

Messvorrichtung und Verfahren zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems

5 Der vorliegende Ansatz bezieht sich auf eine Messvorrichtung und ein Verfahren zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems.

Die US 2019238830 A1 beschreibt ein optisches Prüfgerät zur Prüfung von Kameras.

Offenbarung der Erfindung

10

Vor diesem Hintergrund werden mit dem vorliegenden Ansatz eine Messvorrichtung zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems und ein Verfahren zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems gemäß den Hauptansprüchen vorgestellt. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den jeweiligen Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung.

15

Die mit dem vorgestellten Ansatz erreichbaren Vorteile bestehen darin, dass ein afokales optisches System beispielsweise hinsichtlich seiner Modulationstransferfunktion geprüft werden kann. Dadurch kann die Abbildungsqualität des afokalen optischen Systems geprüft werden.

20

Eine Messvorrichtung zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems weist eine Aufnahmeeinrichtung, eine Lichtbereitstellungseinrichtung, eine Kamera, zumindest eine weitere Lichtbereitstellungseinrichtung, zumindest eine weitere Kamera und eine Übertragungsschnittstelle auf. Die Aufnahmeeinrichtung ist zur Aufnahme des afokalen optischen Systems in einer Aufnahmeebene ausgeformt. Die Lichtbereitstellungseinrichtung ist zum Bereitstellen von Licht zum Beleuchten des afokalen optischen Systems in der Aufnahmeeinrichtung von einer ersten Seite ausgebildet. Die Kamera ist zum Beobachten des afokalen optischen Systems in der Aufnahmeeinrichtung von einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite und zum Erstellen eines Kamerabilds ausgebildet, wobei in einem betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung die Lichtbereitstellungseinrichtung, das afokale optische System und die Kamera koaxial auf oder mit Messachsen

25

30

parallel zu einer Vermessungsachse angeordnet sind, die senkrecht zu der Aufnahmeebene ausgerichtet ist. Die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung ist zum Bereitstellen von weiterem Licht zum Beleuchten des afokalen optischen Systems in der Aufnahmeeinrichtung von der ersten Seite ausgebildet. Die weitere Kamera ist zum Beobachten des afokalen optischen Systems in der Aufnahmeeinrichtung von der zweiten Seite und zum Erstellen eines weiteren Kamerabilds ausgebildet; wobei in dem betriebsbereiten Zustand die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung, das afokale optische System und die weitere Kamera koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Schrägvermessungsachse angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse und/oder Aufnahmeebene ausgerichtet ist. Die Übertragungsschnittstelle ist zum Übertragen des Kamerabilds und weiteren Kamerabilds zu einer Auswerteeinheit ausgebildet, die ausgebildet ist, um unter Verwendung zumindest des Kamerabilds und/oder weiteren Kamerabilds die Modulationstransferfunktion des afokalen optischen Systems zu erkennen.

Ein afokales optisches System ist dadurch gekennzeichnet, dass es als Ganzes keine sammelnde oder zerstreue Wirkung für das aus dem optischen System emittierte Licht aufweist. Bei dem afokalen optischen System kann es sich entweder um ein einzelnes Element, wie z. B. ein Austrittsfenster für einen Laser, ein haptisch empfindliches, transparentes Sichtfenster für ein Smartphonedisplay oder einen optischen Filter, oder um ein aus mehreren Elementen zusammengesetztes optisches System, wie z. B. ein beidseitig telezentrisches Kameraobjektiv oder ein Fernglas, handeln. Die Vermessung der Modulationstransferfunktion, kurz „MTF“, die auch als Modulationsübertragungsfunktion bezeichnet werden kann, lässt einen Rückschluss auf die Abbildungsqualität des optischen Systems zu. Das Vermessen der Abbildungsqualität von brechenden optischen Systemen, wie z. B. Linsen, unter Verwendung der MTF, ist aus dem Stand der Technik hinreichend bekannt. Die hier vorgestellte Messvorrichtung nutzt den Ansatz, die Abbildungsqualität eines optischen Systems an mehreren Feldpositionen simultan zu messen, wobei als das optische System unter Verwendung der Messvorrichtung vorteilhafterweise im Besonderen ein afokales optisches System vermessen ist. Die Aufnahmeeinrichtung der Messvorrichtung kann ausgebildet sein, um das optische System innerhalb der Aufnahmeebene an einer fest definierten Position aufzunehmen oder das optische System innerhalb der Aufnahmeebene an die fest definierte Position zu verfahren. Die Lichtbereitstellungseinrichtung kann ausgebildet sein, um das Licht als breitbandiges Licht und/oder die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung kann ausgebildet sein, um das weitere Licht als breitbandiges weiteres Licht bereitzustellen. Die Lichtbereitstellungseinrichtung

und/oder weitere Lichtbereitstellungseinrichtung kann zumindest eine LED, beispielsweise zumindest eine Weißlicht-LED, umfassen. Die Vermessungsachse kann als der optische Pfad der Lichtbereitstellungseinrichtung durch das optische System zu der Kamera verstanden werden. Entsprechend kann die Schrägvermessungsachse als
5 der optische Pfad der weiteren Lichtbereitstellungseinrichtung durch das optische System zu der weiteren Kamera verstanden werden. Die Auswerteeinheit kann gemäß einer Ausführungsform Teil der Messvorrichtung sein.

Die Messvorrichtung kann auch zumindest eine dritte Kamera zum Beobachten des optischen Systems in der Aufnahmeeinrichtung von der zweiten Seite aufweisen, die
10 zum Erstellen eines dritten Kamerabilds ausgebildet ist, und zumindest eine dritte Lichtbereitstellungseinrichtung zum Bereitstellen von drittem Licht zum Beleuchten des optischen Systems in der Aufnahmeeinrichtung von der ersten Seite aufweisen, wobei in dem betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung die dritte Lichtbereitstellungseinrichtung, das optische System und die dritte Kamera coaxial auf oder mit
15 Messachsen parallel zu einer weiteren Schrägvermessungsachse angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse und/oder Aufnahmeebene und/oder Schrägvermessungsachse ausgerichtet ist. So kann die MTF des afokalen optischen Systems vorteilhafterweise unter mehreren Feldwinkeln vermessen werden, um ein detaillierteres Ergebnis für die MTF erzielen zu können. Die Messvorrichtung kann auch
20 eine beliebige Anzahl zusätzlicher Kameras und zugehörige Lichtbereitstellungseinrichtungen aufweisen, die mit dem optischen System je auf unterschiedlichen zusätzlichen Schrägvermessungsachsen angeordnet sein können. Beispielsweise kann die Messvorrichtung insgesamt neun Kameras und neun den Kameras zugehörige Lichtbereitstellungseinrichtungen aufweisen. So können die Vermessungsachse und acht Schrägvermessungsachsen zum Vermessen der MTF des optischen Systems dienen. Alle Schrägvermessungsachsen können die Vermessungsachse an einem gemeinsamen Schnittpunkt schneiden, der beispielsweise auf oder in dem afokalen optischen System angeordnet sein kann.

30 Gemäß einer Ausführungsform kann die Lichtbereitstellungseinrichtung einen fokussierbaren oder nicht fokussierbaren Kollimator aufweisen, der ausgebildet ist, um das Licht als kollimiertes Licht bereitzustellen. So kann die Ausgabe des Lichts gezielt gelenkt werden, beispielsweise zu dem optischen System. Entsprechend kann die
35 weitere Lichtbereitstellungseinrichtung einen fokussierbaren oder nicht fokussierbaren Kollimator aufweisen, der ausgebildet ist, um das weitere Licht als kollimiertes weiteres Licht bereitzustellen. Der Kollimator kann ferner eine abzubildende Struktur,

beispielsweise in Form einer Strichplatte, aufweisen. Die Strichplatte kann beispielsweise ein Fadenkreuz ausformen. Die Struktur/Strichplatte kann zwischen der Lichtbereitstellungseinrichtung und dem optischen System angeordnet sein. Eine Position der Struktur/Strichplatte kann fix oder entlang der Vermessungsachse veränderbar sein. Jeder Kollimator kann eine eigene derartige Struktur oder Strichplatte aufweisen.

Es ist weiterhin von Vorteil, wenn die Messvorrichtung gemäß einer Ausführungsform zumindest einen optischen Filter aufweist, der dazu ausgebildet ist, um auf den optischen Filter auftreffendes Licht mit einem ersten Wellenlängenbereich zu verändern, um das Licht mit einem aus dem optischen Filter austretenden veränderten zweiten Wellenlängenbereich bereitzustellen, und/oder der dazu ausgebildet ist, um auf den optischen Filter auftreffendes Licht mit einer ersten Polarisierung zu verändern, um das Licht mit einer aus dem optischen Filter austretenden veränderten zweiten Polarisierung bereitzustellen. Ein solcher optischer Filter ermöglicht es, den Wellenlängenbereich oder die Polarisierung des Lichts an ein Einsatzgebiet anzupassen. Beispielsweise kann als optischer Filter ein sogenannter V-Lambda Filter verwendet werden, wenn das optische System ein Fenster für ein Handy-Display oder ein Wellenleiter eines „Augmented Reality“-Systems bzw. „Virtual Reality“-Systems, kurz „AR-System“ bzw. „VR-System“ ist. So kann das Licht an eine Empfindlichkeitsverteilung bei Tageslicht an das menschliche Auge angepasst werden. Auch auf der Schrägvermessungsachse kann ein entsprechender oder anderer optischer Filter angeordnet sein. Der optische Filter kann schwenkbar und/oder rotierbar oder aber auch fix angeordnet sein. Der optische Filter kann parallel zur Aufnahmeebene, beispielsweise zwischen der Kamera und der Aufnahmeeinrichtung oder aber zwischen der Lichtbereitstellungseinrichtung und der Aufnahmeeinrichtung angeordnet sein. Zusätzlich oder alternativ kann die Messvorrichtung einen im Strahlengang des Kollimators angeordneten schwenkbaren und/oder rotierbaren oder fixen optischen Filter zum Ändern oder Beschränken eines Wellenlängenbereichs des Lichts oder Ändern oder Beschränken einer Polarisierung des Lichts aufweisen.

Die Messvorrichtung kann eine Kameralalteinrichtung aufweisen, die Aufnahmeeinheiten zur Aufnahme der Kameras aufweist. Eine solche Kameralalteinrichtung ermöglicht eine gemeinsame Aufnahme beispielsweise aller Kameras in fixen Positionen zueinander. Die Kameralalteinrichtung kann kugelschalenförmig als eine Kamerakugelschale ausgeformt sein. Die Kamerakugelschale kann auf einer senkrecht zu der Vermessungsachse verlaufenden X-Achse und/oder einer senkrecht zu der

Vermessungsachse und senkrecht zu der X-Achse verlaufenden Y-Achse linear beweglich und/oder um die X-Achse und/oder Y-Achse kippbar angeordnet sein. Durch eine solche Beweglichkeit der Kamerakugelschale kann bei einem als beispielsweise Wellenleiter ausgeformten optischen System eine Eyebox vermessen werden.

5

Die Messvorrichtung kann auch eine Lichtbereitstellungshalteeinrichtung aufweisen, die Aufnahmeeinheiten zur Aufnahme der Lichtbereitstellungseinrichtungen aufweist. Eine solche Lichtbereitstellungshalteeinrichtung ermöglicht eine gemeinsame Aufnahme beispielsweise aller Lichtbereitstellungshalteeinrichtungen in fixen Positionen zueinander. Die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung kann kugelschalenförmig als eine Lichtbereitstellungskugelschale ausgeformt sein. Die Lichtbereitstellungskugelschale kann auf einer senkrecht zu der Vermessungsachse verlaufenden X-Achse und/oder einer senkrecht zu der Vermessungsachse und senkrecht zu der X-Achse verlaufenden Y-Achse linear beweglich und/oder um die X-Achse und/oder Y-Achse kippbar angeordnet sein. Durch eine solche Beweglichkeit der Lichtbereitstellungskugelschale kann bei einem als beispielsweise Wellenleiter ausgeformten optischen System eine Eyebox vermessen werden. Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform sind die Kamerakugelschale und die Aufnahmeeinrichtung fix und die Lichtbereitstellungskugelschale linear beweglich und/oder kippbar. Gemäß einer alternativen Ausführungsform sind die Lichtbereitstellungskugelschale und die Aufnahmeeinrichtung fix und die Kamerakugelschale linear beweglich und/oder kippbar. In anderen Worten ausgedrückt kann die Kamerahalteeinrichtung gegenüber der Lichtbereitstellungshalteeinrichtung kippbar oder gekippt angeordnet oder die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung gegenüber der Kamerahalteeinrichtung kippbar oder gekippt angeordnet sein. So ist gemäß einer Ausführungsform ein Versatz zwischen der Lichtbereitstellungskugelschale und der Kamerakugelschale realisierbar oder realisiert.

Die Kamerahalteeinrichtung und zusätzlich oder alternativ die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung können lateral verfahrbar angeordnet sein. Dadurch kann ein lateraler Versatz entlang der X-Achse und/oder der Y-Achse erreicht werden. Dabei kann zwischen dem lateralen Versatz der Kameras bzw. der Kollimatoren, bzw. des zugehörigen Domes, und dem lateralen Versatz der Aufnahmevorrichtung (Prüflingshalter, Tray) differenziert werden. Es gibt Prüflinge, bei denen z.B. die Eintrittspupille sehr viel kleiner, als die Austrittspupille ist. Dies sind etwa Wellenleiter für AR/VR-Systeme. Der Prüfling muss sich daher in einer festen Position befinden, damit die Eintrittspupille getroffen werden kann. Um nun das FOV bzw. die Eyebox zu scannen, wird die

35

Kamerahalterung lateral verfahren. Zusätzlich kann ein lateraler Versatz der Kollimatoren vorgenommen werden.

5 Beispielsweise kann die Messvorrichtung ferner eine Bewegungseinrichtung aufweisen, die ausgebildet ist, um die Aufnahmeeinrichtung quer zu der Vermessungsachse zu bewegen. Beispielsweise kann die Aufnahmeeinrichtung unter Verwendung der Bewegungseinrichtung entlang einer senkrecht zu der Vermessungsachse verlaufenden X-Achse und/oder einer senkrecht zu der Vermessungsachse und senkrecht zu der X-Achse verlaufenden Y-Achse beweglich sein und/oder um die X-Achse und/oder Y-Achse kippbar sein. Durch die Bewegungseinrichtung kann das afokale optische System auf die Vermessungsachse zwischen die Kamera und die Lichtbereitstellungseinrichtung und/oder auf den Schnittpunkt der Schrägvermessungsachse/n bewegt werden. Eine kippbare Aufnahmeeinrichtung ermöglicht eine FOV-Vermessung, also eine „Field Of View“-Vermessung, bei als Wellenleiter ausgeformten optischen Systemen.

10

15

Es ist weiterhin von Vorteil, wenn die Messvorrichtung gemäß einer Ausführungsform zumindest eine Blende für das Licht und/oder weitere Licht aufweist. Die Blende kann dazu dienen, um eine effektive Pupille zu erzeugen. Hierzu kann die Blende an der Aufnahmeeinrichtung, Kamera oder Lichtbereitstellungseinrichtung angeordnet sein.

20

Die Messvorrichtung kann ferner die Auswerteeinheit aufweisen, die ausgebildet ist, um unter Verwendung des Kamerabilds und/oder weiteren Kamerabilds eine Abweichung in der Modulationstransferfunktion zu erkennen und unter Verwendung der Abweichung einen Korrekturwert oder eine Korrekturmatrix zum Korrigieren der Modulationstransferfunktion zum Erhöhen der Abbildungsqualität des optischen Systems zu bestimmen.

25

Beispielsweise kann die Auswerteeinheit hierbei dazu ausgebildet sein, um die Abweichung in der Modulationstransferfunktion von einer vorbestimmten gewünschten Modulationstransferfunktion zu erkennen. Eine solche Abweichung in der Modulationstransferfunktion kann beispielsweise durch eine interne Strukturierung, wie beispielsweise kapazitive Sensoren zur Erzeugung eines berührungssensitiven Mobiltelefon-Displays, in dem als Teil eines Mobiltelefon-Displays ausgeformten optischen System bewirkt werden. Die Strukturierung kann demnach negative Auswirkungen auf die durch das Mobiltelefon-Display transmittierten Bildinformationen haben, was

30

35

in einer Reduktion der Abbildungsqualität resultiert. Unter Verwendung des Korrekturwerts oder der Korrekturmatrix kann vorteilhafterweise die abweichende Modulationstransferfunktion korrigiert und somit die Abbildungsqualität erhöht werden.

5 Die Kamera und/oder weitere Kamera kann eine feste oder einstellbare Fokusposition aufweisen. Die Anpassung der Fokusposition kann dadurch realisiert sein, dass der Kamerasensor relativ zur Sammeloptik der Kamera, in axialer Richtung entlang dessen optischen Achse verschoben werden kann. Alternativ oder zusätzlich, kann die Sammeloptik der Kamera über eine veränderbare Brennweite verfügen.

10

Die Messvorrichtung kann gemäß einer weiteren Ausführungsform eine der zweiten Seite zugewandt angeordnete Strukturerkennungskamera aufweisen, die ausgebildet ist, um eine vordefinierte Struktur auf der Aufnahmeebene oder in einem definierten Bereich um die Aufnahmeebene zu erkennen, wobei die Auswerteeinrichtung ausgebildet ist, um unter Verwendung der erkannten vordefinierten Struktur eine laterale Position des optischen Systems zu bestimmen. Dies ermöglicht es, eine Position des optischen Systems innerhalb der Aufnahmeebene zu erkennen, um beispielsweise ein Verfahren des optischen Systems auf die Vermessungsachse und/oder den Schnittpunkt der Schrägvermessungsachse/n unter Verwendung der Bewegungseinrichtung zu bewirken.

15

20

Das afokale optische System kann als ein einzelnes Element wie ein Austrittsfenster beispielsweise für einen Laser, Displayfenster, beispielsweise für ein Mobiltelefon, Wellenleiter beispielsweise für ein AR-System oder optischer Filter ausgeformt sein. Alternativ kann das afokale optische System aber auch als ein aus mehreren optischen Elementen zusammengesetztes optisches System ausgeformt sein, beispielsweise als ein Kameraobjektiv oder Fernglas.

25

Ein Verfahren zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems umfasst einen Schritt des Bereitstellens von Licht, einen Schritt des Bereitstellens von weiterem Licht, einen Schritt des Erzeugens eines Kamerabilds, einen Schritt des Erzeugens eines weiteren Kamerabilds und einen Schritt des Erkennens. Im Schritt des Bereitstellens von Licht wird Licht zum Beleuchten des optischen Systems, das in einer Aufnahmeebene einer Aufnahmeeinrichtung aufgenommen ist, von einer ersten Seite unter Verwendung einer Lichtbereitstellungseinrichtung bereitgestellt. Im Schritt des Bereitstellens von weiterem Licht wird weiteres Licht

30

35

zum Beleuchten des optischen Systems, das in der Aufnahmeebene der Aufnahme-
einrichtung aufgenommen ist, von der ersten Seite unter Verwendung einer weiteren
Lichtbereitstellungseinrichtung bereitgestellt. Im Schritt des Erzeugens eines Kame-
rabilids wird ein Kamerabild einer Strichplatte über das afokale optische System in der
5 Aufnahmeeinrichtung von einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite
unter Verwendung einer Kamera erzeugt, wobei die Lichtbereitstellungseinrichtung,
das optische System und die Kamera koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu
einer Vermessungsachse angeordnet sind, die senkrecht zu der Aufnahmeebene
ausgerichtet ist. Im Schritt des Erzeugens eines weiteren Kamerabilids wird ein wei-
10 teres Kamerabild einer weiteren Strichplatte über das afokale optische System in der
Aufnahmeeinrichtung von der zweiten Seite unter Verwendung einer weiteren Ka-
mera erzeugt, wobei die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung, das optische System
und die weitere Kamera koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Schräg-
vermessungsachse angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse und/oder
15 Aufnahmeebene ausgerichtet ist. Im Schritt des Erkennens wird die Modulations-
transferfunktion des optischen Systems unter Verwendung des Kamerabilids und/oder
weiteren Kamerabilids erkannt.

Im Schritt des Erzeugens des Kamerabilids kann das Kamerabild von der Strichplatte
20 (Reticle) erzeugt werden, die mittels Kollimator, afokalem System und Kameraoptik
der Kamera abgebildet wird. Ebenso kann im Schritt des Erzeugens des weiteren
Kamerabilids das weitere Kamerabild von der weiteren Strichplatte erzeugt werden,
die mittels Kollimator, afokalem System und Kameraoptik der weiteren Kamera abge-
bildet wird.

25 Im Schritt des Erzeugens des Kamerabilids und/oder im Schritt des Erzeugens des
weiteren Kamerabilids kann je eine Sequenz an Kamerabiliden und/oder weiteren Ka-
merabiliden erzeugt werden. Beispielsweise wird je ein erstes Zwischenbild der
Strichplatte/n durch den Kollimator erzeugt, dieses wird durch das afokale optische
30 System (Prüfling) verändert und anschließend über eine Sammeloptik der Ka-
mera/weiteren Kamera auf den Sensor hin abgebildet.

Der Ansatz wird nachstehend anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft nä-
her erläutert. Es zeigen:

35

- Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Messvorrichtung zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 5 Fig. 2 eine perspektivische Darstellung einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 10 Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Kamerabilds einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- Fig. 5 eine schematische seitliche Querschnittsdarstellung eines Kollimators einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 15 Fig. 6 eine perspektivische Aufsicht auf eine Kamerahalteeinrichtung einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- Fig. 7 eine seitliche Querschnittsdarstellung einer Kamerahalteeinrichtung einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 20 Fig. 8 eine perspektivische Aufsicht auf eine Lichtbereitstellungshalteeinrichtung einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 25 Fig. 9 eine seitliche Querschnittsdarstellung einer Lichtbereitstellungshalteeinrichtung einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel; und
- Fig. 10 ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems gemäß einem Ausführungsbeispiel.
- 30

In der nachfolgenden Beschreibung günstiger Ausführungsbeispiele des vorliegenden Ansatzes werden für die in den verschiedenen Figuren dargestellten und ähnlich

wirkenden Elemente gleiche oder ähnliche Bezugszeichen verwendet, wobei auf eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente verzichtet wird.

5 Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Messvorrichtung 100 zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion MTF eines afokalen optischen Systems 105 gemäß einem Ausführungsbeispiel.

10 Die Messvorrichtung 100 weist eine Aufnahmeeinrichtung 110, eine Lichtbereitstellungseinrichtung 115, eine Kamera 120, zumindest eine weitere Lichtbereitstellungseinrichtung 125, zumindest eine weitere Kamera 130 und eine Übertragungsschnittstelle 135 auf. Die Aufnahmeeinrichtung 115 ist zur Aufnahme des afokalen optischen Systems 105 in einer Aufnahmeebene 140 ausgeformt. Die Lichtbereitstellungseinrichtung 115 ist zum Bereitstellen von Licht 145 zum Beleuchten des afokalen optischen Systems 105 in der Aufnahmeeinrichtung 110 von einer ersten Seite 150 ausgebildet. Die Kamera 120 ist zum Beobachten des afokalen optischen Systems 105 in der Aufnahmeeinrichtung 110 von einer der ersten Seite 150 gegenüberliegenden zweiten Seite 155 und zum Erstellen eines Kamerabilds 160 ausgebildet, wobei in einem hier gezeigten betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung 100 die Lichtbereitstellungseinrichtung 115, das afokale optische System 105 und die Kamera 120 koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Vermessungsachse 162 angeordnet sind, die senkrecht zu der Aufnahmeebene 140 ausgerichtet ist. Die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung 125 ist zum Bereitstellen von weiterem Licht 165 zum Beleuchten des afokalen optischen Systems 105 in der Aufnahmeeinrichtung 110 von der ersten Seite 150 ausgebildet. Die weitere Kamera 130 ist zum Beobachten des afokalen optischen Systems 105 in der Aufnahmeeinrichtung 110 von der zweiten Seite 155 und zum Erstellen eines weiteren Kamerabilds 170 ausgebildet; wobei in dem betriebsbereiten Zustand die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung 125, das afokale optische System 105 und die weitere Kamera 130 koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Schrägvermessungsachse 175 angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse 162 und/oder schräg zu der Aufnahmeebene 140 ausgerichtet ist. Die Übertragungsschnittstelle 135 ist zum Übertragen des Kamerabilds 160 und weiteren Kamerabilds 170 zu einer Auswerteeinheit 180 ausgebildet, die ausgebildet ist, um unter Verwendung zumindest des Kamerabilds 160 und/oder weiteren Kamerabilds 170 die Modulationstransferfunktion MTF des afokalen optischen Systems 105 zu erkennen.

15
20
25
30
35

Lediglich beispielhaft ist das afokale optische System 105 gemäß diesem Ausführungsbeispiel in der Aufnahmeeinrichtung 110 der Messvorrichtung 100 aufgenommen und somit in der Aufnahmeebene 140 angeordnet.

5 Bei dem afokalen optischen System 105 handelt es sich gemäß diesem Ausführungsbeispiel beispielhaft um ein einzelnes optisches Element, hier in Form eines Displayfensters für beispielsweise ein Mobiltelefon. Gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel ist das afokale optische System 105 als ein anderes einzelnes optisches Element wie z. B. ein Austrittsfenster für einen Laser, ein Wellenleiter für beispielsweise ein AR/VR-System oder ein optischer Filter, oder aber als ein aus mehreren optischen Elementen zusammengesetztes optisches System, wie z. B. ein beidseitig telezentrisches Kameraobjektiv oder ein Fernglas ausgeformt. Die hier vorgestellte Messvorrichtung 100 ist gemäß einem Ausführungsbeispiel ausgebildet, um die Modulationstransferfunktion MTF/Abbildungsqualität des afokalen optischen Systems 105 an mehreren Feldpositionen simultan zu messen. Die Vermessungsachse 162 kann als der optische Pfad der Lichtbereitstellungseinrichtung 115 durch das optische System 105 zu der Kamera 120 verstanden werden. Entsprechend kann die Schrägvermessungsachse 175 als der optische Pfad der weiteren Lichtbereitstellungseinrichtung 125 durch das optische System 105 zu der weiteren Kamera 130 verstanden werden. Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Auswerteeinheit 180 Teil der Messvorrichtung 100.

Gemäß diesem Ausführungsbeispiel weist die Lichtbereitstellungseinrichtung 115 einen fokussierbaren oder nicht fokussierbaren Kollimator auf, der ausgebildet ist, um das Licht 145 als kollimiertes Licht bereitzustellen. Entsprechend weist die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung 125 gemäß diesem Ausführungsbeispiel einen fokussierbaren oder nicht fokussierbaren Kollimator auf, der ausgebildet ist, um das weitere Licht 165 als kollimiertes weiteres Licht bereitzustellen. Der Kollimator ist in Fig. 5 näher gezeigt und beschrieben. Der Kollimator/die Kollimatoren weist/weisen gemäß diesem Ausführungsbeispiel eine abzubildende Struktur, hier beispielsweise in Form einer Strichplatte 185, die hier lediglich beispielhaft ein Fadenkreuz ausformt, auf. Die Strichplatte 185 ist gemäß einem Ausführungsbeispiel zwischen der Lichtbereitstellungseinrichtung 115 und dem optischen System 105 angeordnet. Eine Position der Struktur/Strichplatte 185 ist fix oder entlang der Vermessungsachse 162/Schrägvermessungsachse 175 veränderbar. Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung 125 eine eigene weitere Strichplatte 185 auf.

Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist die Messvorrichtung 100 zumindest einen optischen Filter auf, der dazu ausgebildet ist, um auf den optischen Filter auftreffendes Licht 145 mit einem ersten Wellenlängenbereich zu verändern, um das Licht 145 mit einem aus dem optischen Filter austretenden veränderten zweiten Wellenlängenbereich bereitzustellen, und/oder der dazu ausgebildet ist, um auf den optischen Filter auftreffendes Licht 145 mit einer ersten Polarisierung zu verändern, um das Licht 145 mit einer aus dem optischen Filter austretenden veränderten zweiten Polarisierung bereitzustellen. Ein solcher optischer Filter ermöglicht es, den Wellenlängenbereich oder die Polarisierung des Lichts an ein Einsatzgebiet anzupassen. Auch auf der Schrägvermessungsachse 175 ist gemäß einem Ausführungsbeispiel ein entsprechender oder anderer optischer Filter angeordnet. Der optische Filter ist gemäß einem Ausführungsbeispiel schwenkbar und/oder rotierbar oder aber fix angeordnet. Der optische Filter ist gemäß einem Ausführungsbeispiel parallel zur Aufnahmeebene 140, beispielsweise zwischen der Kamera 120 und der Aufnahmeeinrichtung 110 oder aber gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel zwischen der Lichtbereitstellungseinrichtung 115 und der Aufnahmeeinrichtung 110 angeordnet. Zusätzlich oder alternativ weist die Messvorrichtung 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel einen im Strahlengang des Kollimators der Lichtbereitstellungseinrichtung 115 angeordneten schwenkbaren und/oder rotierbaren oder fixen optischen Filter zum Ändern oder Beschränken einer Wellenlänge des Lichts 145 oder Ändern oder Beschränken einer Polarisierung des Lichts 145 auf. Zusätzlich oder alternativ weist die Messvorrichtung 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel einen im Strahlengang des Kollimators der weiteren Lichtbereitstellungseinrichtung 125 angeordneten schwenkbaren und/oder rotierbaren oder fixen optischen Filter zum Ändern oder Beschränken einer Wellenlänge des weiteren Lichts 165 oder Ändern oder Beschränken einer Polarisierung des weiteren Lichts 165 auf.

Die Messvorrichtung 100 weist ferner gemäß einem Ausführungsbeispiel eine Bewegungseinrichtung 190 auf, die ausgebildet ist, um die Aufnahmeeinrichtung 110 quer zu der Vermessungsachse 162 zu bewegen. Beispielsweise ist die Aufnahmeeinrichtung 110 unter Verwendung der Bewegungseinrichtung 190 entlang einer senkrecht zu der Vermessungsachse 162 verlaufenden X-Achse und/oder einer senkrecht zu der Vermessungsachse 162 und senkrecht zu der X-Achse verlaufenden Y-Achse beweglich und/oder um die X-Achse und/oder Y-Achse kippbar. Mittels der Bewegungseinrichtung 190 ist das optische System 105 gemäß einem Ausführungsbeispiel

innerhalb der Aufnahmeebene 140 auf die Vermessungsachse 162 zwischen die Kamera 120 und die Lichtbereitstellungseinrichtung 115 und/oder auf einen Schnittpunkt der Vermessungsachse 162 mit der Schrägvermessungsachse 175 verfahrbar.

5 Die Messvorrichtung 100 weist gemäß diesem Ausführungsbeispiel zumindest eine Blende 192 für das Licht 145 und/oder weitere Licht 165 auf. Die Blende 192 ist gemäß diesem Ausführungsbeispiel ausgebildet, um eine effektive Pupille zu erzeugen. Hierzu ist die Blende 192 gemäß diesem Ausführungsbeispiel an der Aufnahmeeinrichtung 110, oder gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel an oder in der Kamera 120 und/oder weiteren Kamera 130 oder der Lichtbereitstellungseinrichtung 115 und/oder weiteren Lichtbereitstellungseinrichtung 125 angeordnet.

Die Messvorrichtung 100 weist gemäß diesem Ausführungsbeispiel ferner die Auswerteeinheit 180 auf, die ausgebildet ist, um unter Verwendung des Kamerabilds 160 und/oder weiteren Kamerabilds 170 eine Abweichung in der Modulationstransferfunktion MTF zu erkennen und unter Verwendung der Abweichung einen Korrekturwert oder eine Korrekturmatrix zum Korrigieren der Modulationstransferfunktion MTF zum Erhöhen der Abbildungsqualität des optischen Systems 105 zu bestimmen. Eine solche Abweichung in der Modulationstransferfunktion MTF wird beispielsweise durch eine interne Strukturierung 195, wie beispielsweise kapazitive Sensoren zur Erzeugung eines berührungssensitiven Mobiltelefon-Displays, in dem als Mobiltelefon-Displayfenster ausgeformten afokalen optischen System 105 bewirkt. Die Strukturierung 195 kann demnach negative Auswirkungen auf die durch das Mobiltelefon-Display transmittierten Bildinformationen bewirken, was in eine Reduktion der Abbildungsqualität resultiert. Unter Verwendung des Korrekturwerts oder der Korrekturmatrix ist vorteilhafterweise die abweichende Modulationstransferfunktion korrigierbar und es kann somit die Abbildungsqualität erhöht werden. Beispielsweise ist die Auswerteeinheit 180 dazu ausgebildet, um die Abweichung in der Modulationstransferfunktion MTF von einer vorbestimmten gewünschten Modulationstransferfunktion zu erkennen.

Die Kamera 120 und/oder weitere Kamera 130 weist gemäß unterschiedlichen Ausführungsbeispielen entweder eine feste oder eine einstellbare Fokusposition auf. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel weist die Kamera 120 und/oder weitere Kamera 130 eine einstellbare Fokusposition auf, indem der Bildsensor relativ zur Sammeloptik der Kamera längs deren optischer Achse verfahrbar ist, und/oder ist hier beispielsweise in Form einer Teleskopkamera mit änderbarer Brennweite ausgeformt.

Die Messvorrichtung 100 weist gemäß diesem Ausführungsbeispiel ferner eine der zweiten Seite 155 zugewandt angeordnete Strukturerkennungskamera 197 auf, die ausgebildet ist, um eine vordefinierte Struktur auf der Aufnahmeebene 140 oder in einem definierten Bereich um die Aufnahmeebene 140 zu erkennen, wobei die Auswerteeinrichtung 180 ausgebildet ist, um unter Verwendung der erkannten vordefinierten Struktur eine laterale Position des optischen Systems 105 zu bestimmen. Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Bewegungseinrichtung 190 ausgebildet, um unter Verwendung der lateralen Position des optischen Systems 105 ein Verfahren des optischen Systems 105 auf die Vermessungsachse 162 und/oder den Schnittpunkt der Vermessungsachse 162 mit der Schrägvermessungsachse 175 zu bewirken.

Fig. 2 zeigt eine perspektivische Darstellung einer Messvorrichtung 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um die in Fig. 1 beschriebene Messvorrichtung 100 handeln, mit dem Unterscheid, dass die Messvorrichtung 100 gemäß diesem Ausführungsbeispiel zumindest eine dritte Kamera 200, zumindest eine dritte Lichtbereitstellungseinrichtung 205, eine Kamerahalteeinrichtung 210 mit Aufnahmeeinheiten 215 zur Aufnahme der Kameras 120, 130, 200 und/oder eine Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 mit Aufnahmeeinheiten 225 zur Aufnahme der Lichtbereitstellungseinrichtungen 115, 125, 205 aufweist.

Die dritte Kamera 200 ist zum Beobachten des optischen Systems 105 in der Aufnahmeeinrichtung 110 von der zweiten Seite und zum Erstellen eines dritten Kamerabilds ausgebildet. Die dritte Lichtbereitstellungseinrichtung 205 ist zum Bereitstellen von drittem Licht zum Beleuchten des optischen Systems 105 in der Aufnahmeeinrichtung 110 von der ersten Seite ausgebildet, wobei in dem hier gezeigten betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung 100 die dritte Lichtbereitstellungseinrichtung 205, das optische System 105 und die dritte Kamera 200 koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer weiteren Schrägvermessungsachse angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse und/oder Aufnahmeebene und/oder Schrägvermessungsachse ausgerichtet ist. Die Messvorrichtung 100 weist gemäß einem Ausführungsbeispiel eine beliebige Anzahl zusätzlicher Kameras und zugehöriger Lichtbereitstellungseinrichtungen auf, die mit dem optischen System 105 je auf unterschiedlichen, zusätzlichen Schrägvermessungsachsen angeordnet sind. Gemäß dem hier gezeigten Ausführungsbeispiel weist die Messvorrichtung 100 insgesamt neun Kameras

120, 130, 200 und neun den Kameras 120, 130, 200 zugehörige Lichtbereitstellungseinrichtungen 115, 125, 205 auf. So dienen die Vermessungsachse und acht Schrägvermessungsachsen zum Vermessen der MTF des optischen Systems 105. Alle Schrägvermessungsachsen schneiden die Vermessungsachse gemäß diesem Ausführungsbeispiel an einem gemeinsamen Schnittpunkt, der beispielsweise auf oder in dem optischen System 105 angeordnet ist.

Die Kamerahalteeinrichtung 210 ist gemäß diesem Ausführungsbeispiel kugelschalenförmig als eine Kamerakugelschale ausgeformt. Die Kamerakugelschale ist gemäß einem Ausführungsbeispiel auf einer senkrecht zu der Vermessungsachse verlaufenden X-Achse und/oder einer senkrecht zu der Vermessungsachse und senkrecht zu der X-Achse verlaufenden Y-Achse linear beweglich und/oder um die X-Achse und/oder Y-Achse kippbar angeordnet. Die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 ist gemäß diesem Ausführungsbeispiel kugelschalenförmig als eine Lichtbereitstellungskugelschale ausgeformt. Die Lichtbereitstellungskugelschale ist gemäß einem Ausführungsbeispiel auf einer senkrecht zu der Vermessungsachse verlaufenden X-Achse und/oder einer senkrecht zu der Vermessungsachse und senkrecht zu der X-Achse verlaufenden Y-Achse linear beweglich und/oder um die X-Achse und/oder Y-Achse kippbar angeordnet. Gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel sind die Kamerakugelschale und die Aufnahmeeinrichtung 110 fix und die Lichtbereitstellungskugelschale linear beweglich und/oder kippbar ausgeformt. Gemäß einer alternativen Ausführungsform sind die Lichtbereitstellungskugelschale und die Aufnahmeeinrichtung 110 fix und die Kamerakugelschale linear beweglich und/oder kippbar ausgeformt.

Die Kamerahalteeinrichtung 210, Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 und Aufnahmeeinrichtung 110 sind gemäß diesem Ausführungsbeispiel in einer Werkbank, hier beispielhaft in Form eines Rollwagens 230, aufgenommen.

In Fig. 1 und 2 sind ein Messprinzip und Aufbau der Messvorrichtung 100 für afokale, optische Systeme 105 am Beispiel eines strukturierten Displays dargestellt. Zur Veranschaulichung sind die bezüglich der Vermessungsachse außeraxialen Strahlengänge nicht dargestellt. In Fig. 2 ist die technische Realisierung im fertigen Messgerät gezeigt. Die Messvorrichtung 100 ermöglicht es, wie bei bekannten Messsystemen die Abbildungsqualität von im Folgenden auch als „Prüfling“ bezeichneten optischen Komponenten simultan an verschiedenen Feldpositionen zu vermessen, wobei es

sich bei den zu vermessenden Prüflingen anders als bei den bekannten Messsystemen um afokale optische Systeme 105 handelt. In einem Anwendungsbeispiel wird der Prüfling von der Unterseite mit kollimiertem Licht beleuchtet. Dieses wird mithilfe des Kollimators erzeugt, welcher seinerseits eine abzubildende Struktur, beispielsweise ein Fadenkreuz, auch „Reticle“ genannt, beinhaltet. In Fig. 2 ist ein Kollimator mit fest positioniertem Fadenkreuz gezeigt. Als Lichtquelle der Lichtbereitstellungseinrichtungen 115, 125, 205 wird beispielsweise je eine Weißlicht-LED verwendet. Je nach Anwendung ist die Verwendung anderer Lichtquellen denkbar. Zusätzlich sind gemäß einem Ausführungsbeispiel optische Filter eingesetzt, um den Wellenlängenbereich an die Anwendung anzupassen. So wird beispielsweise bei der Vermessung von Handy-Displayfenstern oder Wellenleitern für AR/VR-Systeme, ein Photopic-Eye Filter verwendet, um den Wellenlängenbereich des Lichts 145 an die Empfindlichkeitsverteilung bei Tageslicht des menschlichen Auges anzupassen. Zusätzlich oder alternativ ist gemäß einem Ausführungsbeispiel im Strahlengang des Kollimators ein fixer oder drehbarer Polarisationsfilter angeordnet. Das Einsetzen von Filtern ist beispielsweise auch bei der Messung der wellenlängenabhängigen Abbildungsqualität (MTF) relevant.

Damit der Prüfling an verschiedenen Feldpositionen simultan vermessen werden kann, sind die Kollimatoren auf der Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 in Form eines Domes und die Kameras 120, 130, 200 auf der Kamerahalteeinrichtung 210 ebenfalls in Form eines Domes angeordnet. Diese Dome sind in den Figuren 6, 7, 8 und 9 genauer dargestellt. Die beiden Dome-Konstruktionen sind im hier gezeigten betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung 100 unterhalb bzw. oberhalb des Prüflings platziert. Die zusammengebaute Messvorrichtung 100 ist hier in Fig. 2 gezeigt. Jeder Dome besteht aus einer Kugelschale an deren Oberfläche Haltevorrichtungen befestigt sind. Diese Haltevorrichtungen dienen ihrerseits zur Befestigung der Kameras 120, 130, 200 bzw. der Kollimatoren. Die Kameras 120, 130, 200 und Kollimatoren sind dabei so montiert, dass sich deren optische Achsen in einem Punkt schneiden. Dabei ist die Kamera 120 bzw. der Kollimator der Lichtbereitstellungseinrichtung 115 im Zentrum des Domes montiert. Diese axiale Kamera 120 bzw. dieser axiale Kollimator ist so ausgerichtet, dass dessen optische Achse senkrecht auf der Prüflingsebene, zuvor als Aufnahmeebene bezeichnet, steht. Der Schnittpunkt aller optischer Achsen der Kameras 120, 130, 200 bzw. Kollimatoren liegt dabei auf der optischen Achse der axialen Kamera 120 bzw. des axialen Kollimators. In der fertigen Messvorrichtung 100 sind die Dome-Konstruktionen sich gegenüberliegend angeordnet.

net. Die Krümmungsmittelpunkte fallen gemäß einem Ausführungsbeispiel zusammen, oder aber sind gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel versetzt voneinander angeordnet. Dies kann beispielsweise dann erforderlich sein, wenn das zu prüfende, optische Element/System 105 einen Parallelversatz im Strahlengang erzeugt.

5 Wie es beispielsweise bei einem ebenen Wellenleiter oder einem prismatischen System der Fall sein kann. Zusätzlich wird eine effektive Pupille im Strahlengang der Kameras 120, 130, 200 erzeugt. Dies ist gemäß einem Ausführungsbeispiel mithilfe einer Blende in der Nähe des Prüflings realisiert, wie dies in Fig. 1 oder Fig. 3 dargestellt ist. Gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel ist eine individuelle Blende

10 vor jedem Kollimator oder vor jeder Kamera 120, 130, 200 angeordnet.

Der Prüfling selber wird/ist in einer geeigneten Halterung platziert, der Aufnahmeeinrichtung 110, welche sich zwischen dem oberen und dem unteren Dome befindet. Die Halterung ist in x-Richtung sowie in y-Richtung verfahrbar, sodass der Prüfling an

15 verschiedenen Positionen vermessen werden kann. Die Halterung ist gemäß einem Ausführungsbeispiel ausgelegt, um mehrere Prüflinge aufzunehmen, welche nacheinander vermessen werden. Weiterhin ist gemäß einem Ausführungsbeispiel oberhalb oder unterhalb des Prüflings ein optischer Filter angeordnet, welcher die Wellenlänge und/oder die Polarisation der durch den Prüfling laufenden Lichtstrahlen verändert.

20 Die Größe des Filters ist gemäß einem Ausführungsbeispiel bei Bedarf anpassbar. Dies stellt eine alternative Ausführung für den Fall dar, wenn Kollimatoren ohne entsprechende Filter verwendet werden.

Die Verstreungen des oberen Domes sind gemäß einem Ausführungsbeispiel mit weiteren Kameras in Form der in Fig. 1 beschriebenen Strukturerkennungskameras

25 ausgestattet, um die laterale Position (x-, y-Position) des Prüflings festzustellen. Zu diesem Zweck sind diese Strukturerkennungskameras gemäß einem Ausführungsbeispiel ausgebildet, um bekannte Strukturen in der Prüflingsebene oder zusätzliche Strukturen, die in einem definierten Abstand zum Prüfling angeordnet sind und sich

30 beispielsweise auf der Prüflingshalterung befinden, zu erkennen.

Ein wichtiger Anwendungsbereich der hier vorgestellten Messvorrichtung 100 ist die Vermessung von Handy-Displayfenstern. Diese haben die Besonderheit, dass sie über eine interne Strukturierung verfügen, welche beispielsweise dafür sorgt, dass

35 die Displays berührungsempfindlich sind. Ein Ausschnitt eines solchen, strukturierten Displays ist in Fig. 1 und 3 schematisch dargestellt. Eine solche eingebrachte Struktur

hat negative Auswirkungen auf die durch das Display transmittierten Bildinformationen. Die hier vorgestellte Messvorrichtung 100 verfügt gemäß einem Ausführungsbeispiel weiterhin über die Auswerteinheit, welche es ermöglicht, eine durch die Strukturierung hervorgerufene Reduktion der Abbildungsqualität zu ermitteln und auf Basis dieses Wertes einen Korrekturfaktor oder eine Korrekturmatrix zu berechnen. Der so berechnete Korrekturfaktor oder die so berechnete Korrekturmatrix wird weiterhin im Rahmen einer Bildverarbeitung angewandt, um ein Bild, welches mit einer Kamera 120, 130, 200 durch das Display hindurch aufgenommen wurde, zu korrigieren. Ein konkreter Anwendungsfall wäre die Bildaufnahme über die Frontkamera eines Smartphones.

Ein weiterer, wichtiger Anwendungsbereich der hier vorgestellten Messvorrichtung 100 ist die Vermessung von Wellenleitern, insbesondere von solchen Wellenleitern, wie sie in VR/AR-Headsets zum Einsatz kommen. Bei optischen Systemen für VR/AR-Anwendungen ist es wichtig, den Bereich der sogenannten „Eyebox“ zu vermessen. Dieser Bereich kann allgemein als ein Volumen definiert werden, in welchem sich die Pupille des Auges befinden muss, um bestimmte, definierte Kriterien hinsichtlich der Bildwahrnehmung zu erfüllen. Ein solches Kriterium kann z. B. sein, dass ein vom Headset erzeugtes Bild im Bereich der Eyebox vollständig sichtbar bleibt. Um mithilfe der hier vorgeschlagenen Messvorrichtung 100 einen entsprechenden Wellenleiter an verschiedenen Positionen innerhalb der Eyebox zu vermessen, ist diese in einer entsprechenden Variante so ausgestaltet, dass der Prüfling sowie wahlweise der untere oder obere Dome fixiert sind und der jeweils andere Dome in seiner lateralen Position veränderbar ist.

Ein weiterer, wichtiger Messparameter bei Optiken für AR/VR-Systeme ist deren Feldwinkel bzw. Field of View (FOV). Dabei ist es notwendig, dass der Winkel zwischen der Prüflingsebene und den optischen Achsen der Kameras 120, 130, 200 bzw. der Kollimatoren verändert werden kann, sodass beispielsweise der Winkel zwischen Prüflingsebene und axialer Kamera 120/axialem Kollimator von 90° verschieden ist. Dies ist gemäß unterschiedlichen Ausführungsbeispielen entweder dadurch realisiert, dass die Prüflingshalterung um die x-Achse bzw. die y-Achse kippbar ist, oder, dass alternativ der obere bzw. untere Dome kippbar ist.

Gemäß einem Ausführungsbeispiel sind Hauptmerkmale der hier vorgestellten Messvorrichtung 100 zur Vermessung der MTF von afokalen, optischen Systemen 105, die folgenden Komponenten:

- die Aufnahmeeinrichtung 110 in Form eines Prüflingshalters, welcher gemäß einem Ausführungsbeispiel dazu in der Lage ist, das zu prüfende, afokale optische System 105 in eine fest definierte Position zu verfahren;
- 5
- mehrere Kameras 120, 130, die oberhalb des Prüflings in beispielsweise einer festen Struktur derart angeordnet sind, dass die Bildebenen der Kameras 120, 130 auf der Oberfläche einer Kugelschale verteilt sind und, dass sich die optischen Achsen der Kameras 120, 130 zumindest näherungsweise in einem Punkt schneiden sowie, dass weiterhin eine der Kameras 120 derart im Zentrum der Oberfläche der Kugelschale angeordnet ist, dass die optische Achse der einen Kamera 120 senkrecht auf der Prüflingsebene stehen kann, und, dass weiterhin der Schnittpunkt der optischen Achsen aller Kameras 120, 130 auf der optischen Achse der einen Kamera 120 liegt;
- 10
- 15
- mehrere Lichtbereitstellungseinrichtungen 115, 125 beispielsweise mit Kollimatoren, die unterhalb des Prüflings in beispielsweise einer festen Struktur derart angeordnet sind, dass die Objektebenen der Kollimatoren auf der Oberfläche einer Kugelschale verteilt sind und dass sich die optischen Achsen der Kollimatoren zumindest näherungsweise in einem Punkt schneiden sowie, dass weiterhin einer der Kollimatoren derart im Zentrum der Oberfläche der Kugelschale angeordnet ist, dass die optische Achse des einen Kollimators senkrecht auf der Prüflingsebene stehen kann, und, dass weiterhin der Schnittpunkt der optischen Achsen aller Kollimatoren auf der optischen Achse des einen Kollimators liegt; und
- 20
- 25
- die Auswerteeinheit in Form einer Steuereinheit zur Auswertung der durch die Kameras 120, 130 aufgenommenen Kamerabilder.
- 30
- Weitere optionale Komponenten oder Eigenschaften der hier vorgestellten Messvorrichtung 100 in beliebiger Kombination sind:
- dass die Kameras 120, 130 entweder über eine feste oder einstellbare Fokussposition verfügen;
- 35
- dass jeder Kollimator/Lichtbereitstellungseinrichtung 115, 125, 205 über eine breitbandige Lichtquelle verfügt und/oder, dass weiterhin feste oder rotier- bzw.

- 5 einschwenkbare, optische Filter innerhalb des Strahlengangs des Kollimators/Lichtbereitstellungseinrichtung 115, 125, 205 angeordnet sind und/oder, dass die optischen Filter dazu dienen, den Wellenlängenbereich und/oder die Polarisation des von der Lichtquelle ausgehenden Lichtes 145 zu beschränken bzw. zu verändern;
- 10 - dass im Strahlengang jedes Kollimators/Lichtbereitstellungseinrichtung 115, 125, 205 sich eine Strichplatte (Reticle) befindet, welches von der Lichtquelle beleuchtet wird und deren Position entlang der optischen Achse im Strahlengang des Kollimators/Lichtbereitstellungseinrichtung 115, 125, 205 entweder fest oder veränderbar ist;
- 15 - dass in einer Ebene, welche parallel zur Prüflingsebene steht, ein fester oder rotier- bzw. einschwenkbarer, optischer Filter angeordnet ist und dazu dient, die durch den Prüfling laufenden Lichtstrahlen in ihrer Wellenlänge und/oder Polarisation zu beeinflussen;
- 20 - dass in mindestens einem, durch den Prüfling laufenden Strahlenbündel eine effektive Pupille erzeugt wird, welche in Form mindestens einer physischen Apertur realisiert ist;
- 25 - dass der Prüflingshalter fest mit der Kamerahalteeinrichtung 210 in Form einer festen Kamerastruktur verbunden ist, welche sich oberhalb des Prüflingshalters befindet, und, dass die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 in Form einer festen Kollimatorstruktur, welche sich unterhalb des Prüflingshalters befindet, relativ zum Prüflingshalter in ihrer lateralen Position veränderbar ist;
- 30 - dass der Prüflingshalter fest mit der festen Kollimatorstruktur verbunden ist, welche sich unterhalb des Prüflingshalters befindet, und dass die feste Kamerastruktur, welche sich oberhalb des Prüflingshalters befindet, relativ zum Prüflingshalter in ihrer lateralen Position veränderbar ist;
- 35 - dass es möglich ist, den Winkel zwischen der Prüflingsebene und den optischen Achsen der Kameras 120, 130 innerhalb der festen Kamerastruktur und/oder der Kollimatoren innerhalb der festen Kollimatorstruktur zu verändern;

- dass mindestens eine Strukturerkennungskamera oberhalb des Prüflings angeordnet ist und dazu dient, bekannte Strukturen in der Prüflingsebene oder in einem zur Prüflingsebene definiertem Abstand zu erkennen und, dass weiterhin die Steuereinheit so ausgelegt ist, dass anhand der von der mindestens einen Strukturerkennungskamera erkannten Bilder, eine laterale Position des Prüflings bestimmt wird;
- dass die Steuereinheit weiterhin so ausgelegt ist, dass diese in der Lage ist, eine durch eine Struktur im Prüfling hervorgerufene Reduktion der Abbildungsqualität zu bestimmen und weiterhin einen Korrekturfaktor oder eine Korrekturmatrix zu ermitteln, mit dessen Hilfe die zuvor bestimmte Reduktion im Rahmen einer Bildverarbeitung rechnerisch ausgeglichen werden kann.

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer Messvorrichtung 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um die in Fig. 1 oder 2 beschriebene Messvorrichtung 100 handeln.

In Fig. 3 ist der axiale Strahlengang der Messvorrichtung 100 gezeigt. Das zugehörige axiale Kamerabild ist in Fig. 4 gezeigt. Als Abbildungssystem wird gemäß einem Ausführungsbeispiel die Kamera 120 mit z. B. axial veränderbarer Sensorposition und/oder einstellbarer Brennweite verwendet. Es ist alternativ möglich, einen Kollimator mit verfahrbarem Reticle und eine fest eingestellte Kamera 120 oder aber auch einen fokussierbaren Kollimator sowie eine in ihrer Fokusposition einstellbare Kamera 120 zu verwenden.

Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines Kamerabilds 160 einer Messvorrichtung 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um das Kamerabild 160 der Kamera 120 der in Fig. 3 beschriebenen Messvorrichtung 100 handeln, das auch als axiales Kamerabild bezeichnet werden kann.

Fig. 5 zeigt eine schematische seitliche Querschnittsdarstellung eines Kollimators 500 einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um die in einer der Figuren 1 bis 4 beschriebenen Messvorrichtung 100 handeln. Dargestellt ist allgemein zur Veranschaulichung das Funktionsprinzip eines fokussierbaren Kollimators 500.

Fig. 6 zeigt eine perspektivische Aufsicht auf eine Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um die in Fig. 2 beschriebene Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 handeln. Die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 kann auch als Kollimator dome bezeichnet werden. Es ist eine Schnittrlinie A-A eingezeichnet.

Fig. 7 zeigt eine seitliche Querschnittsdarstellung einer Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel. Gezeigt ist ein Schnitt A-A. Somit kann es sich um die in Fig. 6 beschriebene Lichtbereitstellungshalteeinrichtung 220 handeln, in welche in Fig. 5 beschriebene Kollimatoren aufgenommen sind.

Fig. 8 zeigt eine perspektivische Aufsicht auf eine Kamerahalteeinrichtung 210 einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um die in Fig. 2 beschriebene Kamerahalteeinrichtung 210 handeln. Die Kamerahalteeinrichtung 210 kann auch als Teleskop dome bezeichnet werden. Es ist eine weitere Schnittrlinie A-A eingezeichnet.

Fig. 9 zeigt eine seitliche Querschnittsdarstellung einer Kamerahalteeinrichtung 210 einer Messvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel. Gezeigt ist ein Schnitt A-A. Somit kann es sich um die in Fig. 8 beschriebene Kamerahalteeinrichtung 210 handeln, in die Kameras aufgenommen sind.

Fig. 10 zeigt ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens 1000 zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion eines afokalen optischen Systems gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei kann es sich um das in einer der vorangehenden Figuren beschriebene afokale optische System handeln. Das Verfahren 1000 ist von der Messvorrichtung ansteuerbar oder durchführbar, die in einer der vorangegangenen Figuren beschrieben wurde.

Das Verfahren 1000 umfasst einen Schritt 1005 des Bereitstellens von Licht, einen Schritt 1010 des Bereitstellens von weiterem Licht, einen Schritt 1015 des Erzeugens eines Kamerabilds, einen Schritt 1020 des Erzeugens eines weiteren Kamerabilds und einen Schritt 1025 des Erkennens. Im Schritt 1005 des Bereitstellens von Licht wird Licht zum Beleuchten des afokalen optischen Systems, das in einer Aufnahme-

ebene einer Aufnahmeeinrichtung aufgenommen ist, von einer ersten Seite unter Verwendung einer Lichtbereitstellungseinrichtung bereitgestellt. Im Schritt 1010 des Bereitstellens von weiterem Licht wird weiteres Licht zum Beleuchten des afokalen optischen Systems, das in der Aufnahmeebene der Aufnahmeeinrichtung aufgenommen ist, von der ersten Seite unter Verwendung einer weiteren Lichtbereitstellungseinrichtung bereitgestellt. Im Schritt 1015 des Erzeugens eines Kamerabilds wird ein Kamerabild der Strichplatte über das afokale, optische System in der Aufnahmeeinrichtung von einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite unter Verwendung einer Kamera erzeugt, wobei die Lichtbereitstellungseinrichtung, das afokale optische System und die Kamera koaxial auf einer Vermessungsachse angeordnet sind oder parallele Messachsen aufweisen, die senkrecht zu der Aufnahmeebene ausgerichtet ist. Im Schritt 1020 des Erzeugens eines weiteren Kamerabilds wird ein weiteres Kamerabild einer weiteren Strichplatte über das afokale, optische System in der Aufnahmeeinrichtung von der zweiten Seite unter Verwendung einer weiteren Kamera erzeugt, wobei die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung, das afokale optische System und die weitere Kamera koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Schrägvermessungsachse angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse und/oder Aufnahmeebene ausgerichtet ist. Im Schritt 1025 des Erkennens wird die Modulationstransferfunktion des afokalen optischen Systems unter Verwendung des Kamerabilds und/oder weiteren Kamerabilds erkannt, beziehungsweise berechnet. Optional kann im Rahmen dieses Schrittes zusätzlich eine Berechnung eines Korrekturfaktors bzw. einer Korrekturmatrix durchgeführt werden.

Gemäß einem Ausführungsbeispiel werden der Schritt 1005 des Bereitstellens von Licht und der Schritt 1010 des Bereitstellens von weiterem Licht simultan ausgeführt. Gemäß einem Ausführungsbeispiel werden der Schritt 1015 des Erzeugens eines Kamerabilds und der Schritt 1020 des Erzeugens eines weiteren Kamerabilds simultan ausgeführt.

Im Schritt 1015 des Erzeugens kann das Kamerabild von der Strichplatte (Reticle) erzeugt werden, die mittels Kollimator, afokalem System und Kameraoptik der Kamera abgebildet wird. Ebenso kann im Schritt 1020 des Erzeugens das weitere Kamerabild von der weiteren Strichplatte erzeugt werden, die mittels Kollimator, afokalem System und Kameraoptik der weiteren Kamera abgebildet wird.

- 5 Im Schritt 1015 des Erzeugens und/oder im Schritt 1020 des Erzeugens kann je eine Sequenz an Kamerabildern und/oder weiteren Kamerabildern erzeugt werden. Beispielsweise wird je ein erstes Zwischenbild der Strichplatte durch den Kollimator erzeugt, dieses wird durch das afokale optische System (Prüfling) verändert und anschließend über eine Sammeloptik der Kamera/weiteren Kamera auf den Sensor hin abgebildet.

Patentansprüche

1. Messvorrichtung (100) zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion (MTF) eines afokalen optischen Systems (105), wobei die Messvorrichtung (100) die folgenden Merkmale aufweist:
- 5 eine Aufnahmeeinrichtung (110) zur Aufnahme des afokalen optischen Systems (105) in einer Aufnahmeebene (140);
- 10 eine Lichtbereitstellungseinrichtung (115) zum Bereitstellen von Licht (145), zum Beleuchten des afokalen optischen Systems (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von einer ersten Seite (150);
- 15 eine Kamera (120) zum Beobachten des afokalen optischen Systems (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von einer der ersten Seite (150) gegenüberliegenden zweiten Seite (155), zum Erstellen eines Kamerabilds (160), wobei in einem betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung (100) die Lichtbereitstellungseinrichtung (115), das afokale optische System (105) und die Kamera (120) koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Vermessungsachse (162) angeordnet sind, die senkrecht zu der Aufnahmeebene (140) ausgerichtet ist;
- 20 zumindest eine weitere Lichtbereitstellungseinrichtung (125) zum Bereitstellen von weiterem Licht (165), zum Beleuchten des afokalen optischen Systems (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von der ersten Seite (150);
- 25 zumindest eine weitere Kamera (130) zum Beobachten des afokalen optischen Systems (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von der zweiten Seite (155), zum Erstellen eines weiteren Kamerabilds (170); wobei in dem betriebsbereiten Zustand die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung (125), das afokale optische System (105) und die weitere Kamera (130) koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Schrägvermessungsachse (175) angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungsachse (162) und/oder Aufnahmeebene (140) ausgerichtet ist; und
- 30 eine Übertragungsschnittstelle (135) zum Übertragen des Kamerabilds (160) und weiteren Kamerabilds (170) zu einer Auswerteeinheit (180), die ausgebildet ist,
- 35

um unter Verwendung zumindest des Kamerabilds (160) und/oder weiteren Kamerabilds (170) die Modulationstransferfunktion (MTF) des afokalen optischen Systems (105) zu erkennen.

- 5 2. Messvorrichtung (100) gemäß Anspruch 1, bei der die Lichtbereitstellungseinrichtung (115) einen fokussierbaren oder nicht fokussierbaren Kollimator (500) aufweist, der ausgebildet ist, um das Licht (145) als kollimiertes Licht bereitzustellen.
- 10 3. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit zumindest einer dritten Kamera (200) zum Beobachten des optischen Systems (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von der zweiten Seite (155), zum Erstellen eines dritten Kamerabilds und zumindest einer dritten Lichtbereitstellungseinrichtung (205) zum Bereitstellen von drittem Licht, zum Beleuchten des
15 optischen Systems (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von der ersten Seite (150), wobei in dem betriebsbereiten Zustand der Messvorrichtung (100) die dritte Lichtbereitstellungseinrichtung (205), das optische System (105) und die dritte Kamera (200) koaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer weiteren Schrägvermessungsachse angeordnet sind, die schräg zu der Vermessungs-
20 achse (162) und/oder Aufnahmeebene (140) und/oder Schrägvermessungsachse (175) ausgerichtet ist.
4. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit zumindest einem optischen Filter, der dazu ausgebildet ist, um auf den optischen
25 Filter auftreffendes Licht (145) mit einem ersten Wellenlängenbereich zu verändern, um das Licht (145) mit einem aus dem optischen Filter austretenden veränderten zweiten Wellenlängenbereich bereitzustellen, und/oder der dazu ausgebildet ist, um auf den optischen Filter auftreffendes Licht (145) mit einer ersten Polarisierung zu verändern, um das Licht (145) mit einer aus dem optischen Filter
30 austretenden veränderten zweiten Polarisierung bereitzustellen.
5. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Kamerahalteeinrichtung (210), die Aufnahmeeinheiten (215) zur Aufnahme der
35 Kameras (120, 130, 200) aufweist.

6. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Lichtbereitstellungshalteeinrichtung (220), die Aufnahmeeinheiten (225) zur Aufnahme der Lichtbereitstellungseinrichtungen (115, 125, 205) aufweist.
- 5 7. Messvorrichtung (100) gemäß Anspruch 5 und 6, bei der die Kamerahalteeinrichtung (210) gegenüber der Lichtbereitstellungshalteeinrichtung (220) kippbar oder gekippt angeordnet ist oder die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung (220) gegenüber der Kamerahalteeinrichtung (210) kippbar oder gekippt angeordnet ist.
- 10 8. Messvorrichtung (100) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 7, bei der die Kamerahalteeinrichtung (210) und/oder die Lichtbereitstellungshalteeinrichtung (220) lateral verfahrbar angeordnet ist.
- 15 9. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Bewegungseinrichtung (190), die ausgebildet ist, um die Aufnahmeeinrichtung (110) quer zu der Vermessungsachse (162) zu bewegen.
- 20 10. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit zumindest einer Blende (192) für das Licht (145) und/oder weitere Licht (165).
- 25 11. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit der Auswerteeinheit (180), die ausgebildet ist, um unter Verwendung des Kamerabilds (160) und/oder weiteren Kamerabilds (170) eine Abweichung in der Modulationstransferfunktion (MTF) zu erkennen und unter Verwendung der Abweichung einen Korrekturwert oder eine Korrekturmatrix zum Korrigieren der Modulationstransferfunktion (MTF) zum Erhöhen der Abbildungsqualität des optischen Systems (105) zu bestimmen.
- 30 12. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der die Kamera (120) und/oder weitere Kamera (130) eine feste oder einstellbare Fokusposition aufweist.
- 35 13. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer der zweiten Seite (155) zugewandt angeordneten Strukturerkennungskamera (197), die ausgebildet ist, um eine vordefinierte Struktur auf der Aufnahmeebene (140) oder in einem definierten Bereich um die Aufnahmeebene (140) zu

erkennen, wobei die Auswerteeinrichtung ausgebildet ist, um unter Verwendung der erkannten vordefinierten Struktur eine laterale Position des optischen Systems (105) zu bestimmen.

5

14. Messvorrichtung (100) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der das optische System (105) als ein Austrittsfenster, Displayelement, Wellenleiter, optischer Filter, Kameraobjektiv oder Fernglas ausgeformt ist.

10

15. Verfahren (1000) zum Vermessen einer Modulationstransferfunktion (MTF) eines afokalen optischen Systems (105), wobei das Verfahren (1000) die folgenden Schritte umfasst:

15

Bereitstellen (1005) von Licht (145) zum Beleuchten des afokalen optischen Systems (105), das in einer Aufnahmeebene (140) in einer Aufnahmeeinrichtung (110) aufgenommen ist, von einer ersten Seite (150) unter Verwendung einer Lichtbereitstellungseinrichtung (115);

20

Bereitstellen (1010) von weiterem Licht (165) zum Beleuchten des afokalen optischen Systems (105), das in der Aufnahmeebene (140) in der Aufnahmeeinrichtung (110) aufgenommen ist, von der ersten Seite (150) unter Verwendung einer weiteren Lichtbereitstellungseinrichtung (125);

25

Erzeugen (1015) eines Kamerabilds (160) einer Strichplatte (185) über das afokale optische System (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von einer der ersten Seite (150) gegenüberliegenden zweiten Seite (155) unter Verwendung einer Kamera (120), wobei die Lichtbereitstellungseinrichtung (115), das afokale optische System (105) und die Kamera (120) coaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Vermessungsachse (162) angeordnet sind, die senkrecht zu der Aufnahmeebene (140) ausgerichtet ist;

30

35

Erzeugen (1020) eines weiteren Kamerabilds (170) einer weiteren Strichplatte (185) über das afokale optische System (105) in der Aufnahmeeinrichtung (110) von der zweiten Seite (155) unter Verwendung einer weiteren Kamera (130), wobei die weitere Lichtbereitstellungseinrichtung (125), das afokale optische System (105) und die weitere Kamera (130) coaxial auf oder mit Messachsen parallel zu einer Schrägvermessungsachse (175) angeordnet sind,

die schräg zu der Vermessungsachse (162) und/oder Aufnahmeebene (140) ausgerichtet ist; und

- 5 Erkennen (1025) beziehungsweise berechnen der Modulationstransferfunktion (MTF) des afokalen optischen Systems (105) unter Verwendung des Kamerabilds (160) und/oder weiteren Kamerabilds (170).