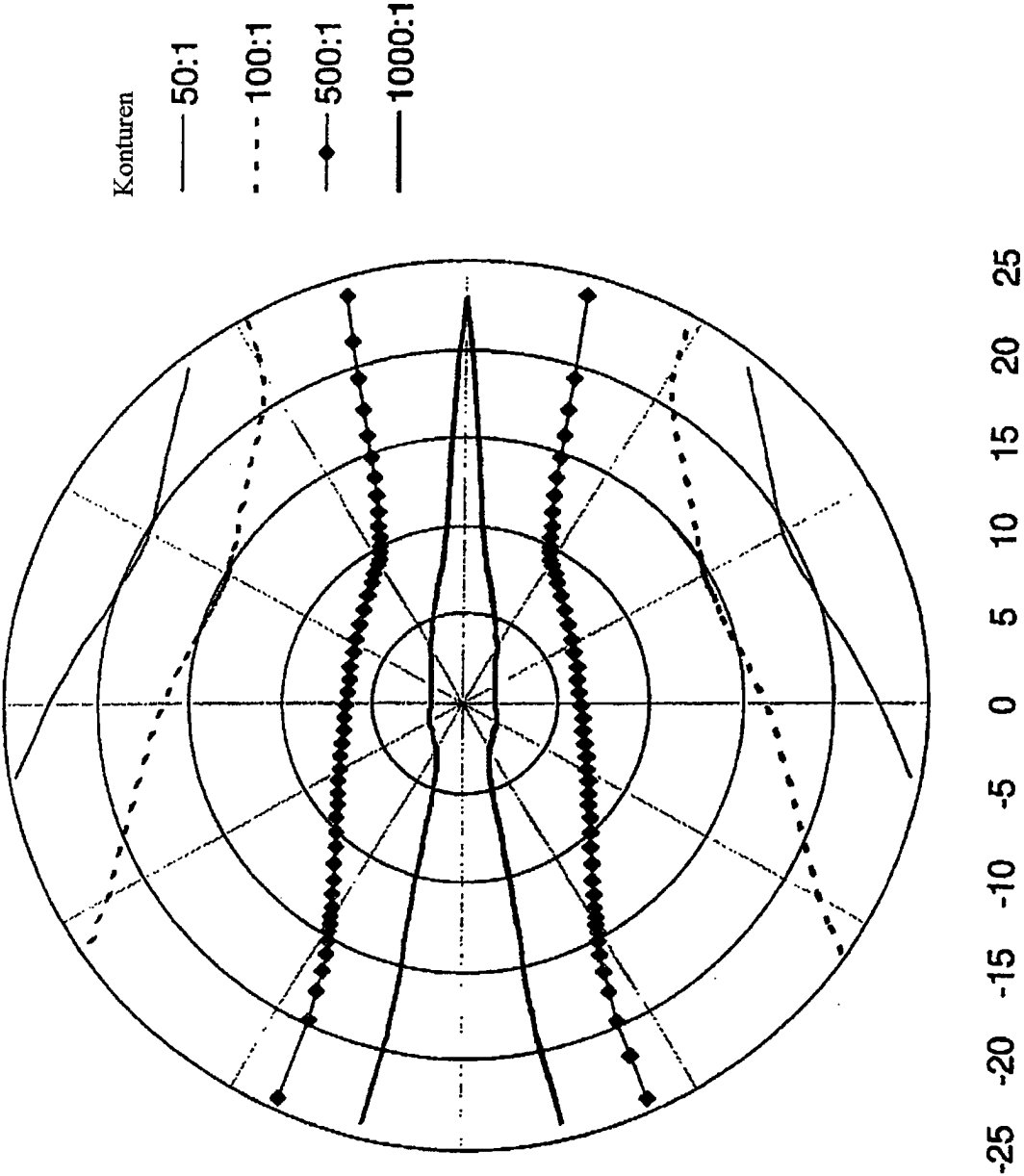


Fig. 34

Horizontaler reflektierender Polarisator  
vom Polarisationsstrahlteiler-Typ

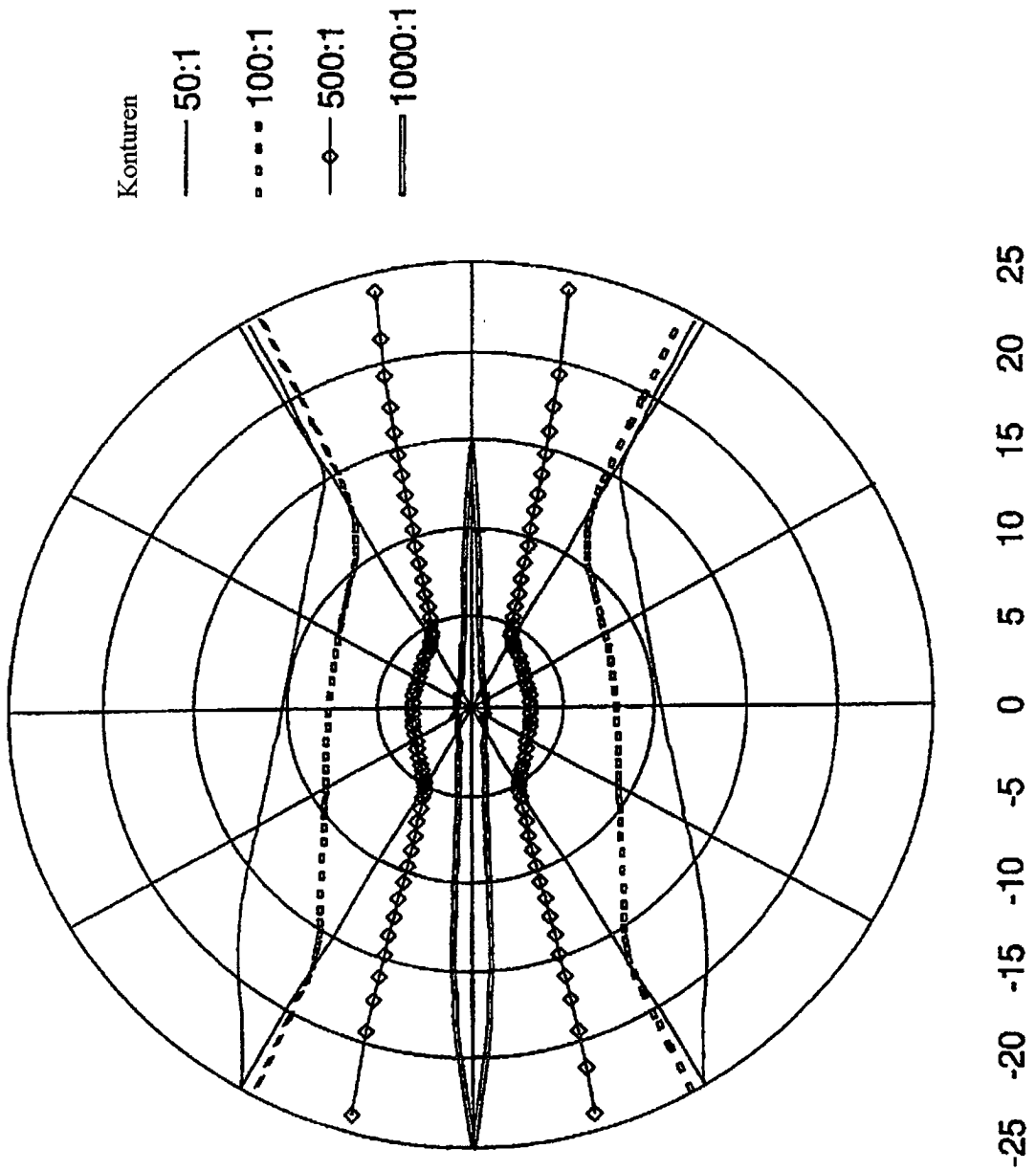


Fig. 35