



(10) **DE 10 2013 208 091 A1** 2014.11.06

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 208 091.3**  
 (22) Anmeldetag: **02.05.2013**  
 (43) Offenlegungstag: **06.11.2014**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**  
**G01B 11/255 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Carl Zeiss AG, 73447 Oberkochen, DE; Carl Zeiss  
 Vision International GmbH, 73430 Aalen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	28 05 084	A1
DE	40 25 743	A1
DE	10 2005 038 738	A1
US	4 998 819	A
WO	2012/ 067 508	A1
JP	H07- 97 022	B2

(74) Vertreter:  
**Patentanwälte Wolf & Lutz, 70193 Stuttgart, DE**

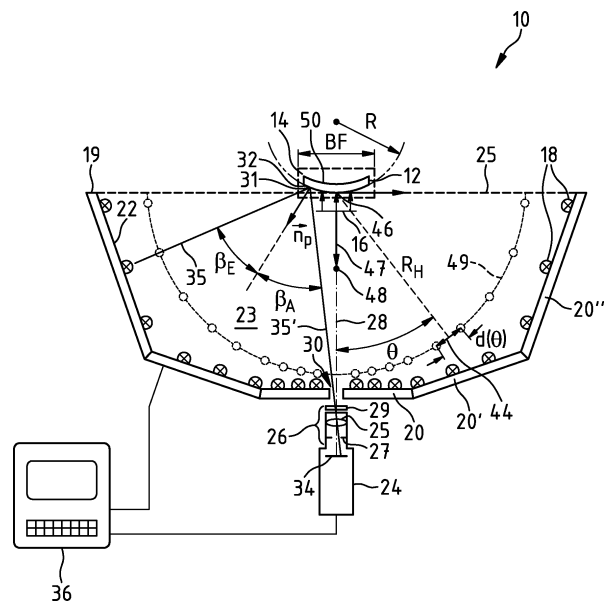
(72) Erfinder:  
**Glasesapp, Carsten, 73447 Oberkochen, DE;  
 Schleitzer, Yvonne, 73431 Aalen, DE; Omlor, Lars,  
 73431 Aalen, DE; Hanssen, Adalbert, 73434 Aalen,  
 DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zum Vermessen einer Flächentopografie**

(57) Zusammenfassung: Eine Vorrichtung (10) für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung einer optisch wirksamen Fläche (20) eines Gegenstands (12) hat eine Einrichtung (16) zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich (14), in dem die Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche (20) des Gegenstands (12) in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist. Die Vorrichtung (10) enthält eine Vielzahl von Punktlichtquellen (18), die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche (20) eines in dem Aufnahmebereich (14) angeordneten Gegenstands (12) reflektiert wird. Die Vorrichtung (10) weist wenigstens eine Kamera (24) für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung auf, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen (18) auf einem Bildsensor (34) hervorgerufen wird. Erfindungsgemäß sind die Punktlichtquellen (18) auf der Mantelfläche (22) eines Polyeders angeordnet.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft Vorrichtung für das Vermessen der Topografie und/oder der Krümmung und/oder der Gradienten einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands mit einer Einrichtung zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich, in dem die Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche des Gegenstands in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist, mit einer Vielzahl von Punktlichtquellen, die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche eines in dem Aufnahmebereich angeordneten Gegenstands reflektiert wird, und mit wenigstens einer Kamera für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen auf einem Bildsensor hervorgerufen wird.

**[0002]** Eine derartige Vorrichtung ist aus der US 5 106 183 A bekannt. Dort wird vorgeschlagen, die Topografie der Oberfläche eines Gegenstands zu vermessen, indem auf der Oberfläche des Gegenstands hervorgerufene Reflexionen von Leuchtdioden, die auf der Innenseite eines Kugeloberflächenabschnitts angeordnet sind, mit einem Fotodetektor erfasst und einer Auswertung unterzogen werden.

**[0003]** Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands bereitzustellen und ein Verfahren für das Vermessen einer solchen Topografie anzugeben, mit dem sich unterschiedliche lokale Oberflächenkrümmungen mit hoher Auflösung präzise erfassen lassen.

**[0004]** Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung die lokalen Krümmungsverläufe von optisch wirksamen Flächen mit einer Genauigkeit von mehr als 210 dpt aufzulösen.

**[0005]** Diese Aufgabe wird mit den Ansprüchen 1, 6, 8, 14 und 15 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

**[0006]** Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, in einer Vorrichtung der eingangs genannten Art die Punktlichtquellen auf der Mantelfläche eines Polyeders anzuordnen.

**[0007]** Unter einer Punktlichtquelle wird dabei eine Lichtquelle verstanden, deren Ausdehnung so gering ist, dass diese von einem innerhalb des Aufnahmebereichs liegenden Punkt aus gesehen im Wesentlichen punktförmig erscheint, d.h., die auf einen in dem Aufnahmebereich liegenden Punkt bezogen z.B. nur einen Raumwinkel  $\Omega_P$  der Größe  $\Omega_P \leq 0,5\%$  sr oder  $\Omega_P \leq 0,3\%$  sr oder  $\Omega_P \leq 0,1\%$  sr oder bevorzugt der Größe  $\Omega_P \leq 0,05\%$  sr abdeckt.

**[0008]** Unter einem Polyeder wird dabei eine Teilmenge des dreidimensionalen Raumes verstanden, die ausschließlich von geraden Flächen, d.h. Ebenen begrenzt wird. Das Polyeder kann z.B. ein abgestumpfter Ikosaeder, ein Würfel, ein Dodekaeder, ein Ikosaeder, ein 7-Eck Kegelstumpf mit einem Zylinderaufbau, ein 6-Eck Kegelstumpf mit einem Zylinder-Zwischenbau oder ein 9-Eck Kegel mit einem zweiten Kegelstumpf anderer Steigung sein.

**[0009]** Die Punktlichtquellen sind dabei bevorzugt zumindest teilweise als Leuchtdioden ausgebildet. Eine Idee der Erfindung ist es insbesondere, für die Punktlichtquellen hier eine Leiterplatte oder eine mehrere Leiterplatten umfassende Tragestruktur vorzusehen.

**[0010]** Unter einer Leiterplatte, auch Platine genannt, wird dabei vorliegend eine als plattenförmiger Träger ausgebildete Flachbaugruppe für das Aufnehmen von elektrischen und/oder elektronischen Bauteilen verstanden. Auf einer solchen Flachbaugruppe können diese Bauteile frei verdrahtet werden oder in einer bevorzugten Ausführungsform an in elektrisch isolierendem Material festhaftende, leitende Verbindungen angeschlossen werden. Der plattenförmige Träger der Flachbaugruppe ist z.B. aus dem Material FR2, FR3, CEM1, CEM3 oder FR4 hergestellt.

**[0011]** Leuchtdioden in Form von SMDs werden üblicherweise in Bestückungsautomaten auf Leiterplatten montiert. Die gängigen Bestückungsautomaten ermöglichen dabei das definierte Positionieren von Leuchtdioden auf einer Leiterplatte mit einer Positioniergenauigkeit, die im Bereich von 0,001 mm bis 0,01 mm liegt und z.B. mit einem CAD-Programm exakt vorgegeben werden kann.

**[0012]** Im Rahmen der Erfindung ist es grundsätzlich allerdings auch möglich, dass die Punktlichtquellen wenigstens teilweise als das in der Polyederoberfläche angeordnete Ende eines Lichtleiters ausgebildet sind.

**[0013]** Die Erfindung schlägt insbesondere vor, dass die Punktlichtquellen auf der Mantelfläche wenigstens teilweise auf ein gemeinsames Zentrum aufweisenden konzentrischen Kreislinien liegen. Eine Idee der Erfindung ist es dabei auch, dass zueinander benachbarte Punktlichtquellen auf der Mantelfläche des Polyeders auf gekrümmten Kurven liegen, die von dem gemeinsamen Zentrum ausgehen.

**[0014]** Für das Vermeiden von störenden Lichtreflexen ist es von Vorteil, wenn zwischen den Punktlichtquellen ein Licht in dem Wellenlängenbereich des Lichts der Punktlichtquellen absorbierendes Material angeordnet ist.

**[0015]** Eine Idee der Erfindung besteht auch darin, zwischen der Kamera und dem Aufnahmebereich eine Optikbaugruppe positiver oder negativer Brechkraft anzuordnen, die als Feldlinse wirkt und dazu dient, das Licht der Punktlichtquellen zu einem in dem Aufnahmebereich angeordneten Gegenstand zu lenken und das an dem Gegenstand reflektierte Licht der Kamera zuzuführen.

**[0016]** Die Erfinder haben erkannt, dass wenn die Punktlichtquellen von jedem innerhalb des Aufnahmebereichs liegenden Punkt aus gesehen über einen Raumwinkel  $\Omega$  verteilt sind, der folgender Beziehung genügt:  $\Omega \geq \pi$  sr, vorzugsweise  $\Omega \geq 90\% \times 2\pi$  sr, optisch wirksame Flächen vermessen werden können, die um bis zu  $45^\circ$  in Bezug auf eine Vorzugsrichtung geneigt sind.

**[0017]** Ein Raumwinkel von 1 sr (Steradian) umschließt auf der Fläche einer Kugel mit 1 m Radius eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$ . Der Raumwinkel einer gesamten Kugel beträgt deshalb  $4\pi \text{ m}^2/\text{m}^2 = 4\pi$  sr.

**[0018]** Indem die Position des Aufnahmebereichs in Bezug auf die Lage der Punktlichtquellen in der Vorrichtung eingestellt werden kann, ist es möglich, den von einem jeden einzelnen Punkt in dem Aufnahmebereich gesehenen Raumwinkel zu variieren und das Auflösungsvermögen der Vorrichtung an die Krümmungen einer zu vermessenden optisch wirksamen Fläche anzupassen. Für das Einstellen der Position des Aufnahmebereichs ist es günstig, wenn dieser in Bezug auf die Kamera quer zu einer optischen Achse oder parallel zu der optischen Achse des optischen Abbildungssystems der Kamera verlagert werden kann.

**[0019]** Von Vorteil ist es, wenn die wenigstens eine Kamera ein optisches Abbildungssystem aufweist, das eine den Aufnahmebereich durchsetzende optische Achse hat.

**[0020]** Eine Idee der Erfindung besteht insbesondere darin, die Punktlichtquellen in der Vorrichtung so anzuordnen, dass deren Anzahl in einem Raumwinkelement um einen auf der optischen Achse liegenden Punkt, das in einem Kugelkoordinatensystem, dessen Ursprung in dem Punkt liegt und das einen auf der optischen Achse liegenden zu der Kamera weisenden Nordpol hat, bei dem Polarwinkel  $\theta$  und dem Azimutwinkel  $\varphi$  angeordnet ist, mit zunehmendem Polarwinkel  $\theta$  abnimmt.

**[0021]** Außerdem ist es eine Idee der Erfindung, die Punktlichtquellen in der Vorrichtung so anzuordnen, dass die Anzahl der Punktlichtquellen in einem Raumwinkelement um einen auf der optischen Achse liegenden Punkt, das in einem Kugelkoordinatensystem, dessen Ursprung in dem Punkt liegt und das einen auf der optischen Achse liegenden zu der Ka-

mera weisenden Nordpol hat, bei dem Polarwinkel  $\theta$  und dem Azimutwinkel  $\varphi$  angeordnet ist, von dem Azimutwinkel  $\varphi$  im Wesentlichen unabhängig ist.

**[0022]** Für das Vermessen von symmetrischen optisch wirksamen Flächen ist es insbesondere von Vorteil, wenn die Punktlichtquellen zu der optischen Achse asymmetrisch angeordnet sind.

**[0023]** Eine erfindungsgemäße Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands kann auch wenigstens eine weitere Kamera aufweisen, die ein optisches Abbildungssystem mit einer den Aufnahmebereich durchsetzenden optischen Achse hat.

**[0024]** Von Vorteil ist es, in einer Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands eine Messeinrichtung für das Ermitteln der Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche eines in der Einrichtung zum Positionieren angeordneten Gegenstands in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem vorzusehen. Damit ist es möglich, aus einer auf dem Bildsensor der Kamera in der Vorrichtung erfassten Helligkeitsverteilung die Topografie der zu vermessenden Fläche mittels Integration zu berechnen.

**[0025]** Von Vorteil ist es insbesondere, wenn das Licht der Punktlichtquellen eine unterschiedliche, vorzugsweise einstellbare Wellenlängenzusammensetzung hat. Damit ist es möglich in der Vorrichtung optisch wirksame Flächen mit einem unterschiedlichen Reflexionsverhalten zu vermessen.

**[0026]** Um die Topografie einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands zu vermessen, schlägt die Erfindung insbesondere folgende Schritte vor: Ermitteln der Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche des Gegenstands. Bereitstellen von Licht aus einer Vielzahl von Punktlichtquellen, das an der zu vermessenden Fläche eines in dem Aufnahmebereich angeordneten Gegenstands reflektiert wird. Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen auf einem Bildsensor hervorgerufen wird. Berechnen der Topografie der Fläche aus der erfassten Lage des wenigstens einen Punktes auf der Fläche des Gegenstands und aus der erfassten Helligkeitsverteilung. Indem dabei die Helligkeitsverteilung für aufeinanderfolgend aktivierte Gruppen von unterschiedlichen Punktlichtquellen erfasst wird, kann die Genauigkeit beim Erfassen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche gesteigert werden.

**[0027]** Eine erfindungsgemäße Vorrichtung eignet sich insbesondere für das Vermessen der Topografie von Brillengläsern in einer Brillenglas-Fertigungseinrichtung, die eine Freiformfläche aufweisen und lokale Oberflächennormalen haben, die in Bezug auf die

optische Achse um bis zu 45° geneigt sind und die mittlere Krümmungsradien  $R$  haben, die in dem Bereich zwischen  $-1000\text{mm} \leq R \leq -50\text{mm}$  und  $+50\text{mm} \leq R \leq +1000\text{mm}$  liegen und dabei einen Glasdurchmesser von bis zu 80 mm haben.

**[0028]** Eine Idee der Erfindung ist es auch, mit einer vorstehend angegebenen Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands die Topografie von Brillengläsern zu vermessen und die dabei erfassten Abweichungen gegenüber einer Sollform an eine Einrichtung für das Bearbeiten von Brillengläsern zu übermitteln. Die Sollform von entsprechenden Brillengläsern ist dabei vorteilhafter Weise in einer an dem Brillenglas oder einem Trägersystem für das Brillenglas angeordneten RFID-Einheit abgelegt oder in einer Permanentmarkierung auf dem Brillenglas abgespeichert.

**[0029]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der in der Zeichnung in schematischer Weise dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert.

**[0030]** Es zeigen:

**[0031]** Fig. 1 eine Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer Brillenlinse mit Punktlichtquellen;

**[0032]** Fig. 2 eine Teilansicht der Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer Brillenlinse;

**[0033]** Fig. 3 ein Brillenglas in der Vorrichtung;

**[0034]** Fig. 4 eine Gruppe von aktivierten Punktlichtquellen in der Vorrichtung;

**[0035]** Fig. 5 bis Fig. 13 unterschiedliche Polyeder mit einer Mantelfläche für das Anordnen von Punktlichtquellen in einer Vorrichtung für das Vermessen der Topografie eines Gegenstands;

**[0036]** Fig. 14 eine Vorrichtung für das Vermessen der Topografie der Hornhaut eines menschlichen Auges;

**[0037]** Fig. 15 ein Spektrum der Absorption und Eindringtiefe von Licht in Wasser und Oxyhämoglobin;

**[0038]** Fig. 16 eine Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer Brillenlinse mit einer Feldlinse;

**[0039]** Fig. 17 eine Vorrichtung für das Vermessen der Topografie einer Oberfläche eines Gegenstands mit einer Einrichtung zum Positionieren; und

**[0040]** Fig. 18 eine Vorrichtung für das Vermessen der Topografie eines transparenten Gegenstands mit

einer Einrichtung für das Unterdrücken von Rückreflexen.

**[0041]** Die in der Fig. 1 gezeigte Vorrichtung **10** ist für das Vermessen der Topografie eines Gegenstands in Form eines Brillenglases **12** ausgelegt. Die Vorrichtung **10** hat einen Aufnahmebereich **14**, in der das Brillenglas **12** auf einer Dreipunktauflage **16** angeordnet werden kann. Die Dreipunktauflage **16** ist eine Einrichtung zum Anordnen des Brillenglases **12** in dem Aufnahmebereich **14**. Die Dreipunktauflage **16** hält das Brillenglas **12** an drei Punkten auf einer zu vermessenden optisch wirksamen Fläche **32**. Die Position dieser drei Punkte ist in einem in Bezug auf die Vorrichtung **10** vorrichtungsfesten Koordinatensystem exakt bekannt.

**[0042]** Die Vorrichtung **10** hat eine Vielzahl von Punktlichtquellen **18** in Form von Leuchtdioden (LEDs), die bei Aktivieren Licht im ultravioletten Spektralbereich UV-Licht mit der Wellenlänge  $\lambda \approx 365 \text{ nm}$  emittieren. Diese Leuchtdioden sind als SMDs (surface mounted device) ausgebildet und auf Leiterplatten **20**, **20'**, **20''** angeordnet, die zu einer Trägerstruktur **19** zusammengefügt sind.

**[0043]** In der Vorrichtung **10** sind die Punktlichtquellen **18** auf der Mantelfläche **22** eines Polyeders positioniert. Die aus den Leiterplatten **20**, **20'**, **20''** zusammengefügte Trägerstruktur **19** hat eine gekantete Form und weist deshalb eine große Schwingungsstabilität auf. In der Vorrichtung **10** begrenzt die Mantelfläche **22** einen dreidimensionalen Halbraum **23**, der einen offenen Rand **25** hat. UV-Licht mit der Wellenlänge  $\lambda \approx 365 \text{ nm}$  wird in dem Glasmaterial handelsüblicher Brillengläser aus Kunststoff absorbiert. Damit wird erreicht, dass das Licht der Punktlichtquellen **18** an der der optisch wirksamen Fläche **20** eines Brillenglases **12** in dem Aufnahmebereich **14** gegenüberliegenden optisch wirksamen Fläche **50** keine Reflexionen hervorruft.

**[0044]** Um in der Vorrichtung **10** Brillengläser aus Quarzglas zu vermessen, ist es erforderlich, dass die Punktlichtquellen **18** Licht generieren, für dessen Wellenlänge  $\lambda$  gilt:  $\lambda \leq 300\text{nm}$ . Mit Licht dieser Wellenlänge lassen sich störende Reflexionen von der Rückseite eines Brillenglases unterbinden.

**[0045]** In der Vorrichtung **10** können grundsätzlich auch metallische Oberflächen sowie lackierte Oberflächen vermessen werden, wobei in diesem Fall das Licht der Punktlichtquellen günstiger Weise im sichtbaren Spektralbereich liegt. Für das Vermessen von rauen Oberflächen, für deren Rauheit  $R_z$  gilt:

$$R_z > 1 \mu\text{m}$$

ist es von Vorteil, wenn die Punktlichtquellen **18** Licht aussenden, das im infraroten Spektralbereich liegt,

für das solche Oberflächen eine Spiegelwirkung haben.

**[0046]** Die Vorrichtung **10** enthält eine Kamera **24** mit einem eine Blende **27**, eine Objektivlinse **25** und ein UV-Sperrfilter **29** aufweisenden optischen Abbildungssystem **26**. Das optische Abbildungssystem **26** hat eine den Aufnahmebereich **14** durchsetzende optische Achse **28**. Die Kamera **24** ist auf der dem Aufnahmebereich **14** abgewandten Seite der Trägerstruktur **19** mit den Leiterplatten **20** angeordnet. Sie erfasst ein in dem Aufnahmebereich **14** angeordnetes Brillenglas **12** durch eine Ausnehmung **30** in der Leiterplatte **20** der Trägerstruktur **19**.

**[0047]** Die Kamera **24** dient für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche **32** reflektierten Licht der Punktlichtquellen **18** auf einem Bildsensor **34** hervorgerufen wird. Das Licht von einer Punktlichtquelle **18** gelangt mit dem Lichtstrahl **19** auf die Fläche **32** des in dem Aufnahmebereich **14** angeordneten Brillenglases **12**. An dem Punkt **31** mit den Koordinaten  $(X_S, Y_S, Z_S)$  wird das Licht mit dem Einfallswinkel  $\beta_E$  in Bezug auf die Oberflächennormale  $\vec{n}$  gemäß dem Reflexionsgesetz unter dem Ausfallswinkel  $\beta_A = \beta_E$  reflektiert.

**[0048]** Die Helligkeitsverteilung auf dem Bildsensor **34** enthält damit die Information der Neigung der Tangentialebenen an der zu vermessenden Fläche **32** des Brillenglases **12** an denjenigen Stellen, an denen das Licht der Punktlichtquellen **18** so reflektiert wird, dass es die Kamera **24** einfängt.

**[0049]** Das Abbildungssystem **26** der Kamera **24** ist so eingestellt, dass eine auf dem Bildsensor **34** erfasste Helligkeitsverteilung durch die Ausnehmung **30** keine Vignettierung erfährt und die Schärfentiefe so groß ist, dass die Helligkeitsverteilungen für in der Vorrichtung **10** vermessene optisch wirksame Flächen von Brillengläsern **12**, die unterschiedliche Oberflächentopografien haben, auf dem Bildsensor **34** aufgelöst werden können.

**[0050]** Die Anordnung der Punktlichtquellen **18** auf der Trägerstruktur **19** in der Vorrichtung **10** gewährleistet, dass die Topografie einer optisch wirksamen Fläche **32** mit guter Auflösung vermessen werden kann, auch wenn diese in Bezug auf die optische Achse **28** der Kamera **24** unter einem Winkel von bis zu  $45^\circ$  geneigt ist. Das Licht der Punktlichtquellen **18** wird dann nämlich so reflektiert, dass es dem Bildsensor **34** in der Kamera **24** zugeführt wird.

**[0051]** Die Trägerstruktur **19** in der Vorrichtung **10** hat eine mit der optischen Achse **28** der Kamera **24** fluchtende Symmetrieachse. Ein für das Vermessen in dem Aufnahmebereich **14** angeordnetes Brillenglas **12** ist in der Vorrichtung **10** in Bezug auf die optische Achse **28** mechanisch zentriert. Es ist allerdings

zu bemerken, dass ein Brillenglas **12** in der Vorrichtung **10** grundsätzlich auch in Bezug auf die optische Achse **28** mit einer Ablage angeordnet werden kann. Dies kann z.B. für Brillengläser von Vorteil sein, die keinerlei Rotationssymmetrie aufweisen.

**[0052]** In der Vorrichtung **10** ist der Durchmesser der Öffnung des Randes **25** des Halbraumes **23** in etwa 5-mal bis 7-mal so groß wie der Durchmesser des Bildfeldes BF. Der maximale Ablenkwinkel  $\gamma = \beta_A + \beta_E$  für einen Lichtstrahl **35** von einer Punktlichtquelle **18**, der in der Vorrichtung **10** mit der Kamera **24** erfasst werden kann, ist bestimmt durch den minimalen Krümmungsradius  $R_{min}$  einer Fläche **20** und der Größe der Bildfeldes BF der Kamera **24**:

$$\gamma = 2 \sin^{-1} \frac{BF}{2 R_{min}}$$

**[0053]** Dies bedeutet z.B., dass abhängig von der Größe des Bildfeldes BF in der Vorrichtung **10** insbesondere die Topografie von Flächen mit folgendem minimalen Krümmungsradius  $R_{min}$  erfasst werden kann:

BF (mm)	$R_{min}$ (mm)
5	4
10	7
30	21
50	35
100	71

**[0054]** Die Rechneinheit **36** ist eine Einrichtung für das Aktivieren von unterschiedlichen Punktlichtquellen **18** und das Erfassen der Helligkeitsverteilung für die Punktlichtquellen **18**. Für das Auswerten einer mit dem Bildsensor **34** in der Kamera **24** erfassten Helligkeitsverteilung gibt es in der Vorrichtung **10** eine Rechneinheit **36** mit einem Computerprogramm. Das Computerprogramm berechnet für einen mit der Kamera **24** auf dem Bildsensor **34** erfassten Lichtstrahl **35'** von einem Punkt P auf der optisch wirksamen Fläche **20** des in dem Aufnahmebereich **16** angeordneten Brillenglases **12** und den bekannten Positionen der Punktlichtquellen **18** in der Vorrichtung **10** die Oberflächennormale  $n_P$  an diesem Punkt. Durch Integration und Interpolation wird dann anhand der bekannten Koordinaten der Punkte der Fläche **20** in der Dreipunktauflage **16** für die zu der Fläche **20** in der Vorrichtung **10** aufgrund von Reflexionen des Lichts der Punktlichtquellen **18** an dieser Fläche erfassten Oberflächennormalen  $n_P$  in einer Rechneinheit **36** die Topografie der Fläche **20** berechnet. Das hierzu hierfür verwendete Computerprogramm in der Rechneinheit **36** ermöglicht dabei auch das Berechnen der lokalen Brechkräfte der optisch wirksa-

men Fläche **20** aus den ermittelten Oberflächennormalen  $n_p$  bzw. aus der berechneten Topografie.

**[0055]** Auf der Trägerstruktur **19** mit den Leiterplatten **20** sind etwa 2000 Punktlichtquellen **18** in Form von Leuchtdioden angeordnet. Es sei bemerkt, dass die entsprechenden Punktlichtquellen **18** nicht zwingend als Leuchtdioden ausgebildet sein müssen, sondern grundsätzlich auch z.B. als das Ende eines Lichtleiters gestaltet sein können, in den das Licht einer Lichtquelle eingekoppelt wird. Darüber hinaus sei bemerkt, dass die Trägerstruktur für die Punktlichtquellen in der Vorrichtung **10** insbesondere auch eine Lochmaske sein kann, der eine oder mehrere Hintergrundbeleuchtungen zugeordnet sind.

**[0056]** Die Punktlichtquellen **18** auf der Trägerstruktur **19** sind ungleichmäßig verteilt. Sie definieren ein Gitternetz mit dem Ort der Punktlichtquellen **18** entsprechenden Gitterpunkten, das zu der optischen Achse **28** der Kamera **24** asymmetrisch ist. D.h., das Gitternetz der Punktlichtquellen **18** hat keinerlei Symmetrie in Bezug auf die optische Achse **28**. Es ist weder spiegelsymmetrisch zu der Achse **28** noch kann es durch Rotation um einen Drehwinkel  $\omega < 2\pi$  um die Achse **28** weder in sich selbst noch teilweise in sich selbst überführt werden. Damit kann die Gesamtgenauigkeit der Messergebnisse für eine in der Vorrichtung **10** erfasste Topografie einer optisch wirksamen Fläche **20** erhöht werden, da sich auf diese Weise durch eine Apparatekonstante bedingte räumliche Eigenfrequenzen einer auf dem Bildsensor **26** der Kamera **24** hervorgerufenen Helligkeitsverteilung unterdrücken lassen.

**[0057]** Die Fig. 2 zeigt eine Teilansicht der Vorrichtung **10**. Auf den Leiterplatten **20**, **20'** der Trägerstruktur sind die Punktlichtquellen **18** jeweils auf konzentrischen Kreislinien **38** angeordnet. Die Kreislinien **38** einer einzelnen Leiterplatte **20** weisen dabei ein gemeinsames Zentrum **40** auf. In Bezug auf das gemeinsame Zentrum **40** der Kreislinien **38** für die Anordnung der Punktlichtquellen **18** auf einer Leiterplatte **20** liegen hier zueinander benachbart angeordnete Punktlichtquellen **18'**, **18''**, die auf verschiedenen Kreislinien **38'**, **38''** positioniert sind, auf einer Geraden **42**, die von dem gemeinsamen Zentrum **40** der Kreislinien **38** eine Ablage A hat.

**[0058]** Die Fig. 1 zeigt, dass die Anzahl der Punktlichtquellen **18** in einem Raumwinkelelement **44** der Einheitskugel mit den Raumwinkelkoordinaten  $\theta$  (Polarwinkel),  $\varphi$  (Azimutwinkel) in einem Kugelkoordinatensystem **47**, dessen Ursprung in dem Punkt **46** auf der optischen Achse **28** der Kamera **24** liegt und das einen auf der optischen Achse **28** liegenden zu der Kamera **24** weisenden Nordpol **48** hat, mit zunehmendem Polarwinkel  $\theta$  abnimmt.

**[0059]** Demgegenüber ist die Anzahl der Punktlichtquellen **18** in einem Raumwinkelelement **44** um einen auf der optischen Achse **28** liegenden Punkt **46**, das in einem Kugelkoordinatensystem **48**, dessen Ursprung in dem Punkt **46** liegt und das einen auf der optischen Achse **28** liegenden zu der Kamera **24** weisenden Nordpol **48** hat, das bei dem Polarwinkel  $\theta$  und dem Azimutwinkel  $\varphi$  angeordnet ist, von dem Azimutwinkel  $\varphi$  im Wesentlichen unabhängig.

**[0060]** Die Fig. 3 zeigt das Brillenglas **12** in dem Bildfeld **43** der Vorrichtung **10** in einer Draufsicht. Um in der Vorrichtung **10** die Oberflächennormalen an  $N^2$  zueinander äquidistant angeordneten Stützstellen **50** einer in dem Aufnahmebereich **14** angeordneten optisch wirksamen Fläche **32** eines Brillenglases **12** mit dem Krümmungsradius  $R$  zu bestimmen, ist es erforderlich, dass das durch die Zentralprojektion der an der Trägerstruktur **19** aufgenommenen Punktlichtquellen **18** auf eine um den Punkt **46** auf dem Brillenglas **12** aufgespannten Hemisphäre **49** mit dem Radius  $R_H$  den folgenden stand  $d(\theta)$  haben:

$$d(\theta) \cong \frac{R_H \cdot 2\theta}{N} \leq \frac{R_H \cdot 4}{N} \sin^{-1} \frac{BF}{2R}$$

**[0061]** In der Vorrichtung **10** ist die Anordnung der Punktlichtquellen **18** auf eine vorgegebene Anzahl von Stützstellen abgestimmt, indem in dem Inneren der Hemisphäre der Abstand  $d(\theta)$  reduziert ist und nach außen kontinuierlich zunimmt.

**[0062]** Mit einer dem in der vorstehenden Formelbeziehung angegebenen Abstand  $d(\theta)$  entsprechenden Beabstandung von Punktlichtquellen **18** in der Vorrichtung **10** kann so gegenüber einer äquidistanten Anordnung von Punktlichtquellen **18** die Topografie einer gekrümmten optisch wirksamen Fläche **20** eines Brillenglases **12**, die einen vorgegebenen minimalen Krümmungsradius  $R_{\min}$  hat, mit einer um etwa 80% verringerten Anzahl von Punktlichtquellen vermessen werden, ohne dass eine geforderte Mindeststützstellendichte dabei unterschritten wird.

**[0063]** D.h. z.B., dass in einer Vorrichtung **10**, die für das Vermessen der optisch wirksamen Fläche von Brillengläsern ausgelegt ist, deren Krümmungsradien in einem Bereich zwischen 350mm und 35mm liegen und die in dem Inneren eines Durchmessers von 50 mm, also bei einem Bildfeld von  $BF = 50\text{mm}$  mit einem mittleren Stützstellenabstand  $a$  vermessen werden sollen, der den Betrag von 2mm unterschreitet, der auf eine um den optischen Mittelpunkt **46** des Brillenglases aufgespannten Hemisphäre minimale Abstand der Punktlichtquellen mit dem Radius  $R = 300\text{mm}$  bezogene Abstand  $d(\theta)$  so gewählt werden kann, dass die Punktlichtquellen auf lediglich 69 Kreisringen mit einem unterschiedlichen Polarwinkel angeordnet werden müssen.

**[0064]** Mit Punktlichtquellen **18**, die der vorstehenden Abstandsbeziehung genügen, können deshalb in der Vorrichtung **10** unterschiedlich gekrümmte optisch wirksame Flächen von Brillengläsern **12**, die einen gleichen mittleren Krümmungsradius  $R$  haben, an einer gleichbleibenden Anzahl von Stützstellen bzw. bei einer konstanten Stützstellendichte so vermessen werden. Eine solche Anordnung der Punktlichtquellen **18** gewährleistet auch, dass in der Vorrichtung **10** unterschiedlich gekrümmte optisch wirksame Flächen, deren Krümmung einen minimalen Krümmungsradius  $R_{\min}$  nicht unterschreitet, vermessen werden können, ohne dass dabei ein durch die Anordnung der Punktlichtquellen **18** in der Vorrichtung **10** vorgegebener minimaler Stützstellenabstand  $BF/N$  nicht unterschritten wird.

**[0065]** In der Vorrichtung **10** sind die Punktlichtquellen **18** von jedem innerhalb des Aufnahmebereichs **14** liegenden Punkt aus gesehen über einen Raumwinkel  $\Omega$  verteilt, der folgender Beziehung genügt:  $\Omega \geq \pi$  sr, vorzugsweise  $\Omega \geq 1.8 \pi$  sr.

**[0066]** In einer alternativen, modifizierten Ausführungsform der Vorrichtung **10** ist der Aufnahmebereich **14** in Bezug auf die Anordnung der an der Trägerstruktur **19** aufgenommenen Punktlichtquellen **18** verlagerbar ausgeführt. Auf diese Weise ist es möglich, den Raumwinkel  $\Omega$  zu variieren, über den die Punktlichtquellen **18** von innerhalb des Aufnahmebereichs **14** liegenden Punkten aus gesehen, verteilt sind.

**[0067]** Die Fig. 4 zeigt eine Gruppe **51** von aktivierten Punktlichtquellen **18** in der Vorrichtung **10**. Abhängig von der Topografie der optisch wirksamen Fläche **20** des Brillenglases **12** werden die auf der Trägerstruktur **19** angeordneten Punktlichtquellen **18** mit einem unterschiedlichen Abbildungsmaßstab auf dem Bildsensor **26** der Kamera **24** abgebildet. Wenn die Fläche **20** einen geringen Krümmungsradius hat, werden die entsprechenden Punktlichtquellen mit einem Abbildungsmaßstab erfasst, der kleiner ist als der Abbildungsmaßstab für den Fall einer optisch wirksamen Fläche **20**, die einen entsprechend größeren Krümmungsradius aufweist. Je nach dem Fokuszustand der Kamera **24** und deren Auflösung kann es dann vorkommen, dass sich die Intensitätsverteilungen von zwei an der Trägerstruktur **19** zueinander benachbart angeordneten Punktlichtquellen **18** auf dem Bildsensor **26** überlappen, so diese auch mittels Bildverarbeitung und Signalauswertung nicht mehr zuverlässig voneinander getrennt werden können.

**[0068]** Um das Zuordnen von einzelnen Bereichen der auf dem Bildsensor **26** der Kamera **24** erfassten Helligkeitsverteilung zu den Punktlichtquellen **18** der Vorrichtung **10** zu erleichtern, ist es von Vorteil, die Punktlichtquellen **18** für das Vermessen der Fläche **20** von einem Brillenglas aufeinanderfolgend in

unterschiedlichen Gruppen zu aktivieren. Bevorzugt bestehen diese Gruppen aus Punktlichtquellen, die auf einer Leiterplatte **20**, **20'** auf einem gemeinsamen Ring in Form einer Kreislinie **38** liegen, oder aus Punktlichtquellen **18**, die auf einer das gemeinsame Zentrum **40** der Kreislinien **38** durchsetzenden Arm in Form einer Bogenlinie **52** positioniert sind.

**[0069]** D.h., die Punktlichtquellen **18** werden in Gruppen von Ringen und Armen aktiviert. So können z.B. nur die Punktlichtquellen **18** auf jedem zweiten oder jedem vierten Ring und/oder Arm eingeschaltet werden. Dadurch ist es möglich ein Überlappen der Intensitätsverteilungen zu vermeiden. Um in der Vorrichtung **10** trotzdem alle Punktlichtquellen **18** zu nutzen, werden darin die zueinander benachbart angeordneten Punktlichtquellen nacheinander eingeschaltet und es wird dann jeweils ein separates Bild auf dem Bildsensor **26** der Kamera **24** erfasst. Wenn etwa nur jede vierte Punktlichtquelle **18** in der Anordnung der Punktlichtquellen **18** gleichzeitig aktiviert wird, bedarf es einer Aufnahmesequenz mit vier Aufnahmen, um die in der Vorrichtung **10** erfassbare vollständige Information der Helligkeitsverteilung des Lichts von allen Punktlichtquellen **18** zu erhalten, die Reflektionen von Licht an der zu vermessenden optisch wirksamen Fläche **20** eines Brillenglases **12** hervorrufen.

**[0070]** Es sei bemerkt, dass die an der Trägerstruktur **19** aufgenommenen Punktlichtquellen **18** in der Vorrichtung **10** alternativ oder zusätzlich auch in einem nach Längenkreisen und Breitenkreisen getrennten Organisationprinzip einer auf den optischen Mittelpunkt **49** eines in dem Aufnahmebereich **14** angeordneten Brillenglases **12** bezogenen Hemisphäre **51** angesteuert werden können. Dieses Organisationsprinzip für das alternierende Ansteuern von Punktlichtquellen **18** in der Vorrichtung **10** ist vorteilhaft, wenn die zu vermessende optisch wirksame Fläche **20** keine bevorzugte Raumrichtung hat, in welche sie die von den Punktlichtquellen **19** erzeugten Lichtstrahlen reflektiert, wie das z.B. bei einem Flachspiegel der Fall ist. Dieses Organisationsprinzip für das Ansteuern der Punktlichtquellen **19** vereinfacht ein Adressieren der einzelnen Punktlichtquellen **18** für die Steuerung.

**[0071]** Um bei einer vorgegebenen Dynamik des Bildsensors **26** in der Kamera **24** die Intensität der von einer optisch wirksamen Fläche **20** eines in der Vorrichtung **10** angeordneten Brillenglases **12** reflektierten Lichtstrahles der Punktlichtquelle **18** für unterschiedliche Reflektionseigenschaften der optisch wirksamen Fläche einstellen zu können, ist es möglich, die Intensität des Lichts der Punktlichtquellen **18** mittels Pulslängen und/oder Pulsweitenmodulation mittels der Rechneinheit **36** bei Bedarf zu variieren.

**[0072]** Um die Vorrichtung **10** für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche **20** zu kalibrieren, wird in dieser bevorzugt die Helligkeitsverteilung auf dem Bildsensor **26** der Kamera **24** zu verschiedenen Kalibrierobjekten erfasst, z.B. von Kalibrierobjekten in der Form von polierten Sphären, die einen genau bekannten unterschiedlichen Radius haben.

**[0073]** Für das Vermessen in der Vorrichtung **10** der optisch wirksamen Fläche **50** auf der Rückseite des Brillenglases **12**, muss das Brillenglas in der Dreipunktauflage **16** grundsätzlich umgedreht werden.

**[0074]** In einer modifizierten Ausführungsform für die Vorrichtung **10** ist deshalb vorgesehen, dass der Aufnahmebereich **14** mit der Dreipunktauflage **16** in der Richtung der optischen Achse **28** der Kamera **24** verlagert werden kann. Indem der Abstand  $D$  des Aufnahmebereichs **14** von der Kamera **24** verändert wird, ist es möglich, die Anordnung von einem Brillenglas **12** für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche in der Vorrichtung **10** auf die Oberflächenkrümmung der zu vermessenden Fläche abzustimmen.

**[0075]** Wenn die zu vermessende Fläche bei einem Brillenglas große Krümmungsradien aufweist, ist es z.B. von Vorteil, wenn sich das Brillenglas **12** mit einem großen Abstand von der Kamera **24**, gegebenenfalls außerhalb des von der Trägerstruktur **19** aufgespannten Halbraumes befindet.

**[0076]** Wenn die zu vermessende optisch wirksame Fläche bei dem Brillenglas **12** dagegen vergleichsweise kleine Krümmungsradien hat, ist es günstig, wenn das entsprechende Brillenglas weit innerhalb des von der Trägerstruktur **19** definierten Halbraumes **23** positioniert ist.

**[0077]** Es sei bemerkt, dass in einer modifizierten Ausführungsform der Vorrichtung **10** zwei oder auch mehrere Kameras vorgesehen sein können, um die Reflektionen des Lichts der Punktlichtquellen an einer optisch wirksamen Fläche eines Gegenstands in unterschiedlichen Blickrichtungen zu erfassen. Diese Maßnahme ermöglicht insbesondere das genaue Bestimmen der räumlichen Position von ausgewählten Punkten auf der optisch wirksamen Fläche des Gegenstands.

**[0078]** Darüber hinaus sei bemerkt, dass das Messprinzip der Vorrichtung **10** grundsätzlich auch ermöglicht, die beiden optisch wirksamen Flächen auf der vorder- und Rückseite bei einem Brillenglas **12** gleichzeitig zu vermessen. Hierfür wird die in der **Fig. 1** gezeigte Vorrichtung **10** um eine weitere, eine Vielzahl von Punktlichtquellen aufnehmende Trägerstruktur mit Punktlichtquellen ergänzt und mit einer weiteren Kamera für das Erfassen der Helligkeits-

verteilung von dem auf der Rückseite des Brillenglases reflektierten Licht der entsprechenden Punktlichtquellen versehen. Die Punktlichtquellen sind hier für das Vermessen von optisch wirksamen Flächen eines Gegenstands, wie z.B. eines Brillenglases auf einer Mantelfläche angeordnet, die einen geschlossenen Vollraum umgibt, in dem der entsprechende Gegenstand angeordnet wird.

**[0079]** Die **Fig. 5** bis **Fig. 13** zeigen Beispiele für Polyeder, die eine für das Aufnehmen von Punktlichtquellen in einer Vorrichtung für das Vermessen der Topografie eines Gegenstands geeignete Mantelfläche haben.

**[0080]** Das in der **Fig. 5** gezeigte Polyeder **100** ist aus 7 regelmäßigen 5-Ecken gebildet, die an **10** miteinander verbundene regelmäßige 6-Ecke angefügt sind. Die Mantelfläche des Polyeders **100** begrenzt einen Vollraum. Das Polyeder **102** in der **Fig. 6** ist eine Pyramide mit einer Mantelfläche **103**, die einen Halbraum begrenzt, der einen offenen Rand **101** hat. Das Polyeder **104** in der **Fig. 8** ist als ein abgestumpfter Ikosaeder mit einer einen Vollraum begrenzenden Mantelfläche ausgeführt. Die **Fig. 7** zeigt ein als Würfel ausgebildetes Polyeder **106** mit einer Mantelfläche, die einen Vollraum begrenzt. In der **Fig. 9** ist ein Polyeder **108** in Form eines Dodekaeders mit einer Mantelfläche gezeigt, die ebenfalls einen Vollraum begrenzt. In der **Fig. 10** ist als Polyeder ein Ikosaeder **110** abgebildet. Die **Fig. 11** zeigt als Polyeder **112** einen 7-Eck Kegelstumpf mit einem Zylinderaufbau. Das Polyeder **112** hat eine Mantelfläche, die einen geöffneten Halbraum mit dem Rand **113** umgibt. In der **Fig. 12** ist als Polyeder **114** ein 6-Eck Kegelstumpf mit einem Zylinder-Zwischenbau und einem geöffneten Halbraum, der einen Rand **115** aufweist, gezeigt. Die **Fig. 13** zeigt als Polyeder **116** einen 9-Eck Kegel mit einem zweiten Kegelstumpf anderer Steigung, dessen Mantelfläche einen Vollraum definiert.

**[0081]** Die **Fig. 14** zeigt eine Vorrichtung **210** für das Vermessen der Topografie von Strukturen an einem menschlichen Auge **202**. Funktion und Aufbau der Vorrichtung **200** entsprechen grundsätzlich dem Aufbau der vorstehend anhand der **Fig. 1** bis **Fig. 4** beschriebenen Vorrichtung **10**. Soweit die Baugruppen der Vorrichtung **200** den Baugruppen der Vorrichtung **10** entsprechen, sind diese in der **Fig. 14** mit um die Zahl **200** erhöhten Zahlen als Bezugszeichen kenntlich gemacht.

**[0082]** Die Vorrichtung **210** hat einen Aufnahmebereich **214** für das Anordnen des Auges **202** eines Patienten. Die Vorrichtung **210** enthält eine Referenzereinrichtung (nicht gezeigt), die es ermöglicht, die Lage des Scheitelpunkts **203** der Hornhaut **205** des Auges **202** in Bezug auf ein zu der Kamera **224** festes Koordinatensystem **207** zu erfassen. Eine sol-



che Referenziereinrichtung kann z.B. ein OCT-System enthalten, wie es etwa in der EP 1 918 754 B1 in den Absätzen [0004] bis [0007] unter Hinweis auf die US 5,321,501 und die WO 2006/10544 A1 beschrieben ist, auf die hiermit vollumfänglich Bezug genommen wird.

**[0083]** Anders als in der Vorrichtung **10** sind die Punktlichtquellen **218** in der Vorrichtung **210** auf einer als Hemisphäre **219** ausgebildeten Trägerstruktur positioniert. Zu bemerken ist allerdings, dass die Vorrichtung **210** in einer alternativen Ausführungsform grundsätzlich auch eine Trägerstruktur für das Aufnehmen von Punktlichtquellen **218** aufweisen kann, an der die Punktlichtquellen auf der Mantelfläche eines Polyeders angeordnet sind.

**[0084]** Die Punktlichtquellen **218** sind für das Erzeugen von Licht in voneinander getrennten unterschiedlichen schmalbandigen Wellenlängenbereichen ausgelegt, z.B. einem Wellenlängenbereich bei der Wellenlänge  $\lambda_1 = 400\text{nm}$ , der Wellenlänge  $\lambda_2 = 488\text{ nm}$ , der Wellenlänge  $\lambda_3 = 514\text{nm}$ , der Wellenlänge  $\lambda_4 = 632\text{nm}$ , der der Wellenlänge  $\lambda_5 = 1150\text{nm}$  und/oder der Wellenlänge  $\lambda_6 = 3390\text{nm}$ .

**[0085]** Die Fig. 15 zeigt mit den Kurven **211** und **213** das wellenlängenabhängige Spektrum der Absorption  $A(\lambda)$  und der Eindringtiefe  $P(\lambda)$  von Licht in die Substanzen Wasser und Oxyhämoglobin. Wie aus der Fig. 15 zu sehen ist, liegen die vorstehend angegebenen Wellenlängenbereiche in der Nähe von lokalen Extrema der Kurven **207** und **209**. Mit der Vorrichtung **210** ist es damit möglich, nicht nur die Topografie der Hornhaut **205** des Auges **202** eines Patienten zu vermessen, sondern auch Strukturen **211** zu erfassen, die in dem Inneren des Auges **202** liegen.

**[0086]** Mit einer geeigneten Auswahl der Wellenlänge des mittels der Punktlichtquellen **218** erzeugten Lichts ist es möglich, optisch wirksame Flächen von Grenzschichten zu vermessen, die sich in dem Inneren eines Messobjekts befinden.

**[0087]** Wellenlängen von Licht im kurzwelligen Bereich eignen sich z.B. für das Vermessen der Oberfläche der Kornea (Hornhaut). Mit Licht einer Wellenlänge, bei der die Kornea transparent, das Kammerwasser jedoch intransparent ist, können dagegen Strukturen in dem Inneren eines menschlichen Auges oder dem Auge eines Tiers vermessen werden, weil wie in der Fig. 15 zu sehen ist, die Absorptionskante von Wasser im infraroten Spektralbereich liegt.

**[0088]** Für das Vermessen entsprechender Strukturen mit unterschiedlichen Wellenlängen von Licht ist es von Vorteil, wenn der Bildsensor **234** der Kamera **224** in dem Wellenlängenbereich 350 nm bis 1050 nm eine gute Empfindlichkeit hat.

**[0089]** Die Fig. 16 zeigt eine Vorrichtung **310** für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche **320** eines Brillenglases **312**. Funktion und Aufbau der Vorrichtung **300** entsprechen grundsätzlich dem Aufbau der vorstehend anhand der Fig. 1 bis Fig. 4 beschriebenen Vorrichtung **10**. Soweit die Baugruppen der Vorrichtung **310** den Baugruppen der Vorrichtung **10** entsprechen, sind diese in der Fig. 16 mit um die Zahl **300** erhöhten Zahlen als Bezugszeichen kenntlich gemacht.

**[0090]** Anders als in der Vorrichtung **10** sind die Punktlichtquellen **318** in der Vorrichtung **310** auf einer als Hemisphäre **319** ausgebildeten Trägerstruktur positioniert. Zu bemerken ist allerdings, dass die Vorrichtung **310** in einer alternativen Ausführungsform grundsätzlich auch eine Trägerstruktur für das Aufnehmen von Punktlichtquellen **318** aufweisen kann, an der die Punktlichtquellen auf der Mantelfläche eines Polyeders angeordnet sind.

**[0091]** Die Vorrichtung **310** enthält eine zwischen dem Aufnahmebereich **314** und der Kamera **324** angeordnete Optikbaugruppe positiver Brechkraft in Form einer Feldlinse **316**, die dazu dient, das Licht der Punktlichtquellen **318** zu einem in dem Aufnahmebereich angeordneten Gegenstand **312** zu lenken und das an dem Gegenstand **312** reflektierte Licht der Kamera **324** zuzuführen.

**[0092]** Diese Maßnahme ermöglicht das Erfassen der Topografie einer konkav gekrümmten optisch wirksamen Fläche **320** von Gegenständen wie z.B. Brillengläsern **312** mit einer großen Anzahl von Stützstellen.

**[0093]** Die Fig. 17 zeigt eine Vorrichtung **410** für das Vermessen der Topografie eine optisch wirksamen Fläche **420** eines Gegenstands **412**. Funktion und Aufbau der Vorrichtung **400** entsprechen grundsätzlich dem Aufbau der vorstehend anhand der Fig. 1 bis Fig. 4 beschriebenen Vorrichtung **10**. Soweit die Baugruppen der Vorrichtung **410** den Baugruppen der Vorrichtung **10** entsprechen, sind diese in der Fig. 17 mit um die Zahl **400** erhöhten Zahlen als Bezugszeichen kenntlich gemacht.

**[0094]** Anders als in der Vorrichtung **10** sind die Punktlichtquellen **418** in der Vorrichtung **310** auf einer als Hemisphäre **419** ausgebildeten Trägerstruktur positioniert. Zu bemerken ist allerdings, dass die Vorrichtung **410** in einer alternativen Ausführungsform grundsätzlich auch eine Trägerstruktur für das Aufnehmen von Punktlichtquellen **418** aufweisen kann, an der die Punktlichtquellen auf der Mantelfläche eines Polyeders angeordnet sind.

**[0095]** Für das Vermessen ist der Gegenstand **412** in der Vorrichtung **410** in einer Einrichtung **470** zum Positionieren angeordnet.

**[0096]** Mit der Einrichtung **470** kann der Gegenstand in den drei Raumrichtungen X, Y und Z des Koordinatensystems **471** in Bezug auf die Kamera **424** verlagert werden. Die Vorrichtung **410** enthält eine Messeinrichtung **472** für das Ermitteln der Lage wenigstens eines Punktes **474** auf der Fläche eines Gegenstands in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem **476**. Die Messeinrichtung **470** enthält hierzu bevorzugt lauffzeitbasiertes optisches Abstandsmesssystem. Alternativ oder zusätzlich ist es auch möglich, die Lage eines in der Vorrichtung **410** für das Vermessen angeordneten Gegenstands **412** mittels Laserlicht-Triangulation durch auswerten von chromatischen Längsfehlern, astigmatischen Effekten und oder einer Schärfentiefe zu erfassen. Eine Messeinrichtung **472** für das Ermitteln der Lage eines in der Vorrichtung **410** für das Vermessen angeordneten Gegenstands **412** kann auch ein Messsystem enthalten, das auf dem Gegenstand **412** oder einem Halter für diesen Gegenstand aufgebrachte Zielmarken lokalisiert und deren Lage ermittelt, d.h. deren Positionen vermisst. Diese Zielmarken können z.B. als Permanentgravuren ausgebildet sein, z.B. als Permanentgravuren in einem zu vermessenden Brillenglas, die ein Koordinatensystem für den betreffenden Gegenstand definieren. Solche Zielmarken können allerdings auch Markierungen auf einem Trägersystem sein, z.B. einem Linsenhalter, um damit die exakte Position einer in dem Halter angeordneten Brillenlinse zu erfassen.

**[0097]** Die Fig. 18 zeigt eine weitere Vorrichtung **510** für das Vermessen der Topografie einer optisch wirksamen Fläche **520** eines Brillenglases **512**. Funktion und Aufbau der Vorrichtung **500** entsprechen grundsätzlich dem Aufbau der vorstehend anhand der Fig. 1 bis Fig. 4 beschriebenen Vorrichtung **10**. Soweit die Baugruppen der Vorrichtung **510** den Baugruppen der Vorrichtung **10** entsprechen, sind diese in der Fig. 17 mit um die Zahl **500** erhöhten Zahlen als Bezugszeichen kenntlich gemacht.

**[0098]** Die Vorrichtung **510** enthält eine Einrichtung **580** für das Unterdrücken von Rückreflexen, die das Licht der Punktlichtquellen **518** an der optisch wirksamen Fläche **550** hervorruft. Hierfür ist der Abschnitt des Brillenglases **512** mit der Fläche **550** zum Zwecke des sogenannten Indexmatchings durch eine Membran **582** getrennt in ein Immersionsmedium **584** eingetaucht, z.B. Immersionsmedium in Form eines flüssigen Gemisches aus Wasser und Öl, das einen an die Brechzahl des Brillenglases angepassten Brechungsindex hat. Die Brechzahl der Membran **582** und die Brechzahl des Immersionsmediums sind dabei vorzugsweise identisch.

**[0099]** Zur besseren optischen Ankoppelung der Membran **582** an das Brillenglas **512** ist es von Vorteil, wenn die Membran mit einer leicht flüchtigen und rückstandsfrei verdampfenden Flüssigkeit

benetzt wird, weil auf diese Weise störende Luft einschüsse vermieden werden können.

**[0100]** Es sei bemerkt, dass sich die vorstehend beschriebenen Vorrichtungen grundsätzlich für das Vermessen der Topografie der Oberfläche von beliebigen Messobjekten eignen, deren Oberfläche einen Reflexionsgrad  $R > 50\%$  für das Licht der Punktlichtquellen hat. Entsprechende Messobjekte können insbesondere sein: Optische Elemente in Form von Linsen, Optiken, Sphären und Asphären, Brillengläser, Gleitsichtgläser, metallische Bauteile mit einer glänzenden, insbesondere polierten Oberfläche, lackierte Bauteile sowie Kunststoffbauteile. Darüber hinaus kann mit einer vorstehend beschriebenen Vorrichtung grundsätzlich auch die Topografie eines menschlichen oder tierischen Auges vermessen werden.

**[0101]** Zusammenfassend sind insbesondere folgende bevorzugte Merkmale der Erfindung festzuhalten: Eine Vorrichtung **10** für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung einer optisch wirksamen Fläche **20** eines Gegenstands **12** hat eine Einrichtung **16** zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich **14**, in dem die Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche **20** des Gegenstands **12** in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist. Die Vorrichtung **10** enthält eine Vielzahl von Punktlichtquellen **18**, die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche **20** eines in dem Aufnahmebereich **14** angeordneten Gegenstands **12** reflektiert wird. Die Vorrichtung **10** weist wenigstens eine Kamera **24** für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung auf, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen **18** auf einem Bildsensor **34** hervorgerufen wird. Die Punktlichtquellen sind **18** auf der Mantelfläche **22** eines Polyeders angeordnet.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Vorrichtung
<b>12</b>	Brillenglas
<b>14</b>	Aufnahmebereich
<b>16</b>	Dreipunktauflage
<b>18, 18', 18''</b>	Punktlichtquellen
<b>19</b>	Trägerstruktur
<b>20, 20', 20''</b>	Leiterplatte
<b>22</b>	Mantelfläche
<b>23</b>	Halbraum
<b>24</b>	Kamera
<b>25</b>	Rand
<b>26</b>	Abbildungssystem, Bildsensor
<b>27</b>	Blende
<b>28</b>	Optische Achse
<b>29</b>	Sperrfilter
<b>30</b>	Ausnehmung
<b>31</b>	Punkt

32	Brillenglasfläche, Fläche	550	Fläche
33	Koordinatensystem	580	Einrichtung
34	Bildsensor	582	Membran
35, 35'	Lichtstrahl	584	Immersionsmedium
36	Rechnereinheit		
38, 38', 38''	Kreislinie		
40	Zentrum		
42	Gerade		
43	Bildfeld (BF)		
44	Raumwinkelelement		
46	Punkt		
47	Kugelkoordinatensystem		
48	Nordpol, Koordinatensystem		
49	Hemisphäre		
50	Stützstellen, Fläche		
51	Gruppe		
52	Bogenlinie		
100	Abgestumpfter Ikosaeder		
102, 103, 106	Polyeder		
108	Dodekaeder		
110	Ikosaeder		
113, 115	Rand		
114, 116	Polyeder		
200, 210	Vorrichtung		
202	Auge		
203	Scheitelpunkt		
205	Hornhaut		
207, 209	Koordinatensystem, Kurve		
211, 213	Kurve		
214	Aufnahmebereich		
218	Punktlichtquellen		
219	Hemisphäre		
224	Kamera		
300, 310	Vorrichtung		
312	Brillenglases, Gegenstand		
314	Aufnahmebereich		
318	Punktlichtquelle		
319	Hemisphäre		
320	Fläche		
324	Kamera		
316	Feldlinse		
400	Vorrichtung		
410	Vorrichtung		
412	Gegenstand		
418	Punktlichtquelle		
419	Hemisphäre		
420	Fläche		
424	Kamera		
470	Einrichtung		
471	Koordinateneinrichtungssystem		
472	Messeinrichtung		
474	Punkt		
476	Koordinatensystem		
500, 510	Vorrichtung		
512	Brillenglas		
518	Punktlichtquellen		
520	Fläche		

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- US 5106183 A [0002]
- EP 1918754 B1 [0082]
- US 5321501 [0082]
- WO 2006/10544 A1 [0082]

## Patentansprüche

1. Vorrichtung (10) für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung einer optisch wirksamen Fläche (20) eines Gegenstands (12)

mit einer Einrichtung (16) zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich (14), in dem die Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche (20) des Gegenstands (12) in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist;

mit einer Vielzahl von Punktlichtquellen (18), die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche (20) eines in dem Aufnahmebereich (14) angeordneten Gegenstands (12) reflektiert wird; und

mit wenigstens einer Kamera (24) für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen (18) auf einem Bildsensor (34) hervorgerufen wird;

**dadurch gekennzeichnet**, dass die Punktlichtquellen (18) auf der Mantelfläche (22) eines Polyeders angeordnet sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Punktlichtquellen (18) auf der Mantelfläche wenigstens teilweise auf ein gemeinsames Zentrum (40) aufweisenden konzentrischen Kreislinien (38) liegen.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Bezug auf das gemeinsame Zentrum (40) in der radialen Richtung auf der Mantelfläche zueinander benachbart angeordneten Punktlichtquellen (18', 18'') wenigstens teilweise auf einer von dem gemeinsamen Zentrum ausgehenden gekrümmten Kurve liegen.

4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen den Punktlichtquellen (18) ein Licht in dem Wellenlängenbereich des Lichts der Punktlichtquellen absorbierendes Material angeordnet ist.

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet durch eine zwischen der Kamera (324) und dem Aufnahmebereich (314) angeordneten Optikbaugruppe (316) positiver oder negativer Brechkraft, die dazu dient, das Licht der Punktlichtquellen (318) zu einem in dem Aufnahmebereich (314) angeordneten Gegenstand (312) zu lenken und das an dem Gegenstand (312) reflektierte Licht der Kamera (324) zuzuführen.

6. Vorrichtung (310) für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung einer optisch wirksamen Fläche (320) eines Gegenstands (312)

mit einer Einrichtung zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich (314), in dem die

Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche des Gegenstands in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist;

mit einer Vielzahl von Punktlichtquellen (318), die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche (320) eines in dem Aufnahmebereich angeordneten Gegenstands (312) reflektiert wird; und

mit wenigstens einer Kamera (324) für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche (320) reflektierten Licht der Punktlichtquellen (318) auf einem Bildsensor hervorgerufen wird;

gekennzeichnet durch

eine zwischen der Kamera (324) und dem Aufnahmebereich (314) angeordneten Optikbaugruppe (316) positiver oder negativer Brechkraft, die dazu dient, das Licht der Punktlichtquellen (318) zu einem in dem Aufnahmebereich (314) angeordneten Gegenstand (312) zu lenken und das an dem Gegenstand (312) reflektierte Licht der Kamera (324) zuzuführen.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Punktlichtquellen (18) von jedem innerhalb des Aufnahmebereichs liegenden Punkt aus gesehen über einen Raumwinkel  $\Omega$  verteilt sind, der im Bogenmaß gemessen folgender Beziehung genügt:  $\Omega \geq \pi$  sr, vorzugsweise  $\Omega \geq 90\% \times 2\pi$  sr.

8. Vorrichtung (10) für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung einer optisch wirksamen Fläche (20) eines Gegenstands (12)

mit einer Einrichtung (16) zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich (14), in dem die Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche (20) des Gegenstands (12) in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist;

mit einer Vielzahl von Punktlichtquellen (18), die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche (20) eines in dem Aufnahmebereich (14) angeordneten Gegenstands (12) reflektiert wird; und

mit wenigstens einer Kamera (24) für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen (18) auf einem Bildsensor (34) hervorgerufen wird;

**dadurch gekennzeichnet**, dass

die Punktlichtquellen (18) von jedem innerhalb des Aufnahmebereichs liegenden Punkt aus gesehen über einen Raumwinkel  $\Omega$  verteilt sind, der im Bogenmaß gemessen folgender Beziehung genügt:  $\Omega \geq \pi$  sr, vorzugsweise  $\Omega \geq 90\% \times 2\pi$  sr.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Aufnahmebereich (14, 214, 314) für das Einstellen des von einem Punkt in dem Aufnahmebereich gesehenen Raumwinkels verlagert werden kann.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Kamera (24) ein optisches Abbildungssystem (26) aufweist, das eine den Aufnahmebereich (14) durchsetzende optische Achse (28) hat und die Anzahl der Punktlichtquellen (18) in einem Raumwinkelement um einen auf der optischen Achse (28) liegenden Punkt (46), das in einem Kugelkoordinatensystem (47), dessen Ursprung in dem Punkt (46) liegt und das einen auf der optischen Achse (28) liegenden zu der Kamera (24) weisenden Nordpol (48) hat, bei dem Polarwinkel  $\theta$  und dem Azimutwinkel  $\varphi$  angeordnet ist, mit zunehmendem Polarwinkel (12) abnimmt.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzahl der Punktlichtquellen (18) in einem Raumwinkelement um einen auf der optischen Achse (28) liegenden Punkt (46), das in einem Kugelkoordinatensystem (47), dessen Ursprung in dem Punkt (46) liegt und das einen auf der optischen Achse (28) liegenden zu der Kamera (24) weisenden Nordpol (48) hat, bei dem Polarwinkel  $\theta$  und dem Azimutwinkel  $\varphi$  angeordnet ist, von dem Azimutwinkel  $\varphi$  im Wesentlichen unabhängig ist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Punktlichtquellen (18) zu der optischen Achse (28) asymmetrisch angeordnet sind.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, gekennzeichnet durch wenigstens eine weitere Kamera, die ein optisches Abbildungssystem mit einer den Aufnahmebereich durchsetzenden optischen Achse hat und/oder eine Messeinrichtung (472) für das Ermitteln der Lage wenigstens eines Punktes (474) auf der Fläche (420) eines in der Einrichtung zum Positionieren angeordneten Gegenstands in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem (476) und/oder Punktlichtquellen (218) für das Erzeugen von Licht mit einer unterschiedlichen Wellenlängenzusammensetzung, das an der zu vermessenden Oberfläche eines in der Messposition angeordneten Gegenstands reflektiert wird und/oder eine Einrichtung (580) für das Unterdrücken von Reflexen des Lichts der Punktlichtquellen an einer der Kamera (524) abgewandten Rückseite (550) eines in dem Aufnahmebereich angeordneten transparenten Gegenstands (512) und/oder eine Einrichtung (36) für das aufeinanderfolgende Aktivieren von Gruppen (51) von unterschiedlichen Punktlichtquellen (18) und das Erfassen der Helligkeitsverteilung für die aufeinanderfolgend aktivierten Gruppen (51) von unterschiedlichen Punktlichtquellen (18).

14. Vorrichtung (10) für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krüm-

mung einer optisch wirksamen Fläche (20) eines Gegenstands (12) mit einer Einrichtung (16) zum Anordnen des Gegenstands in einem Aufnahmebereich (14), in dem die Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche (20) des Gegenstands (12) in einem vorrichtungsfesten Koordinatensystem ermittelbar ist; mit einer Vielzahl von Punktlichtquellen (18), die Licht bereitstellen, das an der zu vermessenden Fläche (20) eines in dem Aufnahmebereich (14) angeordneten Gegenstands (12) reflektiert wird; und mit wenigstens einer Kamera (24) für das Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche reflektierten Licht der Punktlichtquellen (18) auf einem Bildsensor (34) hervorgerufen wird; gekennzeichnet durch eine Einrichtung (36) für das aufeinanderfolgende Aktivieren von Gruppen (51) von unterschiedlichen Punktlichtquellen (18) und das Erfassen der Helligkeitsverteilung für die aufeinanderfolgend aktivierten Gruppen (51) von unterschiedlichen Punktlichtquellen (18).

15. Verfahren für das Vermessen der Topografie und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung einer optisch wirksamen Fläche (20) eines Gegenstands (12) mit folgenden Schritten: Ermitteln der Lage wenigstens eines Punktes auf der Fläche (20) des Gegenstands (12); Bereitstellen von Licht aus einer Vielzahl von Punktlichtquellen (18), das an der zu vermessenden Fläche (20) eines in dem Aufnahmebereich angeordneten Gegenstands (12) reflektiert wird; Erfassen einer Helligkeitsverteilung, die von dem an der zu vermessenden Fläche (20) reflektierten Licht der Punktlichtquellen (18) auf einem Bildsensor (34) hervorgerufen wird; und Berechnen der Topografie der Fläche (20) und/oder des Gradienten und/oder der Krümmung aus der erfassten Lage des wenigstens einen Punktes auf der Fläche (20) des Gegenstands (12) und aus der erfassten Helligkeitsverteilung; **dadurch gekennzeichnet**, dass die Helligkeitsverteilung für aufeinanderfolgend aktivierte Gruppen (51) von unterschiedlichen Punktlichtquellen (18) erfasst wird.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

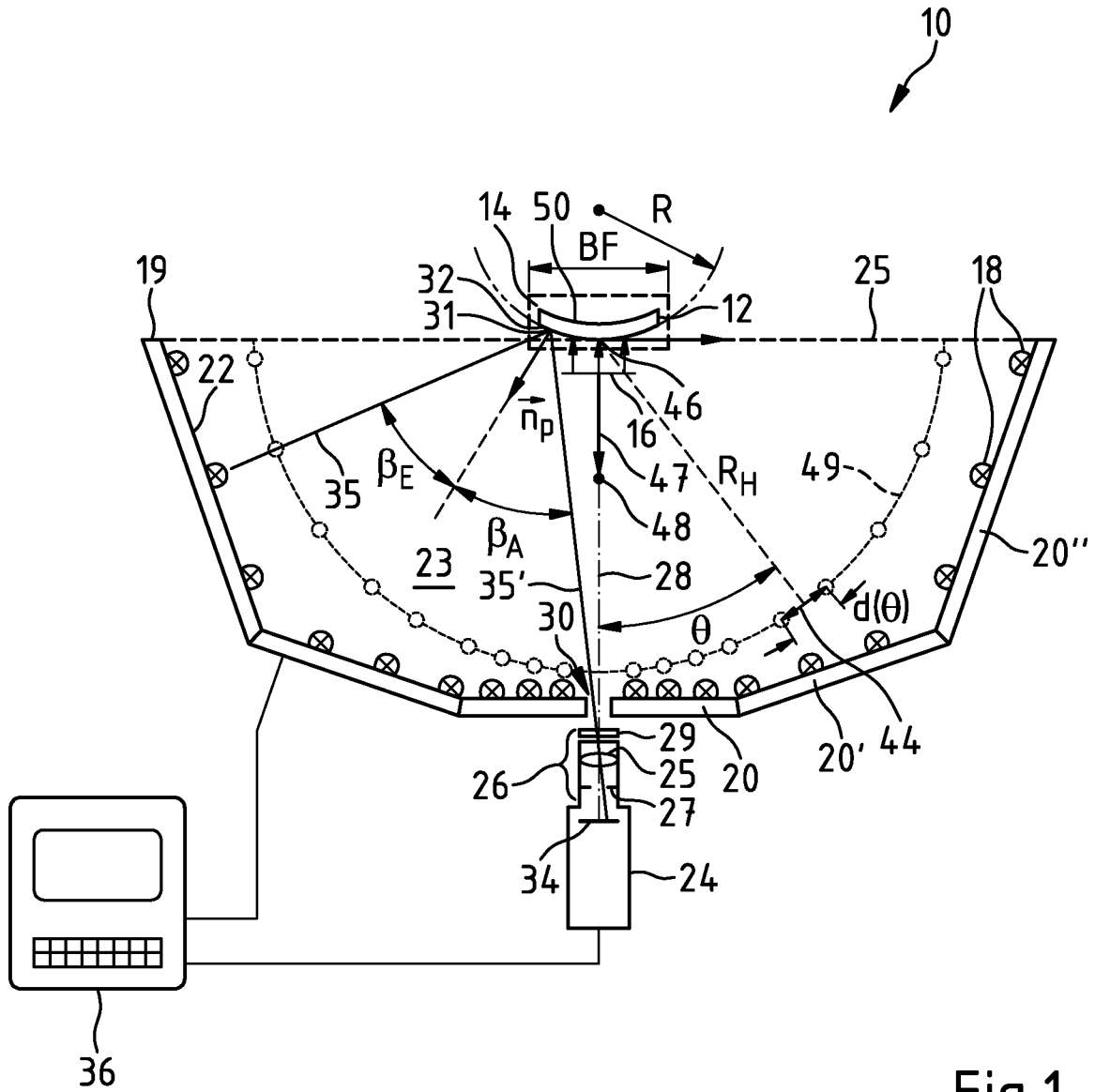


Fig.1

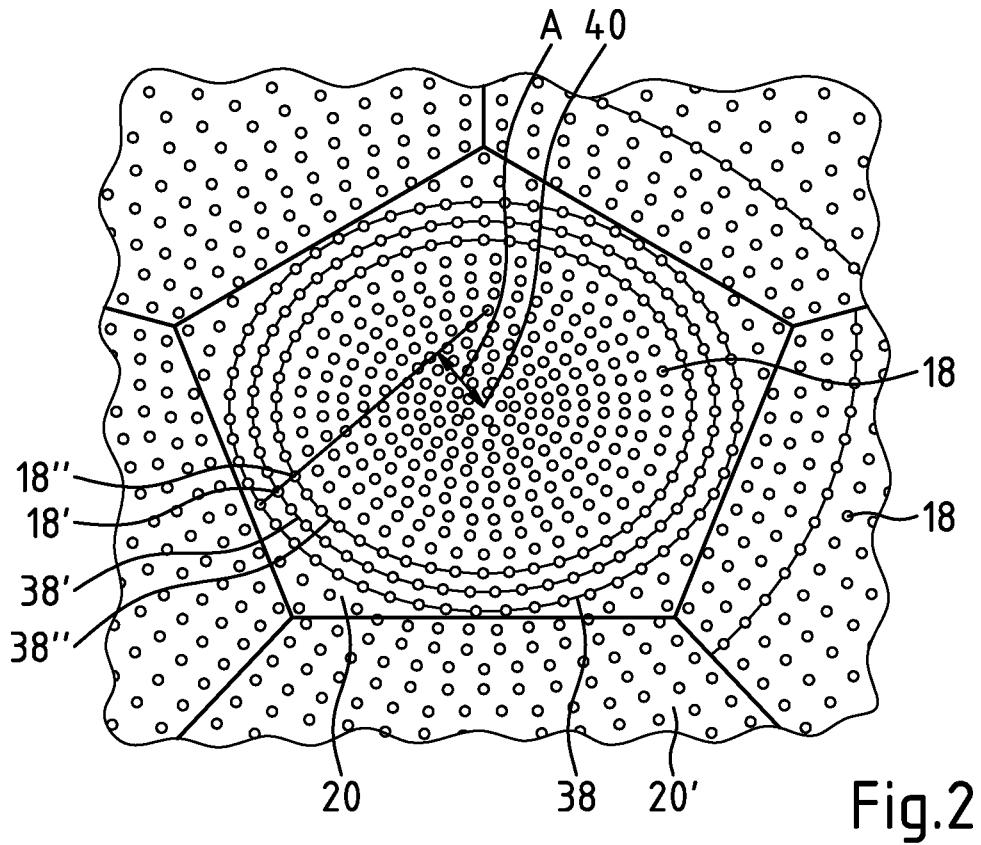


Fig. 2

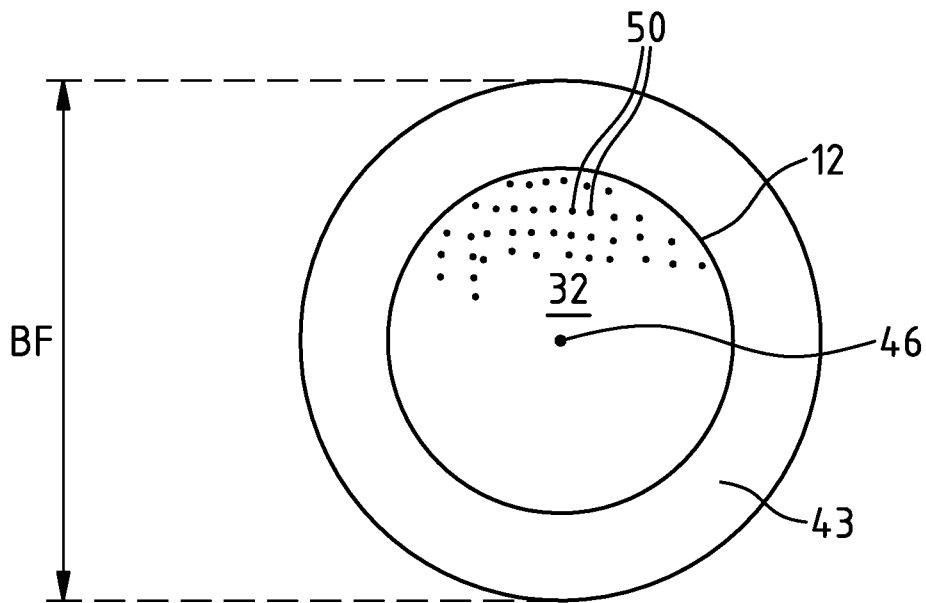


Fig. 3



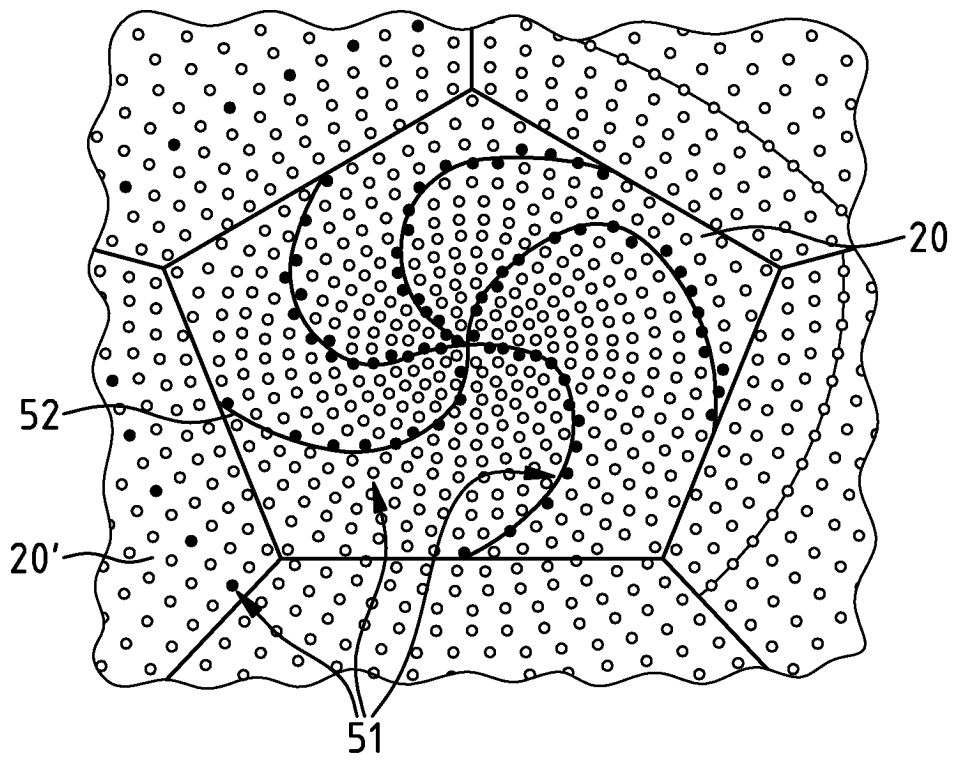


Fig.4

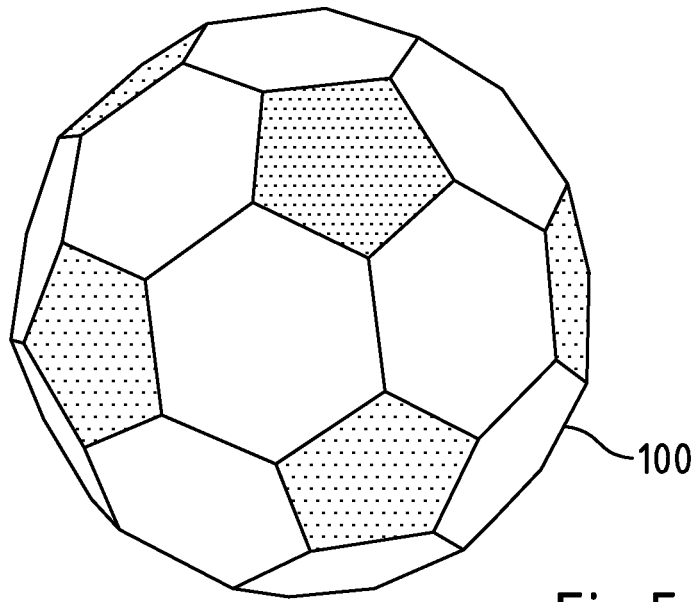


Fig.5

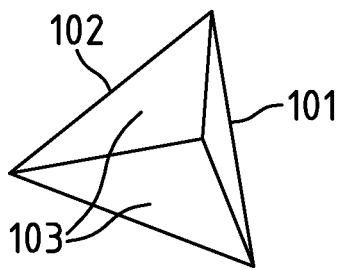


Fig.6

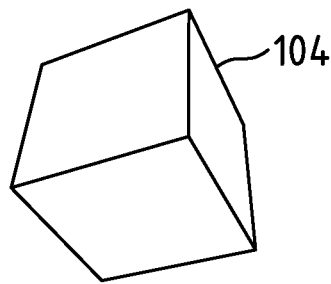


Fig.7

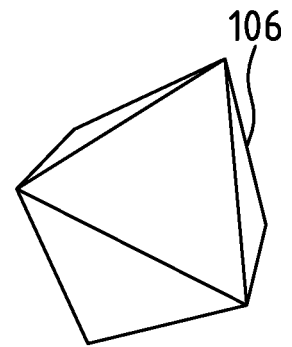


Fig.8

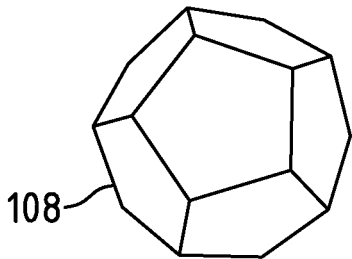


Fig.9

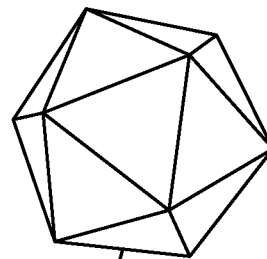
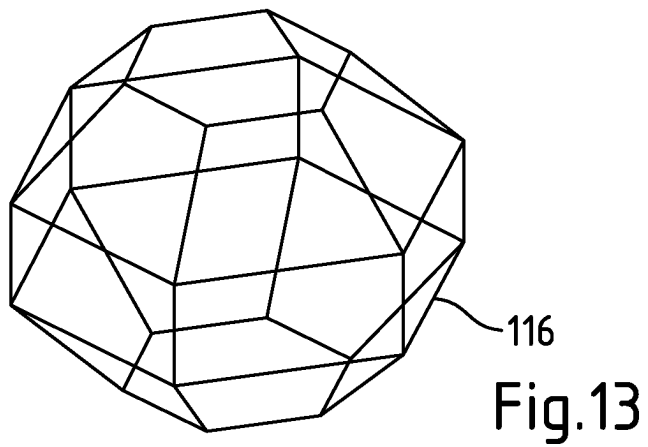
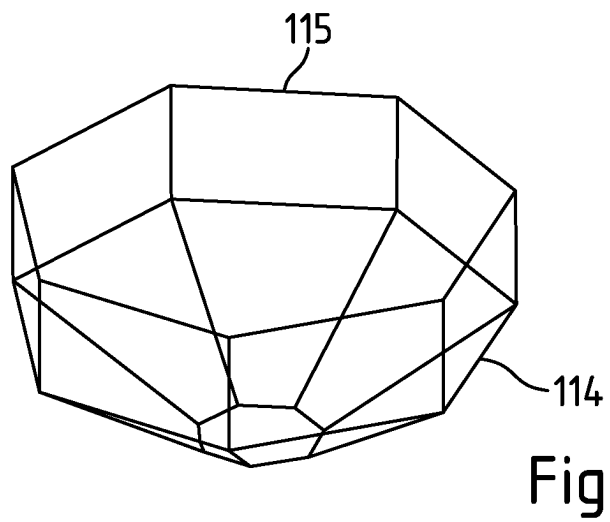
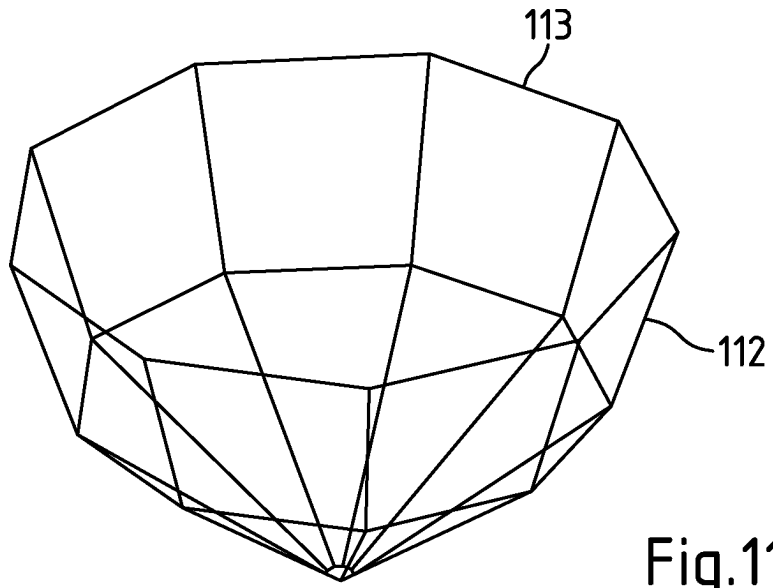


Fig.10



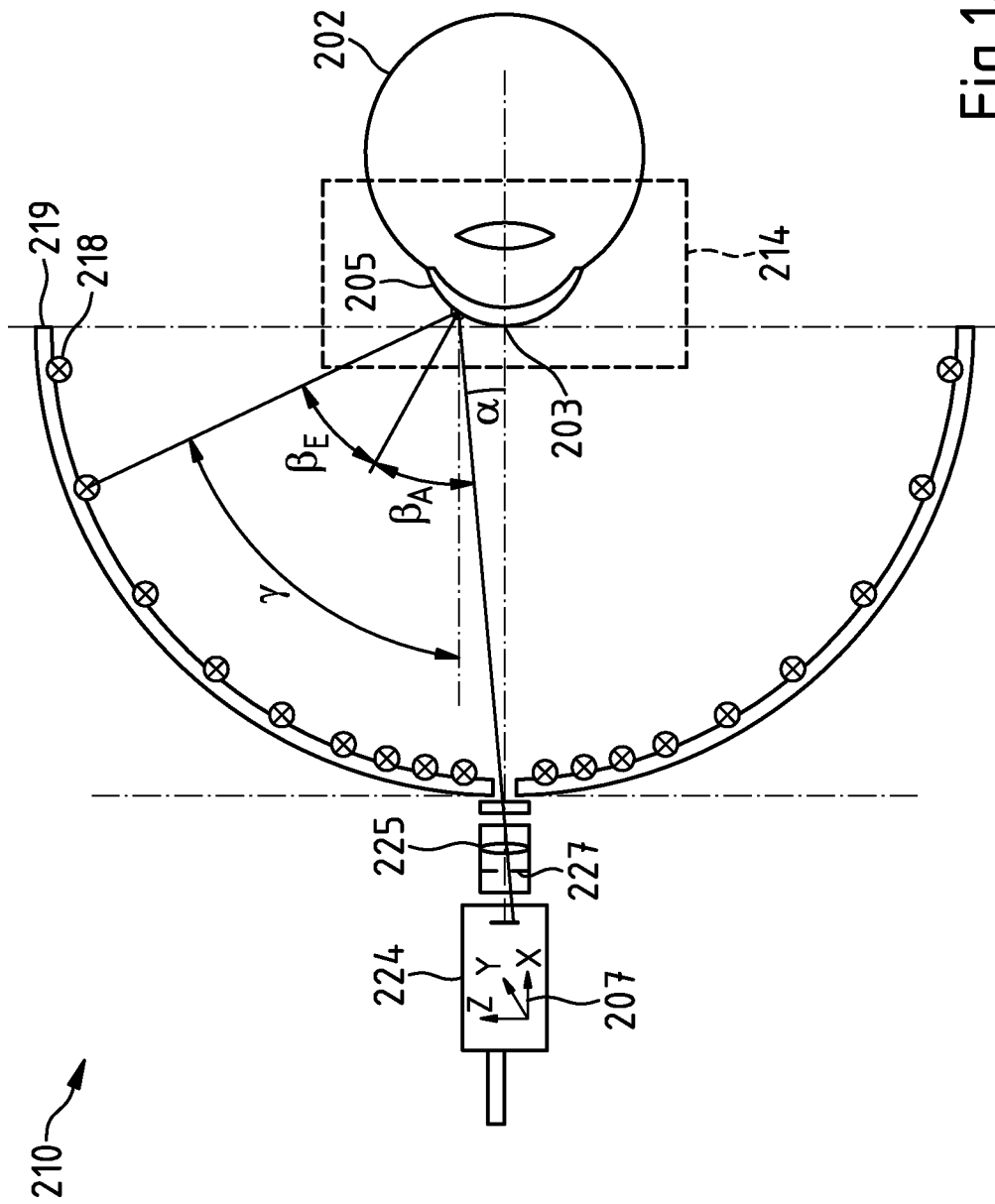


Fig.14

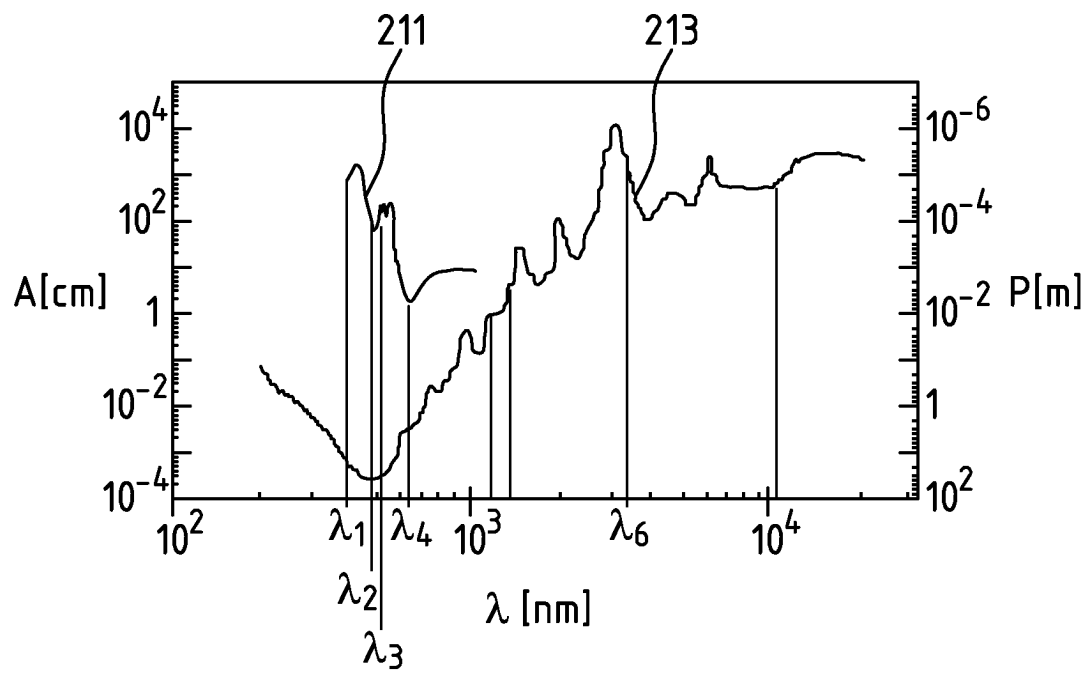


Fig.15

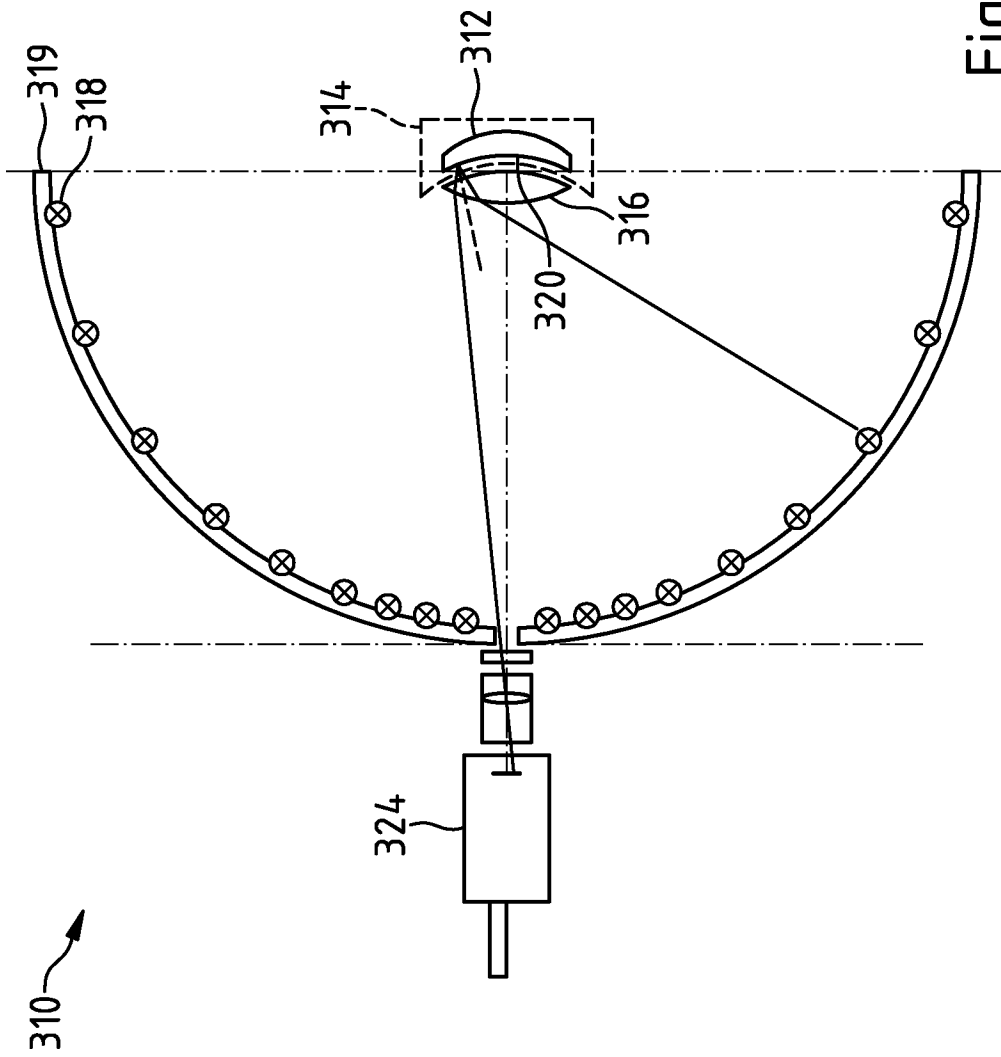


Fig.16

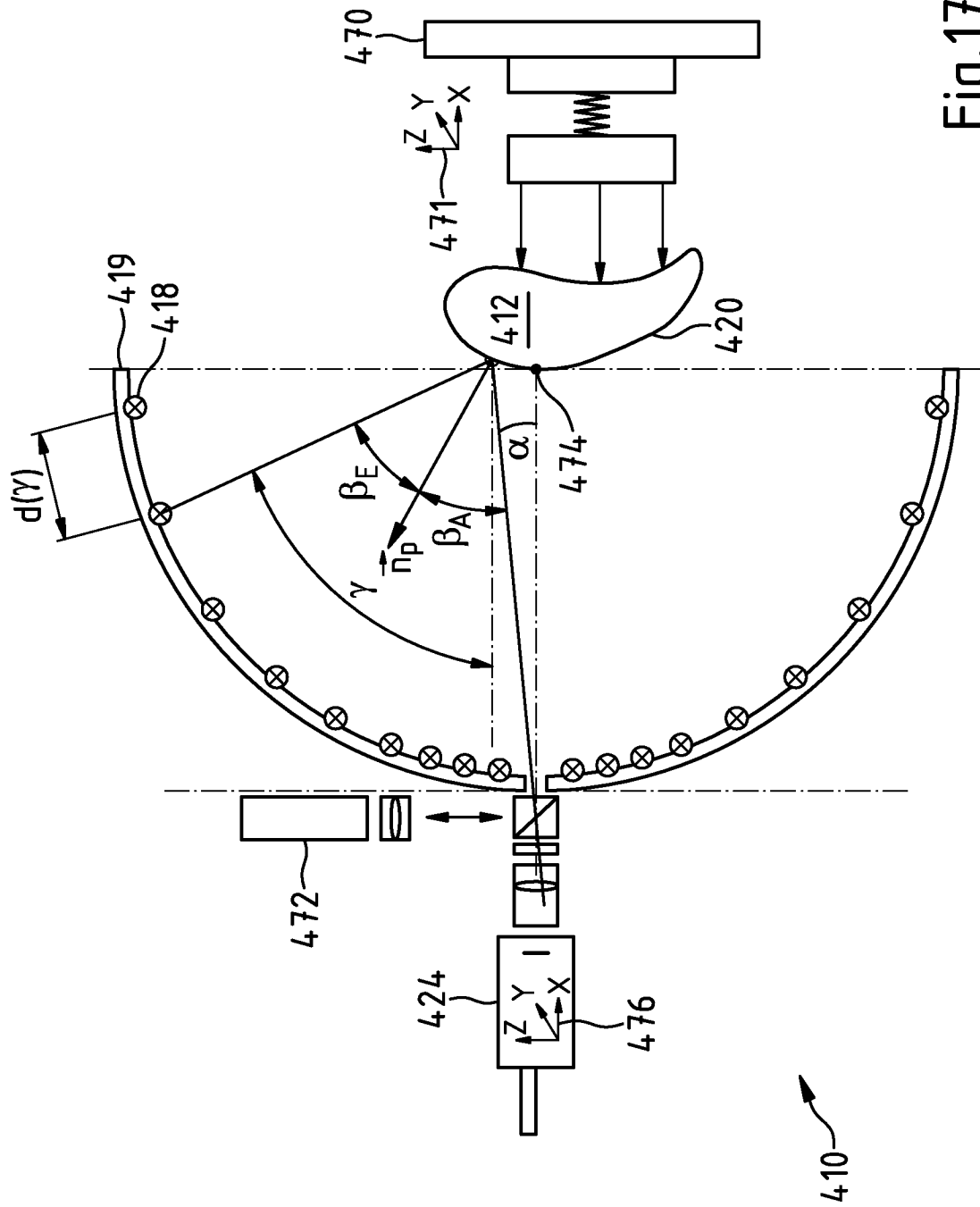


Fig.17

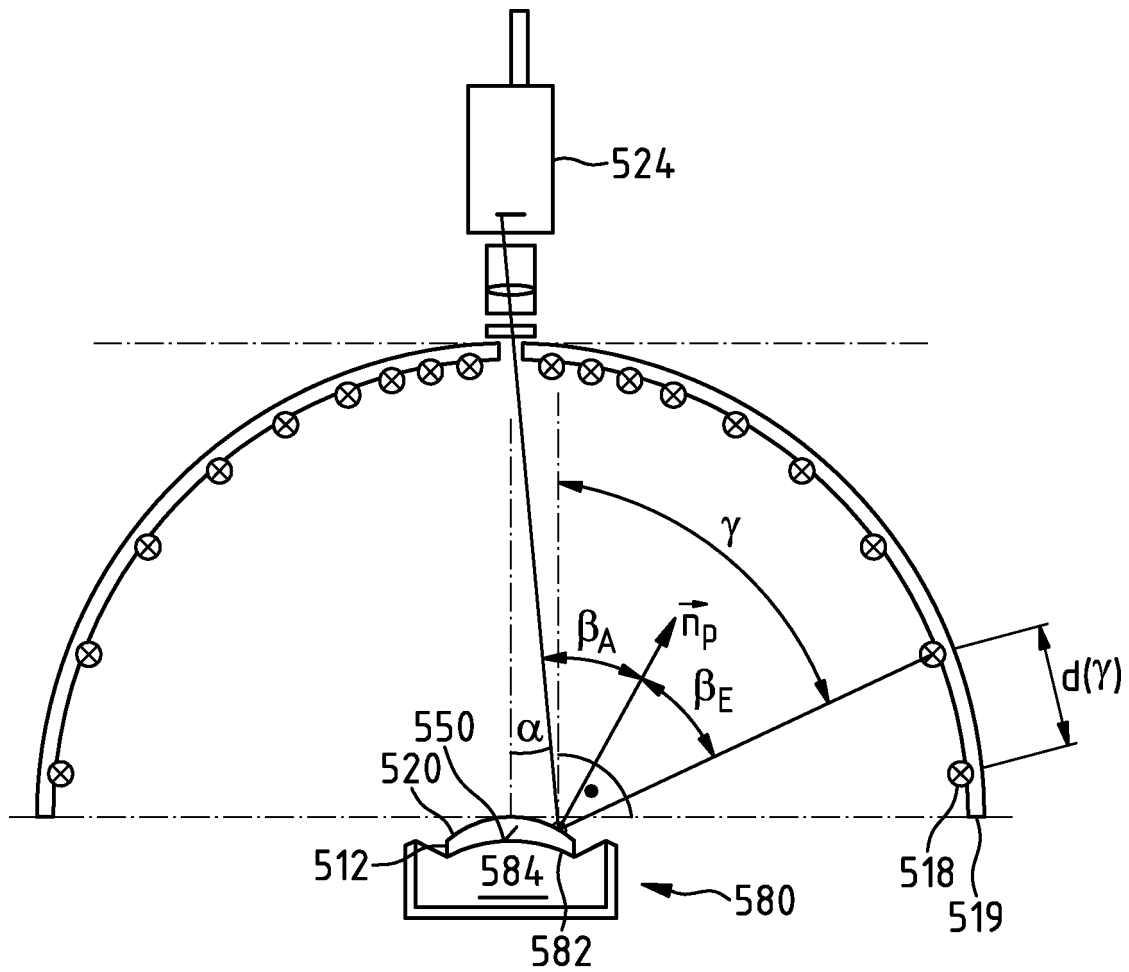


Fig.18