



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH

697 225 B1

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(51) Int. Cl.: **A61B** 3/10 (2006.01)
G01B 9/02 (2006.01)
G01N 21/45 (2006.01)

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 01427/02

(22) Anmeldedatum: 21.08.2002

(30) Priorität: 28.08.2001 DE 101 42 001.3

(24) Patent erteilt: 31.07.2008

(45) Patentschrift veröffentlicht: 31.07.2008

(73) Inhaber:
Carl Zeiss Meditec AG, Göschwitzer Strasse 51-52
07745 Jena (DE)

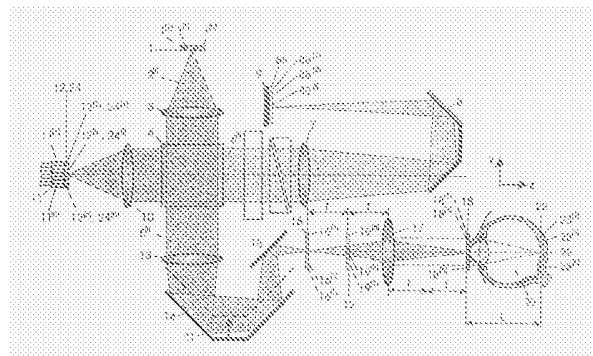
(72) Erfinder:
Prof. Dr. Adolf Friedrich Fercher, 1230 Wien (AT)

(74) Vertreter:
Bovard AG Patentanwälte, Optingenstrasse 16
3000 Bern 25 (CH)

(54) **Verfahren zur Gewinnung von Topogrammen und Tomogrammen der Augenstruktur.**

(57) Die Lösung betrifft die Erfassung und Abbildung der inneren Geometrie des Auges, insbesondere der für die Abbildung im Auge wichtigen Komponenten wie Kornea, Augenlinse, Glaskörper und Retinaoberfläche mittels vielkanaliger Kurzkohärenz-Interferometrie.

Das beschriebene Verfahren dient zur Gewinnung von Topogrammen und Tomogrammen der Augenstruktur. Dies wird erreicht mittels vieler gleichzeitig aufgezeichneter interferometrischer Tiefen-Scans durch in der Pupille transversal benachbarte Punkte. Das Verfahren nutzt die Verwendung von räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Lichtquellen (1). Der Tiefen-Scan wird durch verändern der optischen Länge des Interferometer-Messarmes mittels eines Retroreflektors (8, 14) ausgeführt. Durch kontinuierliches Verschieben des Retroreflektors (14) kann mit Hilfe der auftretenden Interferenz die z-Position (23) der lichtemittierenden Stelle im Auge (20) bestimmt und registriert werden. Durch die Verwendung von räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Lichtstrahlen (2), die aus vielen Teilstrahlen bestehen, ist die gleichzeitige Aufzeichnung von Tiefen-Scans möglich.



Beschreibung

[0001] Diese Erfindung betrifft die Gewinnung von Topogrammen und Tomogrammen der Augenstruktur durch Erfassung und Abbildung der inneren Geometrie des Auges, insbesondere der für die Abbildung im Auge wichtigen Komponenten wie Cornea, Augenlinse, Glaskörper und Retinaoberfläche mittels multiplexer vielkanaliger Kurzkohärenz-Interferometrie.

Stand der Technik

[0002] Bedingt durch neue Entwicklungen in der Ophthalmologie, gekennzeichnet durch vielfältig geartete operative Eingriffe an der Augenlinse (z. B. Kataraktchirurgie) und an der Hornhaut (refraktive Corneachirurgie), besteht ein erheblicher Bedarf an einem Messverfahren, welches die optisch wirksame Geometrie des Auges quantitativ darstellt. Eine Teilaufgabe in diesem Sinne ist die Messung der Abbildungsqualität des Auges. Zur Erfassung der Abbildungsqualität des Auges sind schon in der Vergangenheit verschiedene Verfahren bekannt geworden: Subjektive Verfahren, die die Mitwirkung des Probanden erfordern und objektive Verfahren, die auf eine Mitwirkung des Probanden an der Messung im engeren Sinne verzichten. Subjektive Verfahren sind wegen der erforderlichen Mitwirkung des Probanden zur strengen Klärung klinischer Fragestellungen kaum zu gebrauchen. Auch die bisher bekannt gewordenen objektiven Verfahren zur Erfassung der Aberrationen des Auges gewähren nur beschränkten Zugang zur geometrischen Struktur des Auges, weil sie nur den Gesamteffekt aller optisch wirksamen Strukturen des Auges darstellen und die Einflüsse einzelner Komponenten nicht klar trennen können. Einen neueren Überblick über diese Fragen und einen Vergleich zweier moderner subjektiver Verfahren zur Messung der Aberrationen des Auges findet man beispielsweise in der Literaturstelle E. Moreno-Bamuso, R. Navarro, J. Opt. Soc. Am, A, Vol. 17, 2000, pp. 974–985.

[0003] Ein objektives Verfahren zur quantitativen Erfassung der optisch wirksamen Geometrie des Auges bietet die Kurzkohärenz-Interferometrie. Bei dieser Methode werden interferometrische Messstrahlen eines Zweistrahl-Interferometers auf das Objekt gerichtet und dringen in dessen Tiefe ein. Die Tiefenpositionen lichtemittierender Stellen werden entlang dieser Messlichtstrahlen etwa in Richtung der Sehachse oder der optischen Achse des Auges gemessen. Bei der Messung mittels dieser so genannten Tiefen-Scans wird die Länge des Referenzstrahls, beispielsweise durch axiales Verschieben des Referenzspiegels, kontinuierlich verändert und so das Kurzkohärenz-Interferogramm entlang der Tiefen-Koordinate des Messstrahls im Messobjekt registriert: Stimmt die Länge des Referenzstrahls innerhalb der Kohärenzlänge, also innerhalb des so genannten Kohärenzfensters, mit der Länge des Messstrahls zu einer lichtemittierenden Struktur überein, treten am Interferometerausgang Interferenzen auf. Diese Interferenzen erzeugen am photoelektrischen Detektor am Interferometerausgang ein elektrisches Wechsignale, welches die lichtemittierende Struktur repräsentiert. Die momentane Länge des Referenzstrahls liefert die zugehörige Tiefenposition dieser lichtemittierenden Stelle im Messstrahl. Hierbei wird zur Gewährleistung einer sinnvollen Transversalauflösung der Messstrahl auf die interessierende Objektstruktur fokussiert oder es wird ein dynamischer Fokus benutzt, der synchron mit dem Kohärenzfenster die Objekttiefe in longitudinaler Richtung scant. Das elektrische Signal des photoelektrischen Detektors am Interferometerausgang enthält dann die Tiefenstruktur entlang dem Messstrahl. Aus solchen durch transversal benachbarte Pupillenpunkte des Auges ausgeführten Tiefen-Scans kann man die Topographie der intraokulären Strukturen bestimmen; aus entsprechend vielen solcher transversal benachbarter Tiefen-Scans kann man auch tomographische Bilder synthetisieren. Diese Methoden sind als optische Kohärenz-Tomographie und -Topographie bekannt geworden und in der Literaturstelle A.F. Fercher, and OK. Hitzenberger, in: Springer Series in Optical Sciences (ed.: T. Asakura), Vol. 4, Springer Verlag, Berlin 1999, beschrieben.

[0004] Die beschriebene Kurzkohärenz-Interferometrie hat den Nachteil, dass zur Gewinnung von Topogrammen oder von Tomogrammen viele einzelne transversal benachbarte Tiefen-Scans entlang einzelner Messstrahlen hintereinander ausgeführt werden müssen, was zeitraubend ist. Insbesondere ist der Einsatz eines solchen Verfahrens an Patienten problematisch.

[0005] Es ist daher die technische Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und Anordnung zur Gewinnung von Topogrammen und Tomogrammen der Augenstruktur mittels vieler gleichzeitig aufgezeichneter multiplexer Kurzkohärenz-interferometrischer Tiefen-Scans durch in der Pupille transversal benachbarte Punkte anzugeben.

[0006] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass der Kurzkohärenz-interferometrische Tiefen-Scan am Auge mittels eines transversal ausgedehnten primären Messbilds von räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Lichtquellen im Interferometer-Messarm ausgeführt wird, ein primäres Referenzbild der räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Lichtquellen im Interferometer-Referenzarm erzeugt wird, und beide primären Bilder am Interferometerausgang in sekundäre sich deckende Bilder auf ein- oder zweidimensionale Photodetektor-Arrays zur Detektion der gleichzeitig anfallenden photoelektrischen Tiefen-Scan Signale aus transversal benachbarten Pupillenpunkten abgebildet werden.

[0007] Eine weitere technische Aufgabe ist es, eine dynamische Fokussierung zu realisieren, damit das Messbild die Objekttiefe synchron mit dem Kohärenzfenster scant.

[0008] Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass der Kurzkohärenz-interferometrische Tiefen-Scan durch Verändern der optischen Länge des Interferometer-Messarms mittels eines Retroeffektors ausgeführt wird und das primäre Messbild durch Abbildung der räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquellen über ein Zwischenbild mittels einer Optik, deren Brennweite etwa der optischen Länge des schematischen Auges entspricht, in das Auge entsteht.

[0009] Die Erfindung wird im Folgenden mit Hilfe der Fig. 1 bis 6 erklärt.

- Fig. 1 beschreibt eine eindimensionale Version des erfindungsgemässen Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie-Verfahrens zur Messung der inneren Geometrie des Auges mittels einer transversal ausgedehnten und räumlich teilkohärenten Lichtquelle 1.
- Fig. 2 beschreibt eine eindimensionale Version des erfindungsgemässen Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie-Verfahrens zur Messung der inneren Geometrie des Auges mittels einer transversal ausgedehnten Lichtquelle, wobei die Interferometer-Lichtquelle 1 durch Abbildung einer konkreten Lichtquelle 30 entsteht,
- Fig. 3 beschreibt eine eindimensionale Version des erfindungsgemässen Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie-Verfahrens zur Messung der inneren Geometrie des Auges mittels einer transversal ausgedehnten Lichtquelle, wobei als Interferometer-Lichtquelle 37 ein Querschnitt aus einem Lichtbündel 36 benutzt wird,
- Fig. 4 beschreibt eine eindimensionale Version des erfindungsgemässen Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie-Verfahrens zur Messung der inneren Geometrie des Auges mittels einer transversal ausgedehnten räumlich kohärenten Lichtquelle 42, wobei eine im transversalen Grundmodenbetrieb arbeitende Superlumineszenzdiode oder ein im transversalen Grundmodenbetrieb arbeitender Multimodenlaser als Lichtquelle 40 benutzt wird,
- Fig. 5 beschreibt eine zweidimensionale Version der optischen Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie,
- Fig. 6 definiert die Bezeichnung der Teil-Lichtquellen bei der zweidimensionalen optischen Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie.

[0010] Das Wort Kurzkohärenz bezieht sich darauf, dass bei dieser interferometrischen Methode Licht kurzer Kohärenzlänge benutzt wird. Hierbei wird die optische Weglänge des Messstrahls eines Zweistrahl-Interferometers durch Durchstimmen der Länge des Referenzstrahls nach auftretenden Interferenzen gescant. Bei diesem so genannten «Tiefen-Scan» wird der Referenzspiegel entlang der Achse des Referenzstrahls bewegt. Wenn die Weglänge des Referenzstrahls vom Strahlteiler zum Messort und zurück innerhalb der Kohärenzlänge gleich der Weglänge des Messstrahls vom Strahlteiler zu einer lichtemittierenden Stelle im Objekt (Auge) und zurück zum Strahlteiler ist, treten am Interferometer-Ausgang Interferenzen auf. Der Bereich am Messort, der zu diesen Interferenzen beiträgt, heisst «Kohärenzfenster». Durch kontinuierliches Verschieben des Referenzspiegels wird mit Hilfe der dann an einem Photodetektor am Interferometer-Ausgang auftretenden Interferenzen die z-Position lichtemittierender Stellen im Objekt registriert. Die Bestimmung der z-Position erfolgt mit einer Genauigkeit, die etwa durch die Kohärenzlänge $1_c \propto \lambda^2 / \Delta\lambda$ des benutzten Lichts gegeben ist; hier ist λ die mittlere Wellenlänge und $\Delta\lambda$ ist die Wellenlängen-Bandbreite der benutzten Strahlung. Das «Kohärenzfenster» eines Tiefen-Scans hat also etwa die Länge 1_c . Zur Durchführung des Tiefen-Scans werden derzeit durchwegs räumlich kohärente Lichtquellen benutzt.

[0011] Räumlich kohärente Lichtquellen sind im transversalen Monomoden-Betrieb arbeitende Laser und Superlumineszenzdiolen. Räumlich teilkohärente Lichtquellen hingegen sind beispielsweise Glühlampen, Halogenlampen, Plasma-Niederdruck- und Plasma-Hochdrucklampen, aber auch Superlumineszenzdiolen, die im transversalen Multimoden-Betrieb arbeiten, ebenso wie alle Laser, die im transversalen Multimoden-Betrieb arbeiten.

[0012] Fig. 1 stellt den Strahlengang des ophthalmologischen Kurzkohärenz-Interferometers mit einer ausgedehnten, räumlich teilkohärenten Lichtquelle 1 dar. Diese Lichtquelle besteht aus den räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquellen $1<(1)>$, $1<(2)>$, ..., $1<(n)>$, $2<(i)>$ (mit $1 \leq i \leq n$) ist ein aus der Teil-Lichtquelle $1<(i)>$ der ausgedehnten, räumlich teilkohärenten Lichtquelle 1 austretender Teilstrahl. Dieser wird von der Optik 3 kollimiert und vom Strahlteiler 4 in Messstrahl $5<(i)>$ und Referenzstrahl $6<(i)>$ geteilt. Der Referenzstrahl $6<(i)>$ wird von der Optik 7 über den Retroreflektor 8 zum Referenzspiegel 9 gespiegelt und dort in das Teil-Bild $88<(i)>$ der räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquelle $1<(i)>$ fokussiert. Das vom Referenzspiegel 9 reflektierte Licht des Referenzstrahls $6<(i)>$ wird über den Retroreflektor 8, die Optik 7, den Strahlteiler 4 und die Optik 10 auf das Photodetektor-Array 11 mit n Photodetektoren am Interferometerausgang gerichtet und dort in das Teil-Bild $12<(i)>$ des sekundären Referenzbilds 12 der Teil-Lichtquelle $1<(i)>$ fokussiert. Analoges passiert auch mit allen aus den übrigen Teil-Lichtquellen $1<(i)>$, $1<(2)>$, ..., $1<(n)>$ austretenden Teilstrahlen $2<(1)>$, $2<(2)>$, ..., $2<(n)>$, die jedoch in die Fig. 1 nicht eingezeichnet sind. Es ist jedoch evident, dass diese Lichtbündel die Teil-Bilder $88<(1)>$, $88<(2)>$, ..., $88<(n)>$ auf dem Referenzspiegel 9 erzeugen und die Teil-Bilder $12<(1)>$, $12<(2)>$, ..., $12<(n)>$ des sekundären Referenzbilds 12 auf dem Photodetektor 11 am Interferometerausgang.

[0013] Die den Strahlteiler 4 durchsetzenden Teilstrahlen $5<(1)>$, $5<(2)>$, $5<(n)>$ bilden das Messstrahlen-Bündel. Dieses wird von der Optik 13 über den Retroreflektor 14 und den Umlenkspiegel 15 in das Zwischenbild 16 mit den Teil-Bildern $16<(1)>$, $16<(2)>$, ..., $16<(n)>$ fokussiert. Das Zwischenbild 16 befindet sich zwei Brennweiten f der Optik 17 vor dieser. Das Zwischenbild 16 wird daher im Abbildungsmaassstab 1:1 von der Optik 17 in das primäre Messbild 18 mit den Teil-Bildern $18<(1)>$, $18<(2)>$, ..., $18<(n)>$ in einer zur Augenachse 29 normalen Ebene an der Cornea des Auges 20 abgebildet.

[0014] Wird nun der Retroreflektor 14 in Richtung Strahlteiler 4 um die Strecke Δz bewegt, wie in der Fig. 1 durch den Pfeil 21 angedeutet, wird die optische Länge des Mess-Strahlengangs um $2\Delta z$ verkürzt. Die Teil-Bilder $16<(1)>$, $16<(2)>$, ..., $16<(n)>$ der Lichtquelle 1 werden dadurch in die gestrichelt gezeichneten Positionen $19<(1)>$, $19<(2)>$, ..., $19<(n)>$ ver-

schoben: Ist $\#z = f/2$, also gleich der halben Brennweite der Optik 17, so befinden sich die Teil-Bilder $16<(1)>$, $16<(2)>$, ..., $16<(n)>$ des Zwischenbilds der Lichtquelle 1 nun in der vorderen Brennebene der Optik 17 und das primäre Messbild 18 mit den Teil-Bildern $18<(1)>$, $18<(2)>$, ..., $18<(n)>$ wird von der Optik des Auges 20 auf den Augenfundus 22 in die gestrichelt gezeichneten Positionen $23<(1)>$, $23<(2)>$, ..., $23<(n)>$ abgebildet. Für Verschiebungen des Retroreflektors 14 um Strecken kleiner als $\#z = f/2$ wird das primäre Messbild 18 mit den Teil-Bildern $18<(1)>$, $18<(2)>$, ..., $18<(n)>$ in Positionen zwischen Cornea und Augenfundus abgebildet.

[0015] Durch Verschieben des Retroreflektors 14 um die Strecke $\#z = f/2$ wird also das Auge von dem primären Messbild 18 der Lichtquelle 1 mit den Teil-Bildern $18<(1)>$, $18<(2)>$, ..., $18<(n)>$ von der Cornea bis zum Fundus abgetastet.

[0016] Für die Kurzkohärenz-interferometrische Messung ist notwendig, dass auch das Kohärenzfenster an der jeweiligen Stelle des primären Messbilds 18 liegt. Hierzu wird erfindungsgemäss die Brennweite f der Optik 17 gleich der optischen Länge des Auges von der Cornea bis zum Fundus gewählt. Die optische Länge des Auges ist dessen geometrische Länge L multipliziert mit dem mittleren Gruppenindex des Auges n_G . Der mittlere Gruppenindex n_G des schematischen menschlichen Auges nach Gullstrand hat beispielsweise für Licht mit einer mittleren Wellenlänge von $\# = 780$ nm den Wert von $n_G = 1.3549$.

[0017] Fallen Teil-Bilder $18<(1)>$, $18<(2)>$, ..., $18<(n)>$ des primären Messbilds 18 auf lichtemittierende Stellen im Auge, werden die remittierten Lichtstrahlen über die Optik des Auges, die Optik 17, den Umlenkspiegel 15, den Retroreflektor 14, die Optik 13, den Strahlteiler 4 und die Optik 10 auf den Photodetektor 11 abgebildet und bilden dort die Teil-Bilder $24<(1)>$, $24<(2)>$, ..., $24<(n)>$ des sekundären Messbilds 24. Wenn sich die Teil-Bilder $24<(1)>$, $24<(2)>$, ..., $24<(n)>$ vollständig mit den Teil-Bildern $12<(1)>$, $12<(2)>$, ..., $12<(n)>$ decken, was durch entsprechende Justierung des Interferometer-Strahlteilers 4 möglich ist, treten an diesen Stellen Interferenzen auf, die von dem Detektor-Array gleichzeitig detektiert werden können. Den Teilbildern $12<(i)>$, ($i = 1 \dots n$) entsprechen n Kurzkohärenz-interferometrischen Referenzstrahlen, den Teilbildern $24<(i)>$, ($i = 1 \dots n$) entsprechen n Kurzkohärenz-interferometrischen Messstrahlen. Somit ist es möglich, eine Vielzahl von Tiefen-Scans durch das Auge hindurch parallel und gleichzeitig auszuführen.

[0018] Es ist evident, dass anstelle der Lichtquelle 1 auch ein Bild einer Lichtquelle benutzt werden kann. Ein Beispiel ist in der Fig. 2 dargestellt. Dort ist 30 eine Lichtquelle, die von der Optik 31 an die Stelle der Interferometer-Lichtquelle 1 am Interferometereingang des in der Fig. 1 dargestellten Interferometers abgebildet wird. Anstelle einer konkreten Lichtquelle kann auch ein beliebiger Ausschnitt aus einem Lichtbündel als Lichtquelle benutzt werden. Ein Beispiel ist in der Fig. 3 dargestellt. Dort ist 35 eine beliebige Lichtquelle und 36 das von ihr ausgehende Lichtbündel. Der an der Stelle 37 am Interferometereingang vorliegende Ausschnitt aus dem Lichtbündel 36 dient hier als Interferometer-Lichtquelle für das Interferometer.

[0019] Es soll hier auch noch festgestellt werden, dass durch die Bewegung des Retroreflektors 14 eine Dopplerverschiebung des Messlichts erfolgt, so dass an den einzelnen Photodetektoren $11<(1)>$, $11<(2)>$, ..., $11<(n)>$ etc. ein elektrisches Wechselsignal entsteht, welches eine Bandpass Filterung zur Verminderung des Rauschens ermöglicht.

[0020] Die Verwendung von räumlich teilkohärenten Lichtquellen 1 vermindert das Nebensprechen der Teil-Strahlen, weil Streulicht aus einem Teil-Strahl mit Streulicht aus einem anderen Teil-Strahl nicht voll interferenzfähig ist. Dennoch kann es auch sinnvoll sein, dieses Verfahren mit räumlich kohärenten Lichtquellen zu realisieren, beispielsweise, weil diese Lichtquellen in grösserer Vielfalt kommerziell erhältlich sind. Eine entsprechende Anordnung ist in der Fig. 4 abgebildet.

[0021] In der Fig. 4 ist 40 eine räumlich kohärente und zeitlich kurzkohärente Lichtquelle, wie beispielsweise eine im transversalen Grundmodenbetrieb arbeitende Superlumineszenzdiode oder ein im transversalen Grundmodenbetrieb arbeitender Multimodenlaser. Die Optik 43 fokussiert das Lichtbündel 41 in die Eintrittspupille des Interferometers. Ein beliebiger Strahlquerschnitt 42 im Strahl 41, den diese Lichtquelle emittiert, dient als Interferometer Lichtquelle für das Kurzkohärenz-Interferometer. Wie bei dem Kurzkohärenz-Interferometer nach Fig. 1 werden die räumlich kohärenten Teil-Lichtquellen $42<(1)>$, $42<(2)>$, ..., $42<(n)>$ einerseits im Referenzarm in die primären Referenzbilder $88<(1)>$, $88<(2)>$, ..., $88<(n)>$ und andererseits im Messarm in die primären Messbilder $18<(1)>$, $18<(2)>$, ..., $18<(n)>$ abgebildet und weiters deckungsgleich auf das Photodetektor-Array 11 in die Teilbilder $12<(1)>$, $12<(2)>$, ..., $12<(n)>$ und $24<(1)>$, $24<(2)>$, ..., $24<(n)>$. Der Strahlengang kann im Übrigen identisch sein mit dem Interferometer nach Fig. 1.

[0022] Bei der Kurzkohärenz-Interferometrie wird breitbandiges Licht benutzt. Durchläuft einer der Interferometer-Strahlen dispergierende Medien, wird die Kohärenzlänge vergrössert und damit die Tiefenauflösung der Kurzkohärenz-Interferometrie verschlechtert. Dies kann durch sorgfältigen Ausgleich der Dispersion in beiden Interferometerarmen kompensiert werden. In beiden Interferometerarmen muss hierzu dieselbe Dispersion vorliegen. Das bedeutet zunächst, dass die Glaswege der beiden Interferometerstrahlen gleich lang sein müssen. Da die Länge der Messstrecke über die Tiefe des Auges hinweg variiert, muss auch ein variierender Betrag an Dispersion im Referenzarm realisiert werden. Erfindungsgemäss kann dies hier entweder näherungsweise so realisiert werden, dass man im Referenzarm einen Glasweg fix einbaut, der der Dispersion der halben Augenlänge entspricht. Verwendet man dazu eine Planplatte 50 aus BK7, so muss deren Dicke beispielsweise bei einer Wellenlänge von $\# = 800$ nm für das schematische Auge etwa 6.3 mm betragen. Man kann die Dispersion des Auges auch dynamisch während des Tiefenscans kompensieren. Hierzu eignen sich zwei hintereinander im Referenzstrahl aufgestellte Prismen 51 und 52 mit dem Prismenwinkel $\#$. Durch Verschieben transversal zur Strahlachse, wie durch die eingezeichneten Doppelpfeile angedeutet, können unterschiedliche Glaswege und entsprechende Dispersionen eingestellt werden. Durch geeignete Wahl des Prismenwinkels $\#$ kann erreicht werden, dass durch Verschie-

bung der Prismen 51 und 52 synchron zum Retroreflektor 14 eine der jeweiligen Position des Kohärenzfensters im Auge entsprechende Dispersion dynamisch eingestellt wird.

[0023] Das bisher am Beispiel eines eindimensionalen Detektor-Arrays 11 beschriebene Verfahren kann durch Verwendung eines zweidimensionalen Detektor-Arrays 110 auf eine zweidimensionale parallele optische Multiplex Kurzkohärenz-Interferometrie erweitert werden. Das ist in der Fig. 5 dargestellt, wobei hier der Ausschnitt an einer beliebigen Position 42 aus einem Lichtbündel 41 als Interferometer-Lichtquelle 101 dient. 40 ist eine räumlich kohärente oder räumlich teilkohärente Lichtquelle. Als Interferometer-Lichtquelle 101 kann auch eine konkrete räumlich kohärente oder räumlich teilkohärente Lichtquelle benutzt werden. In jedem Fall wird von der Interferometer-Lichtquelle 101 ein zweidimensionaler flächenhafter Bereich benutzt, wie in der Fig. 6 angedeutet. Dieser Lichtquellenbereich besteht aus Teil-Lichtquellen $101<(1,1)>$, $101<(1,2)>$, ..., $101<(1,n)>$; $101<(2,1)>$, $101<(2,2)>$, ..., $101<(2,n)>$; etc. bis $101<(m,n)>$. Die Zahlen m und n sind gleich den Spalten- und Zeilenzahlen des Photodetektor-Arrays 110. Je nach Photodetektor-Array können m und n grosse Zahlen sein, beispielsweise 20 oder auch 1024, $102<(i,j)>$ ist ein aus der Teil-Lichtquelle $101<(i,j)>$ der Interferometer-Lichtquelle 101 austretender Teilstrahl. Dieser wird von der Optik 3 kollimiert und vom Strahlteiler 4 in Messstrahl $5<(i,j)>$ und Referenzstrahl $6<(i,j)>$ geteilt. Der Referenzstrahl $6<(i,j)>$ wird von der Optik 7 über den Retroreflektor 8 zum Referenzspiegel 9 gespiegelt und dort in das primäre Referenz-Teil-Bild $108<(i,j)>$ der Teil-Lichtquelle $101<(i,j)>$ fokussiert. Das vom Referenzspiegel 9 reflektierte Licht des Referenzstrahls $6<(i,j)>$ wird über den Retroreflektor 8, die Optik 7, den Strahlteiler 4 und die Optik 10 in das sekundäre Referenz-Teil-Bild 112 auf dem Photodetektor-Array 110 mit m x n Photodetektoren am Interferometerausgang gerichtet und bildet dort das sekundäre Referenz-Bild $112<(i,j)>$ der Teil-Lichtquelle $101<(i,j)>$. Analoges passiert auch mit allen aus den übrigen Teil-Lichtquellen $101<(1,1)>$, $101<(1,2)>$, ..., etc. austretenden Teilstrahlen $102<(1,1)>$, $102<(1,2)>$ etc., die jedoch in die Fig. 5 nicht eingezeichnet sind. Auch diese Lichtbündel erzeugen primäre Referenz-Teil-Bilder $108<(1,1)>$, $108<(1,2)>$, ..., etc. auf dem Referenzspiegel 9 und sekundäre Referenz-Teil-Bilder $112<(1,1)>$, $112<(1,2)>$, ..., etc. auf dem Photodetektor 110 am Interferometerausgang.

[0024] Die den Strahlteiler 4 durchsetzenden Teilstrahlen $5<(1,1)>$, $5<(1,2)>$, ..., etc. bilden das Messstrahlen-Bündel. Dieses wird von der Optik 13 über den Retroreflektor 14 und den Umlenkspiegel 15 in das Zwischenbild 116 mit den Teil-Bildern $116<(1,1)>$, $116<(1,2)>$, ..., fokussiert. Das Zwischenbild 116 befindet sich zwei Brennweiten f der Optik 17 vor dieser. Das Zwischenbild 116 wird daher im Abbildungsmaßstab 1:1 von der Optik 17 in das primäre Messbild 118 mit den Teil-Bildern $118<(1,1)>$, $118<(1,2)>$, ..., $118<(m,n)>$ in einer zur Augenachse normalen Ebene an der Cornea des Auges 20 abgebildet.

[0025] Auch hier wird durch das Verschieben des Retroreflektors 14 um die Strecke $\#z = f/2$ das Auge von der Cornea bis zum Fundus von dem primären Messbild 118 mit den Teil-Bildern $118<(1,1)>$, $118<(1,2)>$, ..., $118<(m,n)>$ abgetastet. Auch hier wird die Brennweite f der Optik 17 erfindungsgemäss gleich der optischen Länge des Auges von der Cornea bis zum Fundus gewählt. Fallen Teil-Bilder $118<(1,1)>$, $118<(1,2)>$, ..., $118<(m,n)>$ des primären Messbilds 118 auf lichtremittierende Stellen im Auge, werden die remittierten Lichtstrahlen über die Optik des Auges, die Optik 17, den Umlenkspiegel 15, den Retroreflektor 14, die Optik 13, den Strahlteiler 4 und die Optik 10 auf den Photodetektor 110 abgebildet und bilden dort die sekundären Teil-Bilder $124<(1,1)>$, $124<(1,2)>$, ..., $124<(m,n)>$. Wenn sich die sekundären Teil-Bilder $124<(1,1)>$, $124<(1,2)>$ $124<(m,n)>$ des Messstrahls vollständig mit den Teil-Bildern $112<(1,1)>$, $112<(1,2)>$, ..., $112<(m,n)>$ des Referenzstrahls decken, treten an diesen Stellen Interferenzen auf, die von dem Detektor-Array 110 alle gleichzeitig ausgelesen werden können. Den Teilbildern $112<(i,j)>$, ($i = 1 \dots m$; $j = 1 \dots n$) entsprechen m x n Kurzkohärenz-interferometrische Referenzstrahlen, den Teilbildern $124<(i,j)>$, ($i = 1 \dots m$; $j = 1 \dots n$) entsprechen m x n Kurzkohärenz-interferometrische Messstrahlen. Somit ist es möglich, m x n Tiefen-Scans in multiplexer Weise durch das Auge hindurch gleichzeitig auszuführen.

[0026] Wie im eindimensionalen Fall kann die Dispersion des Auges entweder näherungsweise durch einen fixen Glasweg im Referenzarm, realisiert beispielsweise durch eine Planplatte 50, statisch kompensiert werden oder dynamisch, durch zwei hintereinander im Referenzstrahl aufgestellte Prismen 51 und 52, die während des Tiefen-Scans transversal zur Strahlachse in Richtung des Doppelpfeils 53 verschoben werden können.

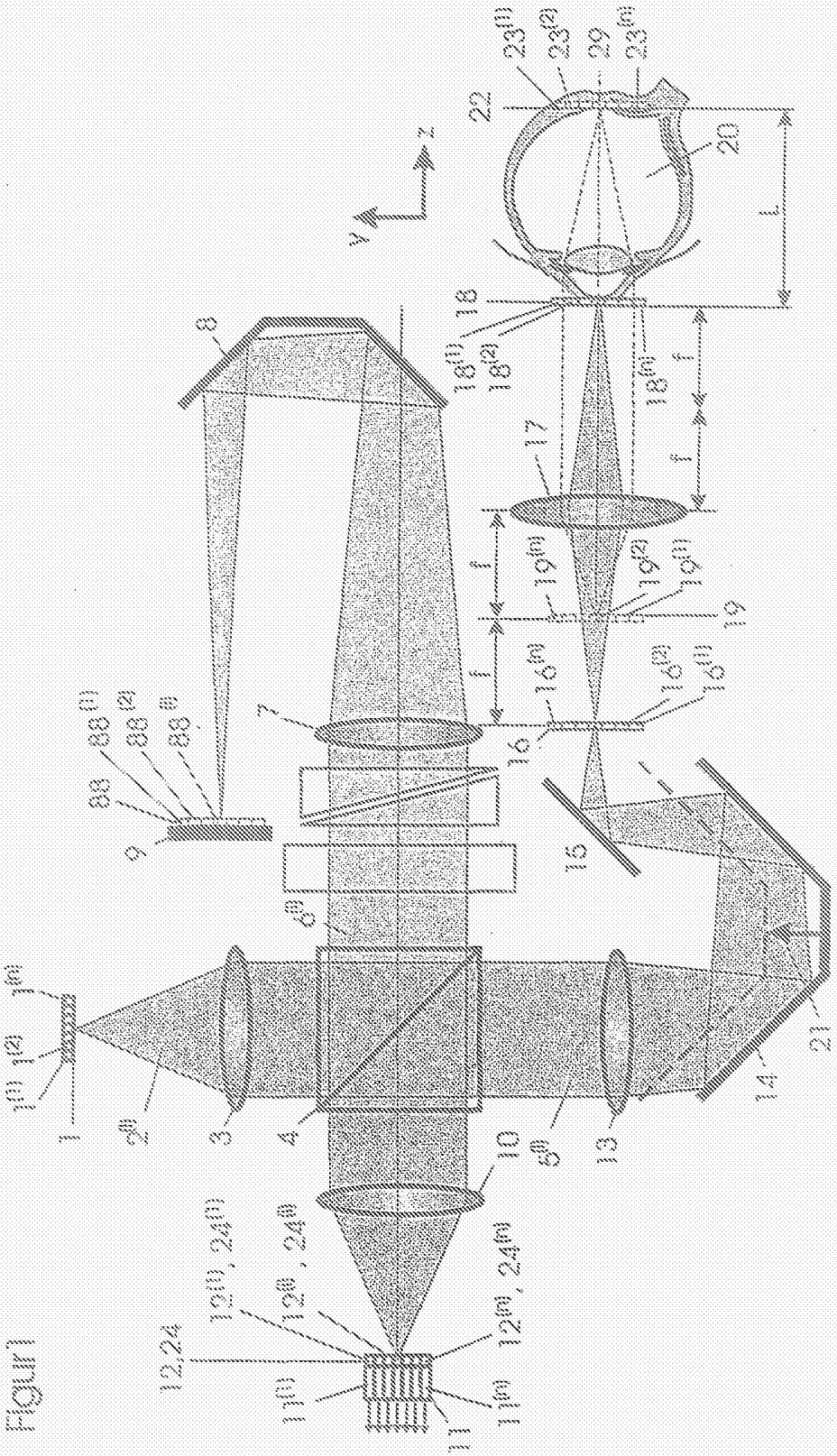
Patentsprüche

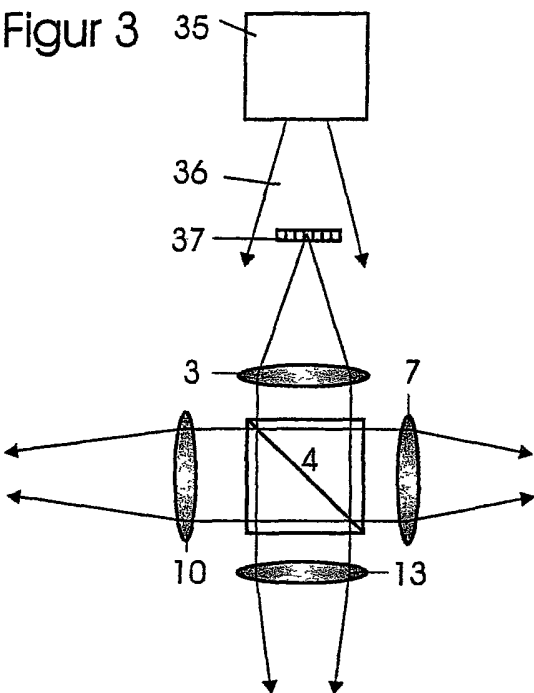
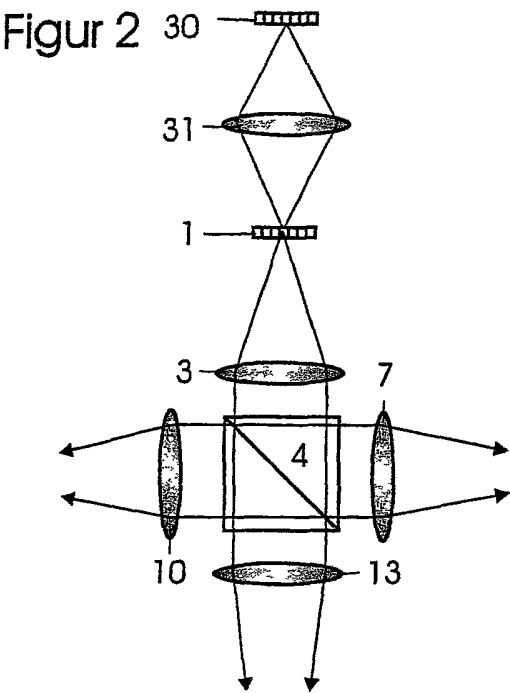
1. Verfahren zur Gewinnung von Topogrammen und Tomogrammen der Augenstruktur mittels vieler gleichzeitig aufgezeichneter Kurzkohärenz-interferometrischer Tiefen-Scans durch in der Pupille transversal benachbarte Punkte, dadurch gekennzeichnet, dass der Kurzkohärenz-interferometrische Tiefen-Scan am Auge mittels eines transversal ausgedehnten primären Messbilds (18) von räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Lichtquellen (1, 37, 42) im Interferometer-Messarm ausgeführt wird, ferner ein primäres Referenzbild (88, 108) der räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Lichtquellen im Interferometer-Referenzarm erzeugt wird, und beide primären Bilder am Interferometerausgang in sekundäre sich deckende Bilder auf ein- oder zweidimensionale Photodetektor-Arrays (11, 110) zur Detektion der gleichzeitig anfallenden photoelektrischen Tiefen-Scan Signale aus transversal benachbarten Pupillenpunkten abgebildet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1 mit einer dynamischen Fokussierung des primären Messbilds synchron mit einem Kohärenzfenster, dadurch gekennzeichnet, dass der Kurzkohärenz-interferometrische Tiefen-Scan durch Verändern der optischen Länge des Interferometer-Messarms mittels eines Retroreflektors (14) ausgeführt wird und das primäre Messbild (18) durch Abbildung der räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquellen über ein Zwi-

schenbild (19) mittels einer Optik (17), deren Brennweite etwa der optischen Länge des schematischen Auges entspricht, in das Auge entsteht.

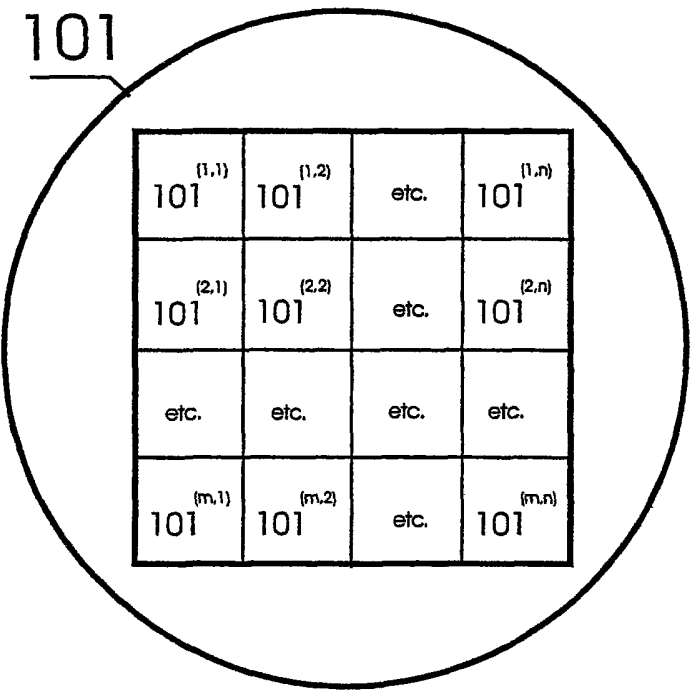
3. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Dispersion des Auges durch eine Planplatte (50) im Interferometer-Referenzarm kompensiert wird.
4. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Dispersion des Auges durch zwei synchron mit dem Retroreflektor (14) bewegte Prismen (51, 52) im Interferometer-Referenzarm kompensiert wird.
5. Anordnung zur Gewinnung von Topogrammen und Tomogrammen der Augenstruktur, bestehend aus einer kohärenten Lichtquelle, einem Kurzkohärenz-Interferometer und einem Photodetektor-Array zur Aufzeichnung kurzkohärenz-interferometrischer Tiefen-Scans, dadurch gekennzeichnet, dass die kurzkohärente Lichtquelle aus räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquellen besteht, deren Teilstrahlen zur gleichzeitigen Aufzeichnung Kurzkohärenz-interferometrischer Tiefen-Scans durch in der Pupille transversal benachbarte Punkte, gleichzeitig von einem im Kurzkohärenz-Interferometer vorhandenen Strahlteiler in den Interferometer-Messarm und den Interferometer-Referenzarm gelenkt werden, wobei das im Interferometer-Messarm erzeugte ausgedehnte primäre Messbild (18, 118) und im Interferometer-Referenzarm erzeugte ausgedehnte primäre Referenzbild (88, 108) der räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquellen (1, 37, 42) am Interferometerausgang in sekundäre sich deckende Bilder auf das Photodetektor-Arrays (11, 110) zur Detektion der gleichzeitig anfallenden photoelektrischen Tiefen-Scan-Signale aus transversal benachbarten Pupillenpunkten abgebildet werden.
6. Anordnung nach Anspruch 5 mit einer dynamischen Fokussierung des primären Messbildes synchron mit dem Kohärenzfenster, dadurch gekennzeichnet, dass zum Verändern der optischen Länge des Interferometer-Messarms ein Retroreflektor (14) und zur Abbildung des primären Messbildes (18) der räumlich kohärenten oder räumlich teilkohärenten Teil-Lichtquellen (1, 37, 42) über ein Zwischenbild (19) eine Optik (17) vorhanden ist, deren Brennweite etwa der optischen Länge des schematischen Auges entspricht.
7. Anordnung nach den Ansprüchen 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, dass zur Kompensation der Dispersion des Auges im Interferometer-Referenzarm eine Planplatte (50) vorhanden ist.
8. Anordnung nach den Ansprüchen 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, dass zur Kompensation der Dispersion des Auges im Interferometer-Referenzarm zwei synchron mit dem Retroreflektor (14) bewegte Prismen (51, 52) vorhanden sind.

Figure 1

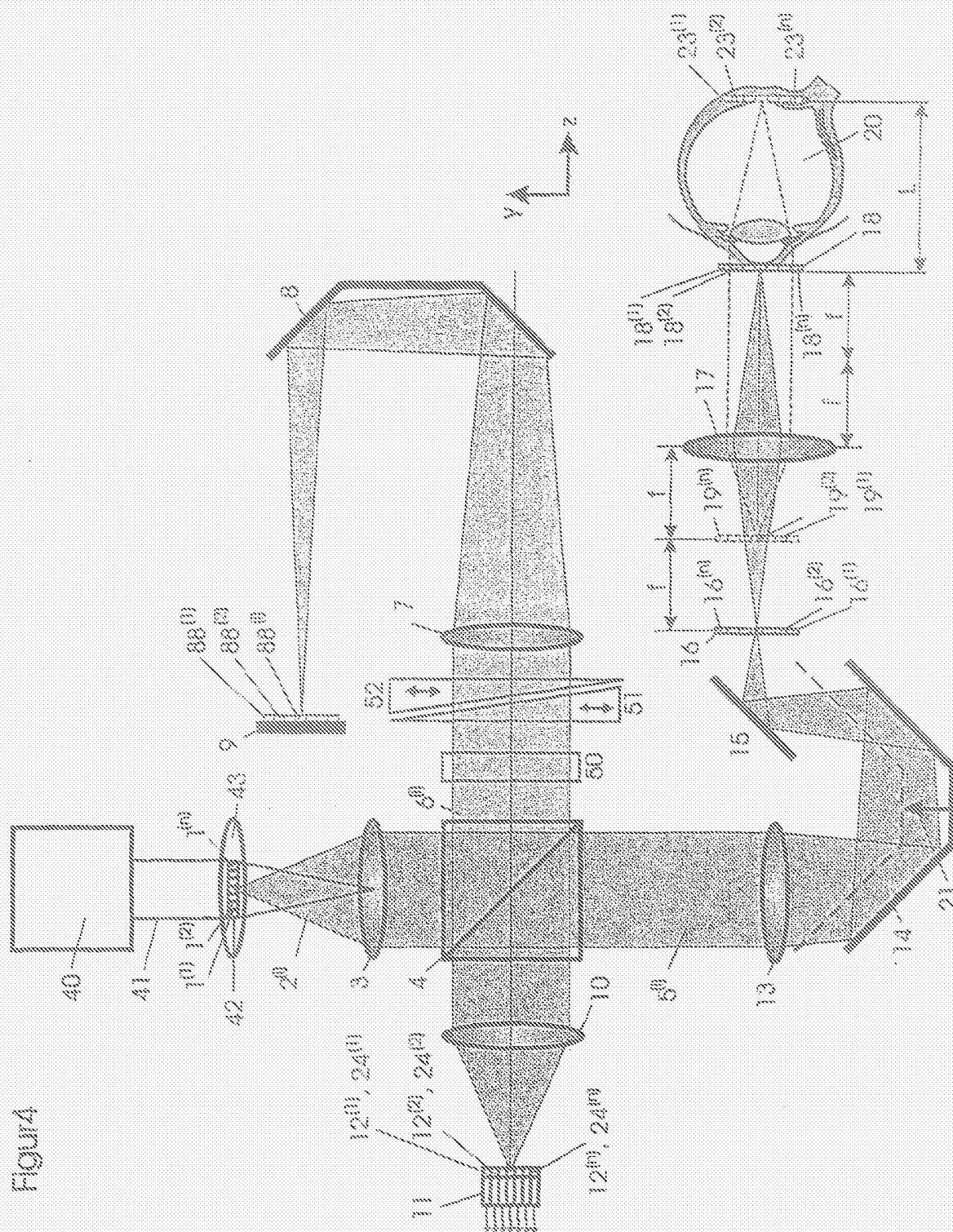




Figur 6



Figur4



2003

