



(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2022 102 213.7**  
(22) Anmeldetag: **31.01.2022**  
(43) Offenlegungstag: **03.08.2023**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **24.08.2023**

(51) Int Cl.: **G02B 27/00 (2006.01)**

**G02B 27/01** (2006.01)  
**G02B 25/00** (2006.01)  
**G02B 27/58** (2006.01)  
**G02B 27/46** (2006.01)  
**G02B 27/02** (2006.01)  
**G02B 23/00** (2006.01)  
**G02B 21/00** (2006.01)  
**A61B 90/20** (2016.01)  
**G02B 26/06** (2006.01)  
**G02B 23/12** (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Carl Zeiss AG, 73447 Oberkochen, DE**

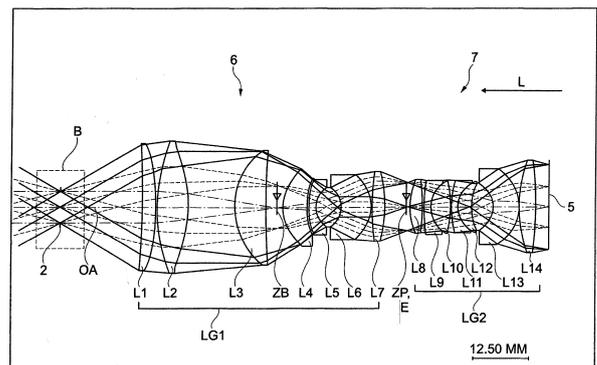
(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

(74) Vertreter:  
**Freischem & Partner Patentanwälte mbB, 50677  
Köln, DE**

(72) Erfinder:  
**Pretorius, Marco, Dr., 73447 Oberkochen, DE**

(54) Bezeichnung: **Optisches System**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein optisches System (7) mit einer Anzeigeeinheit (5) zum Anzeigen eines Bilds sowie mit einem Okular (6) zum Betrachten des Bilds. Das Okular (6) weist eine erste Linsengruppe (LG1) und eine zweite Linsengruppe (LG2) auf. Eine Zwischenpupille (ZP) ist zwischen der ersten Linsengruppe (LG1) und der zweiten Linsengruppe (LG2) angeordnet. Die zweite Linsengruppe (LG2) ist zur Abbildung des von der Anzeigeeinheit (5) angezeigten Bilds in die Zwischenpupille (ZP) ausgelegt. Die erste Linsengruppe (LG1) ist zur Abbildung des in der Zwischenpupille (ZP) angeordneten Bilds in einen räumlichen Bereich (B) ausgelegt. Die Zwischenpupille (ZP) und der räumliche Bereich (B) sind zueinander konjugiert. Eine Filtereinheit (E, FE) und/oder ein Wellenfrontmanipulator (E, WM) sind/ist an der Zwischenpupille (ZP) angeordnet.



(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	10 2012 101 262	B3
DE	10 2016 214 695	B3
DE	10 2008 021 341	A1
DE	10 2014 118 383	A1
US	2006 / 0 262 391	A1
US	2017 / 0 336 609	A1
US	3 305 294	A
EP	1 267 197	B1
EP	1 746 451	A2

**MERLITZ, H.: Distortion of binoculars revisited: Does the sweet spot exist? . In: Journal of the Optical Society of America A , Vol. 27, 2010, No. 1, S. 50-57. - ISSN 1084-7529**

**PALUSINSKI, I. A.; et al: Lateral-shift variable aberration generators. In: Applied Optics, Vol. 38, 1999, No. 1, 86-90.**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein optisches System mit einer Anzeigeeinheit zum Anzeigen eines Bilds sowie mit einem Okular zum Betrachten des Bilds. Die Anzeigeeinheit ist beispielsweise als eine digitale Anzeigeeinheit ausgebildet. Insbesondere ist das erfindungsgemäße optische System in einem Fernglas, in einem Fernrohr, in einem Teleskop, in einem Spektiv, in einem Lichtmikroskop, in einem digitaloptischen Gerät zur Verwendung in der Chirurgie, in einer Augmented-Reality-Einrichtung, in einer Virtual-Reality-Einrichtung und/oder in einem Nachtsichtgerät angeordnet. Insbesondere ist das erfindungsgemäße optische System in einem digitalen Mikroskop, insbesondere einem digitalen Operationsmikroskop angeordnet.

**[0002]** Ein Okular ist eine optisch wirksame Einheit eines optischen Systems und wird augenseitig angeordnet. Beispielsweise wird mit dem Okular ein reelles Zwischenbild einer Abbildung für ein menschliches Auge virtuell abgebildet. Ein Okular wird vielseitig eingesetzt, beispielsweise in einem Fernglas, in einem Fernrohr, in einem Teleskop, in einem Spektiv, in einem Lichtmikroskop oder in einem Nachtsichtgerät. Ferner ist es bekannt, ein Okular in einem digitalen Mikroskop, insbesondere einem digitalen Operationsmikroskop anzuordnen. Beispielsweise wird mit dem Okular ein Bildschirm des digitalen Mikroskops betrachtet. Auf diesem Bildschirm wird ein Bild dargestellt, das von einem Detektor erzeugt wird. Signale, die vom Detektor detektiert werden, werden elektronisch derart umgesetzt, dass sie auf dem Bildschirm als Bild erkennbar sind.

**[0003]** Um einen möglichst komfortablen Einblick für eine Person, insbesondere für einen Brillenträger, zu gewährleisten, ist es wünschenswert, dass das Okular sowohl einen großen Pupillenabstand (beispielsweise von ca. 18 mm) für eine Augenpupille mit einem Durchmesser von 5 mm als auch einen großen halben Feldwinkel (beispielsweise von ca. 27°) aufweist. Dabei ist der Pupillenabstand der Abstand der Augenpupille zu der ersten optischen Fläche des Okulars.

**[0004]** Hinsichtlich des Standes der Technik wird auf die US 2006/0262391 A1, die EP 1 746 451 A2, die US 2017/0336609 A1 sowie die EP 1 267 197 B1 verwiesen.

**[0005]** Zusätzlich wird hinsichtlich des Standes der Technik auf die DE 10 2016 214 695 B3, die DE 10 2014 118 383 A1, die DE 10 2012 101 262 B3 sowie die DE 10 2008 021 341 A1 verwiesen.

**[0006]** Aus dem Stand der Technik ist ferner ein optisches System zum Beobachten einer digitalen Anzeigeeinheit zum Anzeigen eines Bilds bekannt. Das bekannte optische System wird dazu verwendet, von dem auf der digitalen Anzeigeeinheit dargestellten Bild ein scharfes virtuelles Bild in einem Auge eines Beobachters zu erzeugen. Dabei ist es wünschenswert, dass sich das Auge des Beobachters (und somit die Augenpupille) als wirksame Begrenzung der von der digitalen Anzeigeeinheit ausgehenden Lichtbündel innerhalb eines vorgegebenen räumlichen Bereichs bewegen können sollte, ohne dass sich die Bildgüte merklich verschlechtert. Dieser räumliche Bereich wird in der Fachwelt oft als „Eye-Box“ bezeichnet.

**[0007]** Ferner ist aus dem Stand der Technik ein optisches System mit einem Okular und einem Objektiv bekannt, wobei das bekannte optische System keine digitale Anzeigeeinheit aufweist. Bei diesem bekannten optischen System, das nachfolgend auch als „klassisches optisches System“ bezeichnet wird, wird ein von dem Objektiv erzeugtes Zwischenbild als virtuelles Bild in die Augenpupille des Beobachters bzw. in die Eye-Box abgebildet. Bei einem derartigen klassischen optischen System mit einem Okular und einem Objektiv wirkt jedoch die Begrenzung einer Objektivpupille zugleich als scharfe Begrenzung der Eye-Box, die man somit auch als „konjugierte Gerätepupille“ bezeichnen kann. Das Vorhandensein der konjugierten Gerätepupille bewirkt, dass der Beobachter, wenn er sich mit dem Auge seitlich außerhalb eines jeweils vorgegebenen Toleranzbereichs bewegt, rasch einen Bildbeschnitt wahrnimmt. Dies vermittelt dem Beobachter die Information, dass er den vorgegebenen räumlichen Bereich der konjugierten Gerätepupille (also die Eye-Box), für die das klassische optische System auslegungsgemäß noch eine scharfe Abbildung gewährleisten kann, verlassen hat. Ferner wird der Beobachter zugleich informiert, in welche Richtung die Augenpupille zu bewegen ist, um wieder innerhalb der konjugierten Gerätepupille (also der Eye-Box) zu liegen.

**[0008]** Eine derartige konjugierte Gerätepupille fehlt bei einem optischen System mit einer digitalen Anzeigeeinheit, da die von der digitalen Anzeigeeinheit abgestrahlten Lichtbündel jeweils in einen weiten und unscharf begrenzten Raumwinkelbereich abgestrahlt werden und nicht, wie im Falle eines aus Objektiv und Okular zusammengesetzten klassischen optischen Systems, durch eine oder mehrere Blenden des Objektivs begrenzt sind, wobei auch endliche Berandungen von Linsen des Objektivs Blenden in diesem Sinne sein können. Dies hat bei einem bekannten optischen System mit einer digitalen Anzeigeeinheit zur Folge, dass der Beobachter bei seitlicher Dezentrierung seiner Augenposition relativ zur optischen Achse dieses bekannten opti-

schen Systems bei Überschreiten eines zulässigen Toleranzbereichs - also bei Verlassen der Eye-Box - ein deutlich unscharfes Bild wahrnimmt, aber (i) ohne dass die Bildhelligkeit wesentlich herabgesetzt ist und/ oder (ii) ohne dass ein teilweise oder vollständiger Beschnitt des wahrgenommenen Bildes auftritt. Dem Auge des Beobachters fehlt also gewissermaßen die „Führung“ durch eine klar wahrzunehmende Gerätepupille. Stattdessen nimmt der Beobachter nur ein unscharfes und ggf. deutliche störende farbliche Aberrationen (insbesondere Farbverläufe über das Bild hinweg) aufweisendes Bild wahr und kann die Ursache dafür nicht eindeutig auf seine falsche Augenpupillenposition zurückführen. Dieses Fehlen einer Führungsinformation für ein Auge eines Beobachters kann als sehr störend empfunden werden und schlimmstenfalls zur Ablehnung der Benutzung des bekannten optischen Systems mit einer digitalen Anzeigeeinheit führen.

**[0009]** Bei einem optischen System mit einer digitalen Anzeigeeinheit können Störeffekte in Form von Aliasing-Effekten und aufgrund einer Wahrnehmbarkeit Moire-artiger Effekte, welche aufgrund einer regelmäßigen Pixelanordnung auf der Anzeigeeinheit bedingt sind, auftreten. Derartige Störeffekte führen dazu, dass ein Beobachter die Verwendung eines optischen Systems mit einer digitalen Anzeigeeinheit nicht in Erwägung zieht, da das auf der Anzeigeeinheit angezeigte Bild vom Beobachter als unruhiger und unnatürlicher wahrgenommen wird als in einem klassischen optischen System, beispielsweise einem Fernrohr oder einem Fernglas. Aufgrund dieser Wahrnehmung geht für einen Beobachter das Gefühl der Unmittelbarkeit der Wahrnehmung verloren, die auch als Immersion oder Präsenz bezeichnet wird. Der Verlust der Wahrnehmung ist unerwünscht, denn das optische System mit der digitalen Anzeigeeinheit sollte dem Beobachter eine gute Präsenz bereitstellen.

**[0010]** Es ist bekannt, in einem Okular Mittel zur Anpassung an eine Fehlsichtigkeit innerhalb eines kleinen Einstellbereiches bereitzustellen, beispielsweise durch eine Möglichkeit zur Gesamtverschiebung des Okulars relativ zur Bildebene. Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einer Fehlsichtigkeit des Beobachters jede Fehlsichtigkeit verstanden, die durch die Beschaffenheit eines Auges oder beider Augen eines Beobachters bedingt ist, insbesondere eine Myopie, eine Hyperopie oder eine astigmatistische Fehlsichtigkeit von variabler Stärke und Achslage. Allerdings ist eine im Wesentlichen vollständige Korrektur sämtlicher individueller Fehlsichtigkeiten eines Beobachters üblicherweise nur durch das Tragen einer auf den Beobachter angepassten Brille möglich. Bei Benutzung eines Okulars ist die Verwendung einer Brille aber wenig komfortabel und oft auch störend. Zudem sollte das Okular mit einem sehr großen Austrittspupillenab-

stand ausgelegt sein. Häufig wird für Okulare, die bei optischen Geräten der Medizintechnik verwendet werden, ein Austrittspupillenabstand im Bereich von 18 mm bis 22 mm gewünscht. Da das Okular ferner das Bild der Anzeigeeinheit stark vergrößert in ein virtuelles Bild transformieren soll (und hierbei auch noch eine möglichst große Eye-Box bereitstellen soll), sollte es einen großen Lichtleitwert aufweisen. Diese gewünschten Voraussetzungen erschweren die Konstruktion eines Okulars, das eine gute Bildqualität aufweisen soll.

**[0011]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein optisches System mit einer Anzeigeeinheit, insbesondere einer digitalen Anzeigeeinheit anzugeben, bei dem Störeffekte verringert werden, so dass eine gute Präsenz erzielbar und ein visueller Bildeindruck gezielt beeinflussbar ist. Ferner soll das optische System derart ausgebildet sein, dass eine Korrektur beliebiger Fehlsichtigkeiten eines Beobachters ermöglicht wird.

**[0012]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einem optischen System mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Eine optische Einrichtung mit einem optischen System ist durch die Merkmale des Anspruchs 16 gegeben. Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, den nachfolgenden Ansprüchen und/oder den beigefügten Figuren.

**[0013]** Das erfindungsgemäße optische System weist eine Anzeigeeinheit zum Anzeigen eines Bilds auf. Beispielsweise weist das erfindungsgemäße optische System eine Bezugsachse auf, wobei die Anzeigeeinheit an der Bezugsachse angeordnet ist. Die Bezugsachse ist beispielsweise eine optische Achse des erfindungsgemäßen optischen Systems. Die Anzeigeeinheit ist beispielsweise eine digitale Anzeigeeinheit. Als Anzeigeeinheit kann insbesondere ein Feldemissionsbildschirm, ein Flüssigkristallbildschirm, ein Dünnschichttransistorbildschirm, ein Plasmabildschirm, ein SED (Surface Conduction Electron Emitter Display) oder ein Bildschirm, der organische Leuchtdioden aufweist, verwendet werden. Die vorgenannte Aufzählung ist nicht abschließend. Vielmehr kann jegliche Anzeigeeinheit verwendet werden, welche für die Erfindung geeignet ist.

**[0014]** Darüber hinaus weist das erfindungsgemäße optische System ein Okular zum Betrachten des Bilds mit mindestens einem Auge auf. Wenn das erfindungsgemäße optische System eine Bezugsachse aufweist, dann verläuft beispielsweise die Bezugsachse durch das Okular. Wie oben genannt, ist die Bezugsachse beispielsweise die optische Achse des erfindungsgemäßen optischen Systems. Ferner ist an dem Okular ein vorgebarerer räumlicher Bereich angeordnet, in welchem das Auge derart

bewegbar ist, ohne dass ein vorgebarer Schwellenwert einer Bildgüte einer mit dem Okular erzeugten Abbildung des Bilds unterschritten wird. Der räumliche Bereich weist beispielsweise eine erste Längsausdehnung und eine zweite Längsausdehnung auf. Die erste Längsausdehnung ist beispielsweise die Breite des räumlichen Bereichs. Ferner ist die zweite Längsausdehnung beispielsweise die Höhe des räumlichen Bereichs. Die erste Längsausdehnung beträgt beispielsweise mindestens 5 mm, bevorzugt mindestens 7 mm. Auch die zweite Längsausdehnung beträgt beispielsweise mindestens 5 mm, bevorzugt mindestens 7 mm. Beispielsweise ist die erste Längsausdehnung größer als die zweite Längsausdehnung. Der räumliche Bereich wird beispielsweise durch die Form und die Größe einer Blendeinheit bestimmt, welche an einer Zwischenpupille angeordnet ist. Auf die Zwischenpupille wird weiter unten näher eingegangen. Der vorgebbare Bereich ist die bereits weiter oben definierte Eye-Box. In einer Lichteinfallrichtung sind ausgehend von der Anzeigeeinheit in Richtung des räumlichen Bereichs gesehen zunächst die Anzeigeeinheit, dann das Okular und dann der räumliche Bereich angeordnet.

**[0015]** Das Okular des erfindungsgemäßen optischen Systems weist mindestens eine erste Linsengruppe und mindestens eine zweite Linsengruppe auf, wobei entgegen der Lichteinfallrichtung gesehen zunächst die erste Linsengruppe und dann die zweite Linsengruppe angeordnet sind. Beispielsweise sind die erste Linsengruppe und die zweite Linsengruppe entlang der Bezugsachse, insbesondere der optischen Achse angeordnet. Die erste Linsengruppe kann auch als Pupillen-Relay-Einheit bezeichnet werden. Unter einer Linsengruppe wird eine Gruppe verstanden, welche mindestens eine optische Baueinheit beispielsweise in Form einer Linse aufweist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Linsengruppe nur eine einzige Linse oder mehrere Linsen aufweist.

**[0016]** Ferner ist eine Zwischenpupille zwischen der ersten Linsengruppe und der zweiten Linsengruppe angeordnet. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist das Okular derart ausgelegt, dass zwischen der ersten Linsengruppe und der zweiten Linsengruppe die vorgenannte Zwischenpupille entsteht. Mit wiederum anderen Worten ausgedrückt, ist das Okular zur Bildung der vorgenannten Zwischenpupille zwischen der ersten Linsengruppe und der zweiten Linsengruppe ausgebildet. Die zweite Linsengruppe ist zur Abbildung des von der Anzeigeeinheit angezeigten Bilds in die Zwischenpupille ausgelegt. Darüber hinaus ist die erste Linsengruppe zur Abbildung des in der Zwischenpupille angeordneten Bilds in den räumlichen Bereich ausgelegt. Die Zwischenpupille und der räumliche Bereich sind zueinander konjugiert. Ferner sind/ist eine Filtereinheit (oder mindestens eine Filtereinheit) und/oder ein Wellenfrontma-

nipulator (oder mindestens ein Wellenfrontmanipulator) an der Zwischenpupille angeordnet. Mit anderen Worten ausgedrückt, sind/ist die Filtereinheit und/oder der Wellenfrontmanipulator in einer Ebene am Ort der Zwischenpupille angeordnet.

**[0017]** Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einer Filtereinheit eine Einheit verstanden, welche beispielsweise die Amplitude und/oder die Polarisation eines Lichtstrahls beeinflusst. Ferner wird vorstehend und auch nachstehend unter einem Wellenfrontmanipulator eine Einheit verstanden, welche die Wellenfront eines Lichtstrahls beeinflusst. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass bei einer Ausführungsform der Erfindung der Wellenfrontmanipulator gleichzeitig auch als Filtereinheit ausgebildet ist.

**[0018]** Beispielsweise umfasst der Wellenfrontmanipulator mindestens zwei optische Komponenten (auch als optische Einheiten bezeichnet), die gegenläufig zueinander, insbesondere senkrecht zu einer optischen Achse des optischen Systems, verschiebbar angeordnet sind und jeweils eine Freiformfläche aufweisen. Die vorgenannte Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators weist eine Nullstellung auf, in der seine optischen Komponenten keine Bildfehler in den Abbildungseigenschaften des optischen Systems herbeiführen. Ferner weist die vorgenannte Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators Wirkstellungen auf, in denen die optischen Komponenten gegenläufig zueinander, insbesondere senkrecht zu einer optischen Achse des optischen Systems aus der Nullstellung heraus verschoben sind und in denen die optischen Komponenten wenigstens eine sphärische Aberration in den Abbildungseigenschaften des optischen Systems hervorrufen. Die vorgenannte Ausführungsform des Wellenmanipulators ermöglicht, die sphärische Aberration bei einer vorgegebenen Bezugswellenlänge gezielt zu beeinflussen und dabei andere monochromatische Bildfehler wie Koma und Astigmatismus unbeeinflusst zu lassen. Insbesondere kann mit Hilfe der vorgenannten Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators eine beliebige, fest vorgegebene Linearkombination von die verschiedenen Ordnungen von sphärischer Aberration beschreibenden Zernike-Koeffizienten einstellbar beeinflusst werden. Auf diese Weise ist es möglich, in dem optischen System bestimmte Raumfrequenzbereiche einer Modulations-Transfer-Funktion gezielt zu beeinflussen und insbesondere auch geeignet zu dämpfen, so dass ein in der Stärke einstellbarer Weichzeichner-Effekt entsteht. Somit weist die vorgenannte Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators auch die Funktion einer Filtereinheit auf, insbesondere eines optischen Tiefpassfilters, wobei die Filtereinheit variabel einstellbar ist. Außerdem kann ohne Probleme das Vorzeichen der erzeugten sphärischen Aberration umgekehrt wer-

den, wodurch sich unterschiedliche Wirkungen im Vorder- und Hintergrund ergeben, die ebenfalls für gestalterische Zwecke genutzt werden können. Das Umkehren des Vorzeichens erfolgt dabei durch Umkehren der Bewegungsrichtung der optischen Komponenten der vorgenannten Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators. Hinsichtlich der vorgenannten Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators wird auch auf die DE 10 2014 118 383 A1 verwiesen, deren Inhalt vollständig durch Bezug in diese Patentanmeldung aufgenommen ist.

**[0019]** Mittels der vorgenannten Ausführungsform des Wellenmanipulators wird eine gezielte sphärische Aberration zum Weichzeichnen herbeigeführt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, ein Bokeh herbeizuführen. Insbesondere ist hierbei hervorzuheben, dass die vorgenannte Ausführungsform des Wellenmanipulators die Möglichkeit eröffnet, mit Hilfe einer negativen oder einer positiven sphärischen Aberration entweder den Vordergrund oder den Hintergrund eines Objektes weich zu zeichnen, indem die Bewegungsrichtung der optischen Komponenten mit den Freiformflächen umgekehrt wird. Somit ermöglicht die Anordnung der vorgenannten Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators mit der Funktion der Filtereinheit an der Zwischenpupille einen positiven Einfluss auf die Wahrnehmung der Bildgüte, da das vom Beobachter wahrgenommene Bild weich und natürlich erscheint. Darüber hinaus ist es möglich, mit der Filtereinheit gewünschte Strukturen in dem vom Beobachter wahrgenommenen Bild hervorzuheben oder zu unterdrücken, um eine gewünschte Bildwirkung zu erzielen. Ferner kann das Herbeiführen einer gezielten sphärischen Aberration auch zum Herbeiführen eines Anti-Aliasing Verwendung finden. Darüber hinaus können bereits direkt vor der Aufnahme auf einem geeigneten Display oder Monitor störende Moire-Effekte oder unerwünschte feine Bildstrukturen unterdrückt werden und damit eine gewünschte Bildwirkung gezielt eingestellt werden.

**[0020]** Das erfindungsgemäße optische System gewährleistet, dass für jede in dem optischen System einzufügende Anzeigeeinheit eine für diese Anzeigeeinheit geeignete Filtereinheit an der Zwischenpupille angeordnet werden kann, um die vorgenannten Störeffekte zu verringern und/oder um eine besonders gute Wahrnehmung des Bildes zu erzielen.

**[0021]** Ferner ermöglicht die Anordnung der Filtereinheit an der Zwischenpupille einen positiven Einfluss auf die Wahrnehmung der Bildgüte, da das vom Beobachter wahrgenommene Bild weich und natürlich erscheint. Darüber hinaus ist es möglich, mit der Filtereinheit gewünschte Strukturen in dem vom Beobachter wahrgenommenen Bild hervorzuheben oder zu unterdrücken, um eine gewünschte Bildwirkung zu erzielen.

**[0022]** Es hat sich gezeigt, dass die von der ersten Linsengruppe erzeugte Pupillenabbildung, welche beispielsweise zwischen dem räumlichen Bereich und der Zwischenpupille angeordnet ist, wünschenswerterweise nur geringe Aberrationen aufweisen sollte, sodass eine eindeutige Zuordnung von Orten in dem räumlichen Bereich und Orten in der Ebene der Filtereinheit ermöglicht wird. Eine solche nahezu fehlerfreie Pupillenabbildung kann beispielsweise durch eine reine Linsenoptik, durch eine reine Freiform-Spiegeloptik oder durch ein katadioptrisches System erzielt werden.

**[0023]** Aufgrund der Anordnung des Wellenfrontmanipulators an der Zwischenpupille ist es möglich, individuelle Fehlsichtigkeiten (Augenfehler) eines Beobachters in der Zwischenpupille zu korrigieren. Dies hat folgenden Hintergrund. Eine Brille kann Fehlsichtigkeiten prinzipiell nur für eine einzelne feste Blickrichtung vollständig ausgleichen, aber nicht für das blickende Auge für ein größeres Sehfeld. Das ist darin begründet, dass bei Änderung der Blickrichtung der von den Sehfeldbündeln durchsetzte Bereich eines Brillenglases wechselt. Da das Brillenglas aber eine zusammenhängende stetige Fläche bilden sollte, können nicht alle Bildfehler höherer Ordnung für alle Blickrichtungen gleichzeitig korrigiert werden. Dies ist aber durch eine Kontaktlinse möglich, die bei Blickrichtungsänderung mit dem Auge mitbewegt wird. Die erfindungsgemäße Fehlsichtigkeitskorrektur in der konjugierten Zwischenpupille entspricht hinsichtlich der Korrektionsmöglichkeiten daher eher einer Kontaktlinse als einer Brille, d.h. eine Korrektur der Augenfehler ist nahezu vollständig und unabhängig von der Blickrichtung möglich. Die Erfindung gewährleistet daher eine alternative oder zusätzliche Möglichkeit der Korrektur von individuellen Fehlsichtigkeiten eines Beobachters. Die Korrektur in der Zwischenpupille kann prinzipiell unabhängig von der Blickrichtung und somit für alle Blickrichtungen erfolgen. Es hat sich gezeigt, dass die Korrektur besser und vollständiger ermöglicht wird als mit einem Brillenglas, welches in einem endlichen Abstand vor dem Auge des Beobachters sitzt.

**[0024]** Das Tragen einer Brille kann per se stören. Beispielsweise stößt man mit dem Brillenglas oder den Brillengläsern der Brille gegen eine Augenschel, wodurch das Brillenglas oder die Brillengläser verunreinigt werden kann/können, oder ein Brillenbügel drückt am Ohr. Bei dem erfindungsgemäßen optischen System ist es nicht zwingend notwendig, dass ein Anwender (also ein Beobachter) eine Brille trägt. Vielmehr kann das erfindungsgemäße optische System von einem Anwender auch ohne Tragen einer Brille verwendet werden. Dies erhöht für den Anwender den Komfort. Insbesondere bei Benutzung des erfindungsgemäßen optischen Systems in Form eines digitalen Mikroskops, insbesondere eines digi-

talen Operationsmikroskops, ist dies sehr von Vorteil, da die Erfindung eine ermüdungsfreie und komfortable Benutzung ermöglicht. Ferner wird eine blickwinkelunabhängige und qualitativ gute Korrektionsmöglichkeit zur Verfügung gestellt.

**[0025]** Auch hinsichtlich des Wellenfrontmanipulators ist es wünschenswert, dass die erste Linsengruppe nur geringe Aberrationen aufweisen sollte. Wie oben erwähnt, kann eine nahezu fehlerfreie Pupillenabbildung beispielsweise durch eine reine Linsenoptik, durch eine reine Freiform-Spiegeloptik oder durch ein katadioptrisches System erzielt werden.

**[0026]** Der Austrittspupillenabstand des Okulars kann bei dem erfindungsgemäßen optischen System geringer ausfallen als die sonst für einen brillentragenden Anwender (also für einen Beobachter) typischerweise aus dem Stand der Technik anzusetzenden Austrittspupillenabstand im Bereich von 18 mm bis 22 mm. Dies erleichtert die Auslegung von Okularen mit einem sehr großen Lichtleitwert. Insbesondere kann der Austrittspupillenabstand bei dem erfindungsgemäßen optischen System auch kleiner als 18 mm sein, da der zusätzliche Abstand zwischen Auge und Brille wegfällt. Beispielsweise liegt der Austrittspupillenabstand im Bereich von 12 mm.

**[0027]** Das erfindungsgemäße optische System gewährleistet somit ein insgesamt besseres korrigiertes, schärferes und entspannter zu betrachtendes Bild als bisher bekannte klassische optische Systeme.

**[0028]** Das erfindungsgemäße optische System weist mindestens eine erste Antriebseinheit zur Bewegung der Filtereinheit und/oder mindestens eine zweite Antriebseinheit zur Bewegung des Wellenfrontmanipulators auf.

**[0029]** Die erste Antriebseinheit ist wirkend an der Filtereinheit angeordnet. Die Filtereinheit ist derart beweglich ausgebildet, dass die Filtereinheit von einer ersten Filtereinheits-Position außerhalb der Zwischenpupille in eine zweite Filtereinheits-Position an der Zwischenpupille bewegbar ist. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist die Filtereinheit von der ersten Filtereinheits-Position in die zweite Filtereinheits-Position bewegbar. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass die Filtereinheit von der zweiten Filtereinheits-Position in die erste Filtereinheits-Position bewegbar ist. Die erste Antriebseinheit ist beispielsweise als mechanische und/oder elektrische Antriebseinheit ausgebildet. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Filtereinheit von der ersten Filtereinheits-Position in die zweite Filtereinheits-Position an der Zwischenpupille eingeschwenkt wird oder von der zweiten Filtereinheits-Position in die

erste Filtereinheits-Position aus der Zwischenpupille herausgeschwenkt wird.

**[0030]** Die zweite Antriebseinheit ist wirkend an dem Wellenfrontmanipulator angeordnet. Der Wellenfrontmanipulator ist derart beweglich ausgebildet, dass der Wellenfrontmanipulator von einer ersten Wellenfrontmanipulator-Position außerhalb der Zwischenpupille in eine zweite Wellenfrontmanipulator-Position an der Zwischenpupille bewegbar ist. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist der Wellenfrontmanipulator von der ersten Wellenfrontmanipulator-Position in die zweite Wellenfrontmanipulator-Position bewegbar. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator von der zweiten Wellenfrontmanipulator-Position in die erste Wellenfrontmanipulator-Position bewegbar ist. Die zweite Antriebseinheit ist beispielsweise als mechanische und/oder elektrische

**[0031]** Antriebseinheit ausgebildet. Insbesondere ist es vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator von der ersten Wellenfrontmanipulator-Position in die zweite Wellenfrontmanipulator-Position an der Zwischenpupille eingeschwenkt wird oder von der zweiten Wellenfrontmanipulator-Position in die erste Wellenfrontmanipulator-Position aus der Zwischenpupille herausgeschwenkt wird.

**[0032]** Bei einer noch weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass die Filtereinheit als ein Anti-Aliasing-Filter ausgebildet ist. Beispielsweise weist der Anti-Aliasing-Filter ein doppelbrechendes Plättchen oder doppelbrechende Schichten auf. Die Doppelbrechung des doppelbrechenden Plättchens oder der doppelbrechenden Schichten kann derart gewählt werden, dass eine Modulationstransferfunktion des erfindungsgemäßen optischen Systems jenseits der Nyquist-Frequenz oder jenseits eines Bruchteils der Nyquist-Frequenz gezielt gedämpft wird. Optische Baueinheiten mit doppelbrechenden Schichten oder doppelbrechenden Plättchen aus Quarz oder Lithiumniobat sind bereits aus dem Stand der Technik bekannt. Die vorgenannten Filtereinheiten eignen sich besonders gut, um Störeffekte in Form von Aliasing-Effekten und aufgrund einer Wahrnehmbarkeit Moire-artiger Effekte zu verringern.

**[0033]** Bei einer wiederum weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass die Filtereinheit als ein Apodisationsfilter ausgebildet ist. Ein Apodisationsfilter ist ein Verlaufsfilter mit radial variierender Transmission, deren Verlauf beispielsweise einer Gauß-Funktion folgt. Beispielsweise wird mittels eines Apodisationsfilters die Lichtintensität in höheren Beugungsordnungen einer Punktbildfunktion unterdrückt. Dies wirkt sich in

dem erfindungsgemäßen optischen System positiv auf die Wahrnehmung der Bildgüte aus, sodass ein Bild weich und natürlich erscheint.

**[0034]** Bei einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass die Filtereinheit als ein optischer Raumfrequenzfilter ausgebildet ist. Mit einem optischen Raumfrequenzfilter ist es möglich, eine erwünschte Bildwirkung zu erzielen, beispielsweise die Hervorhebung oder Unterdrückung bestimmter Strukturen des vom Beobachter wahrgenommenen Bildes. Die Strukturen korrespondieren mit bestimmten Fourier-Komponenten (Raumfrequenz-Komponenten) in der Pupillenebene.

**[0035]** Bei einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator als ein statischer Wellenfrontmanipulator ausgebildet ist. Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einem statischen Wellenfrontmanipulator ein Wellenfrontmanipulator verstanden, der Fehlsichtigkeiten (Augenfehler) eines bestimmten Beobachters korrigiert. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist der statische Wellenfrontmanipulator nur für einen einzigen Beobachter vorgesehen. Beispielsweise weist der statische Wellenfrontmanipulator mindestens eine Linseneinheit auf. Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einer Linseneinheit eine Einheit verstanden, welche mindestens eine Linse aufweist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Linseneinheit nur eine einzige Linse oder mehrere Linsen aufweist. Bei einer Ausführungsform des statischen Wellenfrontmanipulators weist der Wellenfrontmanipulator mindestens eine erste Linseneinheit und mindestens eine zweite Linseneinheit auf. Die erste Linseneinheit weist eine erste sphärische Brechkraft und/oder eine erste zylindrische Brechkraft auf. Hingegen weist die zweite Linseneinheit eine zweite sphärische Brechkraft und/oder eine zweite zylindrische Brechkraft auf. Ferner ist mindestens eines der folgenden Merkmale gegeben: (a) die erste sphärische Brechkraft ist unterschiedlich zur zweiten sphärischen Brechkraft; (b) die erste zylindrische Brechkraft ist unterschiedlich zur zweiten zylindrischen Brechkraft. Bei einer weiteren Ausführungsform des statischen Wellenfrontmanipulators weist der Wellenfrontmanipulator mindestens eine Phasenplatte auf. Wie oben bereits ausgeführt, wird jede der Ausführungsformen der vorstehenden statischen Wellenfrontmanipulatoren stets für einen einzigen Beobachter verwendet.

**[0036]** Bei einer noch weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator als ein einstellbarer Wellenfrontmanipulator ausgebildet ist. Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einem einstellbaren

Wellenfrontmanipulator ein Wellenfrontmanipulator verstanden, dessen Manipulationseigenschaften einer Wellenfront einstellbar sind, beispielsweise durch Einstellung der Brechkraft des Wellenfrontmanipulators und/oder durch eine Bewegung des Wellenfrontmanipulators. Insbesondere ist es vorgesehen, dass der einstellbare Wellenfrontmanipulator mindestens eine Flüssiglinseneinheit aufweist. Die Brechkraft der Flüssiglinseneinheit ist variabel einstellbar. Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einer Flüssiglinseneinheit eine Einheit verstanden, welche mindestens eine Flüssiglinse aufweist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Flüssiglinseneinheit nur eine einzige Flüssiglinse oder mehrere Flüssiglinsen aufweist. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass der einstellbare Wellenfrontmanipulator mindestens eine Elastopolymerlinseneinheit aufweist. Die Brechkraft der Elastopolymerlinseneinheit ist variabel einstellbar. Dabei wird vorstehend und auch nachstehend unter einer Elastopolymerlinseneinheit eine Einheit verstanden, welche mindestens eine Elastopolymerlinse aufweist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Elastopolymerlinseneinheit nur eine einzige Elastopolymerlinse oder mehrere Elastopolymerlinsen aufweist. Wiederum zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass der einstellbare Wellenfrontmanipulator eine Stokes-Zelle aufweist. Bei dieser Ausführungsform des einstellbaren Wellenfrontmanipulators weist der Wellenfrontmanipulator mindestens eine erste Linseneinheit und mindestens eine zweite Linseneinheit auf. Die erste Linseneinheit ist als eine erste Zylinderlinseneinheit ausgebildet. Hingegen ist die zweite Linseneinheit als eine zweite Zylinderlinseneinheit ausgebildet. Die erste Linseneinheit und die zweite Linseneinheit sind beispielsweise an der optischen Achse angeordnet. Ferner sind die erste Linseneinheit sowie die zweite Linseneinheit relativ zueinander drehbar ausgebildet. Durch Änderung des Drehwinkels der ersten Linseneinheit relativ zur zweiten Linseneinheit ist es möglich, die Stärke und Achslage einer astigmatischen Wellenfront zu beeinflussen und somit den Astigmatismus eines Beobachters zu kompensieren, also zu korrigieren.

**[0037]** Bei einer wiederum weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator als ein einstellbarer Wellenfrontmanipulator ausgebildet ist. Der Wellenfrontmanipulator weist mindestens eine erste optische Einheit und mindestens eine zweite optische Einheit auf. Beispielsweise sind/ist die erste optische Einheit als eine erste optische Platte und/oder die zweite optische Einheit als eine zweite optische Platte ausgebildet. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die erste optische Einheit und/oder die zweite optische Einheit aus Kunststoff und/oder Glas, insbesondere Mineralglas ausgebildet sind/ist. Die erste optische

Einheit und die zweite optische Einheit sind beispielsweise entlang der optischen Achse in Lichteinfallrichtung oder entgegen der Lichteinfallrichtung hintereinander angeordnet. Ferner sind die erste optische Einheit und die zweite optische Einheit jeweils in einer Bewegungsrichtung senkrecht zu einer Bezugsachse, beispielsweise der optischen Achse des optischen Systems, relativ zueinander bewegbar angeordnet.

**[0038]** Die erste optische Einheit und die zweite optische Einheit weisen jeweils mindestens eine refraktive Freiformfläche auf. Die vorgenannte Ausführungsform des einstellbaren Wellenfrontmanipulators ist auch als Alvarez-Element bekannt. Hinsichtlich der Ausbildung, insbesondere der Ausbildung der Freiformflächen wird auf die DE 10 2012 101 262 B3 sowie die US 3,305,294 A verwiesen, deren Inhalt vollumfänglich in diese Patentanmeldung durch Verweis aufgenommen ist. Ferner wird auf die Veröffentlichung von I.A. Palusinski et al, „Lateral-shift variable aberration generators“ (einstellbare Aberrationserzeuger mit seitlicher Verschiebung) in Applied Optics, Band 38 (1999), Seite 86 bis 90 verwiesen, deren Inhalt ebenfalls vollumfänglich in diese Patentanmeldung durch Verweis aufgenommen ist.

**[0039]** Bei einer Ausführungsform des einstellbaren Wellenfrontmanipulators mit der ersten optischen Einheit und der zweiten optischen Einheit ist es vorgesehen, dass zwischen der ersten optischen Einheit und der zweiten optischen Einheit ein Immersionsmedium angeordnet ist, wobei das Immersionsmedium sowohl die erste optische Einheit als auch die zweite optische Einheit kontaktiert. Beispielsweise ist das Immersionsmedium als eine Flüssigkeit ausgebildet, insbesondere als hochreines Wasser, als organischer Kohlenwasserstoff, als eine Salzlösung oder als ein Immersionsöl. Die vorgenannte Aufzählung ist nicht abschließend zu verstehen. Vielmehr ist für die Erfindung jedes Immersionsmedium verwendbar, welches für die Erfindung geeignet ist. Bei einer weiteren Ausführungsform ist es vorgesehen, dass das Immersionsmedium als ein elastischer Optokitt ausgebildet ist. Mittels des elastischen Optokitts ist die erste optische Einheit an der zweiten optischen Einheit angeordnet.

**[0040]** Bei einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator einstellbar und wie folgt dargestellt ausgebildet ist. Bei dieser Ausführungsform weist der Wellenfrontmanipulator mindestens eine erste optische Komponente (also eine erste optische Einheit) und mindestens eine zweite optische Komponente (also eine zweite optische Einheit) auf, die entlang einer Bezugsachse hintereinander angeordnet sind, wobei die erste optische Komponente und die zweite optische Komponente senk-

recht zur Bezugsachse relativ zueinander bewegbar angeordnet sind. Die erste optische Komponente und die zweite optische Komponente umfassen jeweils ein erstes optisches Element und mindestens ein weiteres optisches Element mit voneinander abweichenden Brechzahlverläufen  $n_1(\lambda)$  und  $n_2(\lambda)$ , welche entlang der Bezugsachse hintereinander angeordnet sind. Die optischen Elemente weisen eine bezüglich lokaler Koordinaten  $x$  und  $y$  der optischen Komponente eine ortsabhängige Länge in  $z$ -Richtung parallel zur Bezugsachse auf, wobei der Index  $i$  das optische Element kennzeichnet.

**[0041]** Bei einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator einstellbar und wie folgt dargestellt ausgebildet ist. Bei dieser Ausführungsform weist der Wellenfrontmanipulator mindestens eine erste optische Komponente (also eine erste optische Einheit) und mindestens eine zweite optische Komponente (also eine zweite optische Einheit) auf, die entlang einer Bezugsachse hintereinander angeordnet sind. Die erste optische Komponente und die zweite optische Komponente sind in einer Ebene senkrecht zur Bezugsachse relativ zueinander bewegbar angeordnet. Die erste optische Komponente und die zweite optische Komponente umfassen jeweils ein erstes optisches Element mit mindestens einer Freiformfläche, einer Brechzahl  $n_1$  und einer Abbe-Zahl  $v_1$  und ein zweites optisches Element mit mindestens einer Freiformfläche, einer Brechzahl  $n_2$  und einer Abbe-Zahl  $v_2$ , welche entlang der Bezugsachse hintereinander angeordnet sind. Die Abbe-Zahlen  $v_1$  und  $v_2$  unterscheiden sich voneinander ( $v_1 \neq v_2$ ).

**[0042]** Die vorstehenden Ausführungsformen des Wellenfrontmanipulators beruhen auf den folgenden Überlegungen. Jede sphäro-zylindrische Fehlsichtigkeit eines Auges lässt sich durch einen einzelnen, zwei Freiformplatten mit Freiformprofilen aufweisenden Wellenfrontmanipulator korrigieren. Die Freiformprofile können durch folgendes Polynom beschrieben werden:

$$z(x, y) = K \cdot \left( x^2 \cdot y + \frac{y^3}{3} \right) \quad [1]$$

**[0043]** Hinsichtlich weiterer Einzelheiten wird auf die DE 10 2012 101 262 B3 verwiesen, deren Inhalt durch Verweis vollständig in diese Patentanmeldung aufgenommen ist. Wie in der DE 10 2012 101 262 B3 ausgeführt, ist die Wellenfrontänderungswirkung der zueinander lateral ausgelenkten Freiformplatten parallel zur Richtung der Verschiebung der Freiformplatten proportional zur Ableitung der Profildfunktion nach der Koordinate der Verschiebungsrichtung. Eine Auslenkung eines Freiformprofils nach der oben genannten Gleichung 1 parallel zur  $y$ -Richtung erzeugt daher einen einstellbaren rotationssymmetri-

schen parabolischen Anteil der Wellenfront, also eine kontinuierlich einstellbare Brechkraft, mit der die entsprechende Fehlsichtigkeit eines Auges (die eine im Vergleich zur Länge des Augapfels zu geringe (hyperope) oder zu große (myope) Brechkraft mit sich bringt) kompensiert werden kann. Eine Auslenkung desselben Freiformprofils parallel zur x-Richtung erzeugt dagegen einen astigmatischen Wellenfrontanteil, dessen Achslage (also azimutale Orientierung um die optische Achse bzw. Sehrichtung) durch eine gemeinsame Rotation der Freiformplatten um selbige Achse eingestellt wird. Auf diese Weise kann mit nur zwei Freiformplatten mit einander zugewandten Freiformprofilen gemäß der oben genannten Gleichung 1 jede beliebige sphäro-zylindrische Brechkraftkompensation eingestellt und somit eine entsprechende Fehlsichtigkeit des Auges optimal kompensiert werden. Grundsätzlich können auch Augenfehler höherer Ordnung durch entsprechende Profile mit Polynomen höherer Ordnung kompensiert werden, wie insbesondere in der DE 10 2012 101 262 B3 und in der Veröffentlichung von I.A. Palusinski et al, „Lateral-shift variable aberration generators“ (einstellbare Aberrationserzeuger mit seitlicher Verschiebung) in Applied Optics, Band 38 (1999), Seite 86 bis 90 ausgeführt ist.

**[0044]** Bei einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass eine Blendeneinheit an der Zwischenpupille angeordnet ist, wobei die Blendeneinheit von der Anzeigeeinheit ausgehende Strahlbündel beschneidet. Da das erfindungsgemäße optische System im Grunde eine konjugierte Gerätepupille bereitstellt, wird ermöglicht, dass der Beobachter unmittelbar und intuitiv wahrnimmt, wenn er mit seiner Augenposition den zulässigen Bereich der Eye-Box verlässt. Ferner wird dem Beobachter eine Rückmeldung vermittelt, in welcher Richtung und wie weit er sein Auge seitlich relativ zu einer Bezugsachse, beispielsweise der optischen Achse des erfindungsgemäßen optischen Systems, bewegen soll, um wieder ausreichend zentriert zur Bezugsachse des erfindungsgemäßen optischen Systems zu sein. Insofern löst diese Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems die Aufgabe, ein optisches System mit einer Anzeigeeinheit anzugeben, das eine das Auge eines Beobachters führende Begrenzung der Eye-Box aufweist. Mit anderen Worten ausgedrückt, soll ein optisches System mit einer Anzeigeeinheit angegeben werden, bei dem der Beobachter unmittelbar und intuitiv wahrnimmt, wenn er mit seiner Augenposition den zulässigen Bereich der Eye-Box verlässt, und bei dem ihm ferner eine Rückmeldung vermittelt wird, in welcher Richtung und wie weit er sein Auge seitlich relativ zur Bezugsachse des optischen Systems bewegen soll, um wieder ausreichend zentriert zur Bezugsachse des optischen Systems zu sein.

**[0045]** Bei einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass die Blendeneinheit als eine mechanische Blendeneinheit ausgebildet ist.

**[0046]** Bei einer noch weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass die Blendeneinheit mit einer kreisförmigen Blendenöffnung versehen ist, wobei eine Größe der Blendenöffnung fest vorgegeben oder einstellbar ist. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass die Blendeneinheit mit einer elliptischen Blendenöffnung versehen ist, wobei eine Größe der Blendenöffnung fest vorgegeben oder einstellbar ist. Eine elliptische Blendenöffnung ist von Vorteil, um eine Eye-Box bereitzustellen, die eine vertikal (also in der Höhe) und horizontal (also in der Breite) unterschiedliche Ausdehnung aufweist. Insbesondere bei Geräten zur binokularen Beobachtung (beispielsweise einem Fernglas oder einem Mikroskop mit binokularem Einblick) ist oft eine Eye-Box mit einer horizontalen (seitlichen) Ausdehnung von Vorteil, die größer ist als die vertikale Ausdehnung der Eye-Box, da zusätzlich zu der unvermeidbaren Kopfbewegung des Beobachters ein zusätzlicher Spielraum zur Berücksichtigung der zwischen verschiedenen Personen unterschiedlichen Pupillendistanzen zwischen einem rechtem Auge und einem linkem Auge wünschenswert ist.

**[0047]** Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die Erfindung nicht auf die vorgenannten Formen der Blendenöffnung eingeschränkt ist. Vielmehr kann die Blendenöffnung jegliche Form aufweisen, welche für die Erfindung geeignet ist und/oder für eine gewünschte Form der Eye-Box erforderlich ist.

**[0048]** Bei einer wiederum weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass die erste Linsengruppe eine Zwischenkaustik aufweist. Dabei ist vorstehend und auch nachstehend mit einer Zwischenkaustik ein Zwischenbild gemeint, bei dem die Lichtstrahlen, die von einem Feldpunkt ausgehen, in den beiden Hauptschnitten sich in unterschiedlicher axialer Position schneiden, so dass im herkömmlichen Sinne kein wahrnehmbares Zwischenbild vorliegt. Die Zwischenkaustik kann ein ebenes und korrigiertes Zwischenbild sein. Allerdings muss die Zwischenkaustik nicht als das vorbeschriebene Zwischenbild ausgebildet sein. Die Zwischenkaustik kann die Auslegung von Okularen mit einer großer Eye-Box und gleichzeitig kleiner Brennweite erleichtern.

**[0049]** Bei einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass ein erstes Strahlbündel von einem ersten Ort der Anzeigeeinheit in die Licht-

einfallsrichtung verläuft, dass ein zweites Strahlbündel von einem zweiten Ort der Anzeigeeinheit in die Lichteinfallsrichtung verläuft und dass das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel an der Zwischenpupille mindestens zu 70 % oder mindestens zu 80 % oder mindestens zu 90 % überlappen. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist bei dieser Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems vorgesehen, dass das erste Strahlbündel von dem ersten Ort der Anzeigeeinheit in die Lichteinfallsrichtung verläuft, dass das zweite Strahlbündel von dem zweiten Ort der Anzeigeeinheit in die Lichteinfallsrichtung verläuft und dass die zweite Linsengruppe derart ausgelegt ist, dass sich das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel an der Zwischenpupille mindestens zu 70 % oder mindestens zu 80 % oder mindestens zu 90 % überlappen. Die vorgenannte Ausführungsform gewährleistet, dass die Zwischenpupille von der ersten Linsengruppe ohne größere Abbildungsfehler in der Eye-Box abgebildet wird, so dass eine eindeutige Korrespondenz zwischen den Positionen in der Eye-Box und den entsprechenden Positionen in der konjugierten Zwischenpupille erhalten bleibt. Alle von den verschiedenen Bereichen der Anzeigeeinheit ausgehenden Strahlbündel werden durch die in der Ebene der Zwischenpupille angeordnete Blende gleichmäßig vignettiert. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass der Beobachter bei seitlicher Dezentrierung seiner Augenpupille eine gleichmäßig über den gesamten Bereich der Anzeigeeinheit auftretende Verringerung der Bildhelligkeit wahrnimmt, bevor schließlich ein vollständiger Beschnitt des Bildes eintritt.

**[0050]** Bei einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems ist es zusätzlich oder alternativ vorgesehen, dass das erfindungsgemäße optische System mit mindestens einer Augenverfolgungseinrichtung (also eine Eye-Tracking-Einrichtung) versehen ist. Die Augenverfolgungseinrichtung wird zur Bestimmung der Position der Augenpupille des Beobachters in dem räumlichen Bereich (also der Eye-Box) und zur Bestimmung der Blickrichtung des Beobachters verwendet. Wenn die Position der Augenpupille in dem räumlichen Bereich und die Blickrichtung des Beobachters bekannt sind, dann können mittels eines an der Zwischenpupille angeordneten Wellenfrontmanipulators feldwinkelabhängige, also blickwinkelabhängige Fehler des erfindungsgemäßen optischen Systems zumindest teilweise korrigiert werden. Es ist bekannt, dass eine gleichmäßig gute Korrektur eines großen Bildfeldes beispielsweise bei einem digitalen Okular oder einer Virtual-Reality-Einrichtung schwierig ist, da bis jetzt komplexe optische Systeme mit einer großen Anzahl an optischen Einheiten verwenden werden. Bei dem erfindungsgemäßen optischen System erfolgt nun abhängig von der bestimmten Position der Augenpupille und von der bestimmten Blickrichtung des Beobachters eine Auslenkung der opti-

schen Einheiten des Wellenfrontmanipulators, wobei die Auslenkung abhängig ist von dem zu betrachtenden Bereich (also einem „Region of Interest“) im Sehfeld. Damit wird eine zumindest teilweise Kompensation der an dem zu betrachtenden Bereich auftretenden Aberrationen ermöglicht.

**[0051]** Die Erfindung betrifft auch eine optische Einrichtung mit einem optischen System, das mindestens eines der weiter oben oder weiter unten genannten Merkmale oder eine Kombination von mindestens zwei der weiter oben oder weiter unten genannten Merkmale aufweist. Die optische Einrichtung ist als ein Fernglas, als ein Fernrohr, als ein Teleskop, als ein Lichtmikroskop, als ein Nachtsichtgerät, als ein digitaloptisches Gerät zur Verwendung in der Chirurgie, als ein Augmented-Reality-Gerät, als ein Virtual-Reality-Gerät und/oder als ein digitales Mikroskop, insbesondere als ein digitales Operationsmikroskop ausgebildet. Die vorgenannte Aufzählung ist nicht abschließend zu verstehen. Vielmehr kann als optische Einrichtung jegliche optische Einrichtung verwendet werden, die mit dem erfindungsgemäßen optischen System verwendbar ist.

**[0052]** Weitere praktische Ausführungsformen und Vorteile der Erfindung sind nachfolgend im Zusammenhang mit den Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Darstellung eines digitalen Mikroskops, insbesondere ein digitales Operationsmikroskop, mit einem optischen System gemäß der Erfindung;

**Fig. 2** eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines optischen Systems gemäß der Erfindung;

**Fig. 3** Systemdaten des optischen Systems gemäß der **Fig. 2**;

**Fig. 4** Asphärenkoeffizienten für Flächen des optischen Systems gemäß der **Fig. 2**;

**Fig. 5** eine schematische Darstellung eines Okulars des erfindungsgemäßen optischen Systems;

**Fig. 6** eine weitere schematische Darstellung eines Okulars des erfindungsgemäßen optischen Systems;

**Fig. 7** eine noch weitere schematische Darstellung eines Okulars des erfindungsgemäßen optischen Systems;

**Fig. 8** eine wiederum weitere schematische Darstellung eines Okulars des erfindungsgemäßen optischen Systems;

**Fig. 9** eine schematische Darstellung eines Öffnungsfehlers, von Bildschalenlagen und der Relativverzeichnung für ein optisches System

nach **Fig. 2** mit einem maximalen räumlichen Bereich;

**Fig. 10** eine schematische Darstellung eines Öffnungsfehlers, von Bildschalenlagen und der Relativverzeichnung für ein optisches System nach **Fig. 2** mit einer zentrierten Augenpupille von 3 mm Durchmesser;

**Fig. 11** eine schematische Darstellung der Queraberrationen für eine zentrierte Augenpupille von 3 mm Durchmesser bei einem optischen System nach **Fig. 2**;

**Fig. 12** eine schematische Darstellung der Queraberrationen für eine 1 mm seitlich relativ zur optischen Achse dezentrierte Augenpupille von 3 mm Durchmesser bei einem optischen System nach **Fig. 2**;

**Fig. 13** eine schematische Darstellung der Queraberrationen für eine 2 mm seitlich relativ zur optischen Achse dezentrierte Augenpupille von 3 mm Durchmesser bei einem optischen System nach **Fig. 2**;

**Fig. 14** Kurven einer Modulationstransferfunktion bei einem optischen System nach **Fig. 2** mit einer zentrierten Augenpupille von 3 mm Durchmesser;

**Fig. 15** Kurven einer Modulationstransferfunktion bei einem optischen System nach **Fig. 2** mit einer um 1 mm seitlich relativ zur optischen Achse dezentrierten Augenpupille von 3 mm Durchmesser; sowie

**Fig. 16** Kurven einer Modulationstransferfunktion bei einem optischen System nach **Fig. 2** mit einer um 2 mm seitlich relativ zur optischen Achse dezentrierten Augenpupille von 3 mm Durchmesser.

**[0053]** Das erfindungsgemäße optische System wird nun anhand einer optischen Einrichtung in Form eines digitalen Mikroskops, insbesondere ein digitales Operationsmikroskop, näher erläutert. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die Erfindung nicht auf die Verwendung bei einem digitalen Mikroskop eingeschränkt ist. Vielmehr kann die Erfindung für jegliches optische Gerät verwendet werden, für das die Erfindung geeignet ist. Beispielsweise ist das erfindungsgemäße optische System in einer optischen Einrichtung in Form eines Fernglases, eines Fernrohrs, eines Teleskops, eines Spektivs, eines Lichtmikroskops, eines digitaloptischen Geräts zur Verwendung in der Chirurgie, einer Augmented-Reality-Einrichtung, einer Virtual-Reality-Einrichtung und/oder eines Nachtsichtgeräts angeordnet.

**[0054]** **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung eines digitalen Mikroskops 1, mit dem ein Benutzer des digitalen Mikroskops 1 durch Ansetzen eines Auges 2 an dem digitalen Mikroskop 1 ein Objekt O

beobachten kann. Das digitale Mikroskop 1 weist ein Objektiv 3 und einen Detektor 4 auf. Der Detektor 4 detektiert Lichtstrahlen, welche von dem Objekt O durch das Objektiv 3 fallen und erzeugt Detektionssignale. Diese Detektionssignale werden elektronisch derart umgesetzt, dass sie auf einer Anzeigeeinheit 5 als ein Bild dargestellt werden. Ferner weist das Nachtsichtgerät 1 ein Okular 6 auf, mit dem der Benutzer des digitalen Mikroskops 1 das auf der Anzeigeeinheit 5 dargestellte Bild betrachten kann.

**[0055]** Der Detektor 4 kann beispielsweise als CCD-Detektor oder CMOS-Detektor ausgebildet sein. Die Erfindung ist aber nicht auf die vorgenannten Ausführungsformen eingeschränkt. Vielmehr kann der Detektor 4 jeder Detektor sein, welcher für die Erfindung geeignet ist.

**[0056]** Als Anzeigeeinheit 5 kann beispielsweise ein Feldemissionsbildschirm, ein Flüssigkristallbildschirm, ein Dünnschichttransistorbildschirm, ein Plasmabildschirm, ein SED (Surface Conduction Electron Emitter Display) oder ein Bildschirm, der organische Leuchtdioden aufweist, verwendet werden. Die vorgenannte Aufzählung ist nicht abschließend. Vielmehr kann als Anzeigeeinheit 5 jegliche Anzeigeeinheit verwendet werden, welche für die Erfindung geeignet ist.

**[0057]** Wie in **Fig. 1** dargestellt, treten die von dem Objekt O stammenden Lichtstrahlen in einer Lichteinfallrichtung L in das digitale Mikroskop 1 ein. Die Lichtstrahlen durchlaufen daher zunächst das Objektiv 3 und werden dann vom Detektor 4 detektiert.

**[0058]** Die Anordnung der oben genannten Einheiten des digitalen Mikroskops 1 entlang einer optischen Achse OA des digitalen Mikroskops 1 kann man beispielsweise wie folgt beschreiben: Entgegen der Lichteinfallrichtung L, d. h. vom Auge 2 in Richtung des Objekts O gesehen, sind zunächst das Okular 6, dann die Anzeigeeinheit 5, dann der Detektor 4 und dann das Objektiv 3 entlang der optischen Achse OA des digitalen Mikroskops 1 angeordnet.

**[0059]** Ein optisches System gemäß der Erfindung ist in der **Fig. 1** mit gestrichelten Linien dargestellt und ist mit dem Bezugszeichen 7 versehen. Das erfindungsgemäße optische System 7 weist das Okular 6 und die Anzeigeeinheit 5 auf.

**[0060]** **Fig. 2** zeigt eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7, das eine optische Achse OA aufweist, welche der optischen Achse OA des digitalen Mikroskops 1 entspricht. Wie oben bereits ausgeführt, ist diese Ausführungsform des optischen Systems 7 durchaus auch in einer optischen Einrichtung in Form eines Fernglases, eines Fernrohrs, eines Teleskops, eines Spek-

tivs, eines Lichtmikroskops, eines digitaloptischen Geräts zur Verwendung in der Chirurgie, einer Augmented-Reality-Einrichtung, einer Virtual-Reality-Einrichtung und/oder eines Nachtsichtgeräts angeordnet. Ein Okular 6 weist eine erste Linsengruppe LG1 und eine zweite Linsengruppe LG2 auf. Entgegen der Lichteinfallrichtung L gesehen sind zunächst die erste Linsengruppe LG1 und dann die zweite Linsengruppe LG2 entlang der optischen Achse OA angeordnet. Eine Zwischenpupille ZP ist zwischen der ersten Linsengruppe LG1 und der zweiten Linsengruppe LG2 angeordnet.

**[0061]** Die erste Linsengruppe LG1 der Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 gemäß der **Fig. 2** weist eine erste Linse L1, eine zweite Linse L2, eine dritte Linse L3, eine vierte Linse L4, eine fünfte Linse L5, eine sechste Linse L6 und eine siebte Linse L7 auf. Entgegen der Lichteinfallrichtung L gesehen sind zunächst die erste Linse L1, dann die zweite Linse L2, dann die dritte Linse L3, dann die vierte Linse L4, dann die fünfte Linse L5, dann die sechste Linse L6 und dann die siebte Linse L7 entlang der optischen Achse OA angeordnet.

**[0062]** Die zweite Linsengruppe LG2 der Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 gemäß der **Fig. 2** weist eine achte Linse L8, eine neunte Linse L9, eine zehnte Linse L10, eine elfte Linse L11, eine zwölfte Linse L12, eine dreizehnte Linse L13 und eine vierzehnte Linse L14 auf. Entgegen der Lichteinfallrichtung L gesehen sind zunächst die achte Linse L8, dann die neunte Linse L9, dann die zehnte Linse L10, dann die elfte Linse L11, dann die zwölfte Linse L12, dann die dreizehnte Linse L13 und dann die vierzehnte Linse L14 entlang der optischen Achse OA angeordnet.

**[0063]** Die erste Linsengruppe LG1 kann auch als Pupillen-Relay-Einheit bezeichnet werden. Unter einer Linsengruppe wird eine Gruppe verstanden, welche mindestens eine optische Baueinheit beispielsweise in Form einer Linse aufweist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Linsengruppe nur eine einzige Linse oder mehrere Linsen aufweist.

**[0064]** Zwischen der ersten Linse L1 und einer Augenpupille des Auges 2 ist keine weitere optische Einheit des optischen Systems 7 angeordnet. Der Abstand von der Augenpupille zur ersten Linse L1 beträgt ca. 18,4 mm. Dieser Wert ist hier derart gewählt, dass sich auch am Rand der leicht konkav geformten Vorderseite der ersten Linse L1 ein besonders bevorzugter Abstand von ca. 18 mm ergibt.

**[0065]** Die Anzeigeeinheit 5 ist bei dieser Ausführungsform des optischen Systems 7 derart ausgelegt, dass sich für eine Anzeige mit einem Sehfeld von 19,2 mm Durchmesser ein großer scheinbarer

Sehfelddurchmesser von 60° ergibt, wenn das Sehfeld an der Anzeigeeinheit 5 voll ausgefüllt ist. Die Anzeigeeinheit 5 weist beispielsweise eine 1-Zoll-Anzeige mit einer Auflösung von 2096 x 2096 Pixeln auf, in die ein kreisrundes Gesichtsfeld von 18,4 mm Durchmesser einbeschrieben werden kann. Dann ist der scheinbare Sehfelddurchmesser etwas geringer als 60%. Der Bildkreis wird von dem Okular 6 unter einer möglichen Berücksichtigung einer kissenförmigen Verzeichnung (also eine vom Auge zur Anzeigeeinheit 5 negative - also tonnenförmige - Verzeichnung) von -5,3 % in das kreisrunde scheinbare Gesichtsfeld des Beobachters von 60° Durchmesser abgebildet. Dies erfüllt die Merlitz-Bedingung. Es wird auf die Ausführungen weiter unten verwiesen.

**[0066]** Die paraxiale Brennweite des Okulars 6 dieser Ausführungsform des optischen Systems 7 beträgt 17,55 mm. Ferner ist an dem Okular 6 ein vorgebbarer räumlicher Bereich B angeordnet, in welchem das Auge 2 derart bewegbar ist, ohne dass ein vorgebbarer Schwellenwert einer Bildgüte einer mit dem Okular 6 erzeugten Abbildung des Bilds unterschritten wird. Der vorgebbare Bereich B ist die bereits weiter oben definierte Eye-Box. In der Lichteinfallrichtung L sind ausgehend von der Anzeigeeinheit 5 in Richtung des räumlichen Bereichs B gesehen zunächst die Anzeigeeinheit 5, dann das Okular 6 und dann der räumliche Bereich B angeordnet.

**[0067]** Wie oben bereits ausgeführt, ist die Zwischenpupille ZP zwischen der ersten Linsengruppe LG1 und der zweiten Linsengruppe LG2 angeordnet. Die zweite Linsengruppe LG2 ist zur Abbildung des von der Anzeigeeinheit 5 angezeigten Bilds in die Zwischenpupille ZP ausgelegt. Darüber hinaus ist die erste Linsengruppe LG1 zur Abbildung des in der Zwischenpupille ZP angeordneten Bilds in den räumlichen Bereich B ausgelegt. Die Zwischenpupille ZP und der räumliche Bereich B sind zueinander konjugiert.

**[0068]** Eine Einheit E ist an der Zwischenpupille ZP angeordnet. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist die Einheit E am Ort der Zwischenpupille ZP angeordnet. Mit wiederum anderen Worten ausgedrückt, ist die Einheit E in einer Ebene am Ort der Zwischenpupille ZP angeordnet. Ausführungsformen der Einheit E werden weiter unten erläutert.

**[0069]** Die erste Linsengruppe LG1 weist eine Zwischenkaustik ZB auf, die bei dieser Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 zwischen der dritten Linse L3 und der vierten Linse L4 angeordnet ist. Die Zwischenkaustik ZB kann ein ebenes und korrigiertes Zwischenbild sein. Allerdings muss die Zwischenkaustik ZB nicht als das vorbeschriebene Zwischenbild ausgebildet sein. Die Zwischenkaustik kann die Auslegung eines Okulars

6 mit einer großer Eye-Box und gleichzeitig kleiner Brennweite erleichtern.

**[0070]** Die Ausführungsform des optischen Systems 7 gemäß der **Fig. 2** ist für eine maximale Eye-Box von 7 mm Durchmesser ausgelegt. Dies bedeutet, dass der Beobachter mit einer angenommenen Augenpupille von 3 mm Durchmesser (wobei von einem auf mäßige Helligkeit adaptierten Auge ausgegangen wird) eine Augenposition an der optischen Achse OA zu jeder Seite um maximal 2 mm bewegen kann, bevor irgendeine Vignettierung eintritt.

**[0071]** Die Systemdaten der Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 gemäß der **Fig. 2** gehen aus der Tabelle der **Fig. 3** hervor. Mit der Fläche 0 ist eine Fläche in unendlicher Entfernung vor dem optischen System 7 auf der Seite des Auges 2 bezeichnet. Ferner ist mit der Fläche 1 die Fläche der Augenpupille des Auges 2 bezeichnet. Licht tritt kollimiert aus dem optischen System 7 aus und tritt in die Augenpupille (Fläche 1) ein. Die erste Linse L1 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 2 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 3 auf. Die zweite Linse L2 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 4 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 5 auf. Die dritte Linse L3 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 6 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 7 auf. Die Zwischenkaustik ZB ist mit der Fläche 8 bezeichnet. Die vierte Linse L4 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 9 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 10 auf. Die fünfte Linse L5 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 11 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 12 auf. Ferner weist die sechste Linse L6 eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 13 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 14 auf. Die siebte Linse L7 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 15 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 16 auf. Die Zwischenpupille ist mit der Fläche 17 bezeichnet. Die achte Linse L8 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 18 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 19 auf. Die neunte Linse L9 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 20 auf. Die zehnte Linse L10 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 21 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 22 auf. Die elfte Linse L11 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 23 auf. Ferner weist die zwölfte Linse L12 eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 24 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 25 auf. Die dreizehnte Linse L13 weist eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 26 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 27 auf. Ferner weist die vierzehnte Linse L14 eine zum Auge 2 gerichtete Fläche 28 und eine zur Anzeigeeinheit 5 gerichtete Fläche 29 auf. Mit der Fläche 30 ist die Fläche der Anzeigeeinheit 5 bezeichnet.

**[0072]** Ferner sind in der Tabelle der **Fig. 3** die Radien der einzelnen Flächen und die Dicken der

einzelnen Linsen des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 gemäß der **Fig. 2** angegeben, wobei die Dicke einer Linse durch den Abstand eines ersten Scheitelpunkts einer zum Auge 2 gerichteten Fläche der Linse an der optischen Achse OA zu einem zweiten Scheitelpunkt einer zur Anzeigeeinheit 5 gerichteten Fläche der Linse an der optischen Achse OA definiert ist. Eine Dicke zwischen zwei der vorgenannten Linsen bezeichnet den Abstand zwischen zwei Scheitelpunkten zweier benachbarter Flächen zweier Linsen.

**[0073]** Die Tabelle der **Fig. 3** gibt das Material der einzelnen Linsen an, wobei die Materialangabe der Nomenklatur des Unternehmens OHARA entspricht. Allerdings sind die fünfte Linse L5 und die sechste Linse L6 aus einem Material des Unternehmens Schott gebildet. Ferner ist in der Tabelle der **Fig. 3** der halbe Durchmesser der einzelnen Linsen angegeben. Einige Flächen sind asphärisch ausgebildet. Die asphärische Ausbildung der vorgenannten Flächen wird durch die Asphärenformel bestimmt, die gegeben ist durch

$$z(h) = \frac{h^2}{R \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \frac{h^2}{R^2}} \right)} + \sum_{i=2}^M C_{i-1} h^{2i} \quad [1]$$

wobei

- (i) z die Pfeilhöhe ist,
- (ii) h die Einfallshöhe eines Lichtstrahls auf der asphärischen Fläche der Linse ist,
- (iii) k die konische Konstante ist,
- (iv) R der Scheitelradius der Fläche ist, und
- (v)  $C_i$  Asphärenkoeffizienten sind.

**[0074]** Die Asphärenkoeffizienten und die konische Konstante sind in der Tabelle der **Fig. 4** angegeben.

**[0075]** **Fig. 5** zeigt eine schematische Darstellung des Okulars 6 des erfindungsgemäßen optischen Systems 7. Dargestellt sind die optische Achse OA, die erste Linsengruppe LG1, die zweite Linsengruppe LG2, die zwischen der ersten Linsengruppe LG1 und der zweiten Linsengruppe LG2 angeordnete Zwischenpupille ZP sowie die Einheit E, die an der Zwischenpupille ZP angeordnet ist.

**[0076]** Das erfindungsgemäße optische System 7 weist eine Antriebseinheit 10 zur Bewegung der Einheit E auf. Die Antriebseinheit 10 ist wirkend an der Einheit E angeordnet. Die Einheit E ist derart beweglich ausgebildet, dass die Einheit E von einer ersten Position POS1 außerhalb der Zwischenpupille ZP, die in **Fig. 5** gestrichelt dargestellt ist, in eine zweite

Position POS2 an der Zwischenpupille ZP bewegbar ist. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist die Einheit E von der ersten Position POS1 in die zweite Position POS2 bewegbar. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass die Einheit E von der zweiten Position POS2 in die erste Position POS1 bewegbar ist. Die Antriebseinheit 10 ist beispielsweise als mechanische und/oder elektrische Antriebseinheit ausgebildet. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Einheit E von der ersten Position POS1 in die zweite Position POS2 an der Zwischenpupille ZP eingeschwenkt wird oder von der zweiten Position POS2 in die erste Position POS1 aus der Zwischenpupille ZP herausgeschwenkt wird.

**[0077]** Die Einheit E ist beispielsweise als Filtereinheit FE und/oder als Wellenfrontmanipulator WM ausgebildet. Mit anderen Worten ausgedrückt, sind/ist die Filtereinheit FE und/oder der Wellenfrontmanipulator WM in einer Ebene am Ort der Zwischenpupille ZP angeordnet.

**[0078]** Die Filtereinheit FE ist derart beweglich ausgebildet, dass die Filtereinheit FE von der ersten Position POS1 (nämlich eine erste Filtereinheits-Position) außerhalb der Zwischenpupille ZP in die zweite Position POS2 (nämlich eine zweite Filtereinheits-Position) an der Zwischenpupille ZP bewegbar ist. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist die Filtereinheit FE von der ersten Filtereinheits-Position in die zweite Filtereinheits-Position bewegbar. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass die Filtereinheit FE von der zweiten Filtereinheits-Position in die erste Filtereinheits-Position bewegbar ist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Filtereinheit FE von der ersten Filtereinheits-Position in die zweite Filtereinheits-Position an der Zwischenpupille ZP eingeschwenkt wird oder von der zweiten Filtereinheits-Position in die erste Filtereinheits-Position aus der Zwischenpupille ZP herausgeschwenkt wird.

**[0079]** Der Wellenfrontmanipulator WM ist derart beweglich ausgebildet, dass der Wellenfrontmanipulator WM von der ersten Position POS1 (einer ersten Wellenfrontmanipulator-Position) außerhalb der Zwischenpupille ZP in die zweite Position POS2 (eine zweite Wellenfrontmanipulator-Position) an der Zwischenpupille ZP bewegbar ist. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist der Wellenfrontmanipulator WM von der ersten Wellenfrontmanipulator-Position in die zweite Wellenfrontmanipulator-Position bewegbar. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator WM von der zweiten Wellenfrontmanipulator-Position in die erste Wellenfrontmanipulator-Position bewegbar ist. Insbesondere ist es vorgesehen, dass der Wellenfrontmanipulator WM von der ersten Wellenfrontmanipulator-Position in die zweite Wellenfrontmanipulator-Position an der Zwischenpupille ZP eingeschwenkt wird oder von der zweiten Wellenfrontmanipulator-

Position in die erste Wellenfrontmanipulator-Position aus der Zwischenpupille ZP herausgeschwenkt wird.

**[0080]** Bei einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 ist die Antriebseinheit 10 als eine erste Antriebseinheit ausgebildet. Zusätzlich ist an dem erfindungsgemäßen optischen System 7 eine zweite Antriebseinheit 11 angeordnet. Die erste Antriebseinheit 10 ist dann zur Bewegung der Filtereinheit FE ausgebildet. Hingegen ist die zweite Antriebseinheit 11 zur Bewegung des Wellenfrontmanipulators WM ausgebildet.

**[0081]** Die Filtereinheit FE ist beispielsweise als ein Anti-Aliasing-Filter ausgebildet. Insbesondere weist der Anti-Aliasing-Filter ein doppelbrechendes Plättchen oder doppelbrechende Schichten auf. Die Doppelbrechung des doppelbrechenden Plättchens oder der doppelbrechenden Schichten kann derart gewählt werden, dass eine Modulationstransferfunktion des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 jenseits der Nyquist-Frequenz oder jenseits eines Bruchteils der Nyquist-Frequenz gezielt gedämpft wird. Optische Baueinheiten mit doppelbrechenden Schichten oder doppelbrechenden Plättchen aus Quarz oder Lithiumniobat sind bereits aus dem Stand der Technik bekannt. Die vorgenannten Filtereinheiten FE eignen sich besonders gut, um Störeffekte in Form von Aliasing-Effekten und aufgrund einer Wahrnehmbarkeit Moire-artiger Effekte zu verringern.

**[0082]** Die Filtereinheit FE ist alternativ als ein Apodisationsfilter ausgebildet. Wie oben erwähnt, ist ein Apodisationsfilter ein Verlaufsfiter mit radial variierender Transmission, deren Verlauf beispielsweise einer Gauß-Funktion folgt. Beispielsweise wird mittels des Apodisationsfilters die Lichtintensität in höheren Beugungsordnungen einer Punktbildfunktion unterdrückt. Dies wirkt sich in dem erfindungsgemäßen optischen System 7 positiv auf die Wahrnehmung der Bildgüte aus, sodass ein Bild weich und natürlich erscheint.

**[0083]** Alternativ ist die Filtereinheit FE als ein optischer Raumfrequenzfilter ausgebildet. Mit einem optischen Raumfrequenzfilter ist es möglich, eine erwünschte Bildwirkung zu erzielen, beispielsweise die Hervorhebung oder Unterdrückung bestimmter Strukturen des vom Beobachter wahrgenommenen Bildes. Die Strukturen korrespondieren mit bestimmten Fourier-Komponenten (Raumfrequenz-Komponenten) in der Pupillenebene.

**[0084]** Der Wellenfrontmanipulator WM ist beispielsweise als ein statischer Wellenfrontmanipulator WM ausgebildet. Wie oben bereits erläutert, wird unter einem statischen Wellenfrontmanipulator WM ein Wellenfrontmanipulator verstanden, der Fehlsichtigkeiten (Augenfehler) eines bestimmten Beobachters

korrigiert. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist der statische Wellenfrontmanipulator WM nur für einen einzigen Beobachter vorgesehen.

**[0085]** Fig. 6 zeigt eine weitere schematische Darstellung des Okulars 6 des erfindungsgemäßen optischen Systems 7. Fig. 6 beruht auf der Fig. 5. Gleiche Bauteile sind mit gleichen Bezugszeichen versehen. Dargestellt sind die optische Achse OA, die erste Linsengruppe LG1, die zweite Linsengruppe LG2, die Antriebseinheit 10 sowie die zwischen der ersten Linsengruppe LG1 und der zweiten Linsengruppe LG2 angeordnete Zwischenpupille ZP. Ferner zeigt die Fig. 6 einen statischen Wellenfrontmanipulator WM in Form einer ersten Linseneinheit LE1, welche mittels der Antriebseinheit 10 an den Ort der Zwischenpupille ZP bewegbar ist. Die erste Linseneinheit LE1 ist derart ausgebildet, dass sie Fehlsichtigkeiten eines bestimmten Beobachters korrigiert. Bei einer weiteren Ausführungsform ist zusätzlich zur ersten Linseneinheit LE1 eine zweite Linseneinheit LE2 im Okular 6 angeordnet. Die Linseneinheit LE1 und oder die Linseneinheit LE2 sind mit der Antriebseinheit 10 an den Ort der Zwischenpupille ZP bewegbar. Beispielsweise ist die Antriebseinheit 10 als ein Rad ausgebildet, an welchem die erste Linseneinheit LE1 und die zweite Linseneinheit LE2 an unterschiedlichen Positionen angeordnet sind. Durch Drehen des Rades wird jeweils eine der vorgenannten Linseneinheiten LE1, LE2 am Ort der Zwischenpupille ZP angeordnet. Die erste Linseneinheit LE1 weist eine erste sphärische Brechkraft und/oder eine erste zylindrische Brechkraft auf. Hingegen weist die zweite Linseneinheit LE2 eine zweite sphärische Brechkraft und/oder eine zweite zylindrische Brechkraft auf. Ferner ist mindestens eines der folgenden Merkmale gegeben: (a) die erste sphärische Brechkraft ist unterschiedlich zur zweiten sphärischen Brechkraft; (b) die erste zylindrische Brechkraft ist unterschiedlich zur zweiten zylindrischen Brechkraft.

**[0086]** Bei einer weiteren Ausführungsform des statischen Wellenfrontmanipulators WM weist der Wellenfrontmanipulator WM mindestens eine Phasenplatte auf. Die Phasenplatte ist ebenfalls derart ausgebildet, dass sie die Fehlsichtigkeiten eines bestimmten Beobachters korrigiert.

**[0087]** Wie oben hinsichtlich der Fig. 5 erläutert, kann die Einheit E als Wellenfrontmanipulator WM ausgebildet sein. Beispielsweise ist der Wellenfrontmanipulator WM als ein einstellbarer Wellenfrontmanipulator WM ausgebildet. Wie oben erläutert, wird unter einem einstellbaren Wellenfrontmanipulator WM ein Wellenfrontmanipulator verstanden, dessen Manipulationseigenschaften einer Wellenfront einstellbar sind, beispielsweise durch Einstellung der Brechkraft des Wellenfrontmanipulators WM und/oder durch eine Bewegung des Wellenfrontmanipula-

tors WM. Mittels des einstellbaren Wellenfrontmanipulators WM ist es möglich, zum einen individuelle Fehlsichtigkeiten (Augenfehler) eines Beobachters in der Zwischenpupille ZP zu korrigieren und zum anderen das erfindungsgemäße optische System für mehrere Beobachter zu verwenden, wobei mittels des einstellbaren Wellenfrontmanipulators WM die Fehlsichtigkeiten (Augenfehler) des Beobachters, welcher das erfindungsgemäße optische System gerade benutzt, korrigierbar sind.

**[0088]** Insbesondere ist es vorgesehen, dass der einstellbare Wellenfrontmanipulator WM mindestens eine Flüssiglinseneinheit aufweist oder durch eine Flüssiglinseneinheit gebildet ist. Die Brechkraft der Flüssiglinseneinheit ist variabel einstellbar. Wie oben bereits erläutert, wird unter einer Flüssiglinseneinheit eine Einheit verstanden, welche mindestens eine Flüssiglinseneinheit aufweist. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass der einstellbare Wellenfrontmanipulator WM mindestens eine Elastopolymerlinseneinheit aufweist. Die Brechkraft der Elastopolymerlinseneinheit ist variabel einstellbar. Wie ebenfalls oben erläutert, wird unter einer Elastopolymerlinseneinheit eine Einheit verstanden, welche mindestens eine Elastopolymerlinse aufweist.

**[0089]** Fig. 7 zeigt eine weitere schematische Darstellung des Okulars 6 des erfindungsgemäßen optischen Systems 7. Fig. 7 beruht auf der Fig. 5. Gleiche Bauteile sind mit gleichen Bezugszeichen versehen. Dargestellt sind die optische Achse OA, die erste Linsengruppe LG1, die zweite Linsengruppe LG2, die Antriebseinheit 10 sowie die zwischen der ersten Linsengruppe LG1 und der zweiten Linsengruppe LG2 angeordnete Zwischenpupille ZP. Ferner zeigt die Fig. 7 einen an der Zwischenpupille ZP angeordneten einstellbaren Wellenfrontmanipulator WM, der eine erste Linseneinheit LE1A und eine zweite Linseneinheit LE2A aufweist. Entgegen der Lichteinfallrichtung L gesehen ist zunächst die erste Linseneinheit LE1A und dann die zweite Linseneinheit LE2A an der optischen Achse OA angeordnet. Die erste Linseneinheit LE1A ist als eine erste Zylinderlinseneinheit ausgebildet. Hingegen ist die zweite Linseneinheit LE2A als eine zweite Zylinderlinseneinheit ausgebildet. Ferner sind die erste Linseneinheit LE1A sowie die zweite Linseneinheit LE2A relativ zueinander drehbar ausgebildet. Durch Änderung des Drehwinkels der ersten Linseneinheit LE1A relativ zur zweiten Linseneinheit LE2A ist es möglich, die Stärke und Achslage einer astigmatischen Wellenfront zu beeinflussen und somit den Astigmatismus eines Beobachters zu kompensieren, also zu korrigieren.

**[0090]** Fig. 8 zeigt eine weitere schematische Darstellung des Okulars 6 des erfindungsgemäßen optischen Systems 7. Fig. 8 beruht auf der Fig. 5. Gleiche Bauteile sind mit gleichen Bezugszeichen

versehen. Dargestellt sind die optische Achse OA, die erste Linsengruppe LG1, die zweite Linsengruppe LG2, die Antriebseinheit 10 sowie die zwischen der ersten Linsengruppe LG1 und der zweiten Linsengruppe LG2 angeordnete Zwischenpupille ZP. Ferner zeigt die **Fig. 8** einen an der Zwischenpupille ZP angeordneten einstellbaren Wellenfrontmanipulator WM, der als Alvarez-Element ausgebildet ist. Der einstellbare Wellenfrontmanipulator WM weist eine erste optische Einheit 20 und eine zweite optische Einheit 21 auf. Entgegen der Lichteinfallrichtung L ist zunächst die erste optische Einheit 20 und dann die zweite optische Einheit 21 an der optischen Achse OA angeordnet. Die erste optische Einheit 20 und die zweite optische Einheit 21 sind jeweils in einer Bewegungsrichtung senkrecht zur optischen Achse OA relativ zueinander bewegbar angeordnet. Zur Bewegung der ersten optischen Einheit 20 und/oder der zweiten optischen Einheit 21 ist die Antriebseinheit 10 wirkend an der ersten optischen Einheit 20 und/oder der zweiten optischen Einheit 21 angeordnet. Die erste optische Einheit 20 weist eine refraktive erste Freiformfläche 22 sowie eine erste Planfläche 24 auf, welche an einer von der ersten Freiformfläche 22 abgewandten Seite der ersten optischen Einheit 20 angeordnet ist. Die zweite optische Einheit 21 weist eine refraktive zweite Freiformfläche 23 sowie eine zweite Planfläche 25 auf, welche an einer von der zweiten Freiformfläche 23 abgewandten Seite der zweiten optischen Einheit 21 angeordnet ist. Die erste optische Einheit 20 und die zweite optische Einheit 21 sind derart relativ zueinander angeordnet, dass die erste Freiformfläche 22 und die zweite Freiformfläche 23 einander gegenüberliegend angeordnet sind. In einer Null-Position des einstellbaren Wellenfrontmanipulators WM sind die erste Freiformfläche 22 und die zweite Freiformfläche 23 komplementär zueinander angeordnet. Somit bilden die erste optische Einheit 20 und die zweite optische Einheit 21 in der Null-Position eine planparallele Platte. Die erste optische Einheit 20 und die zweite optische Einheit 21 sind transversal zur optischen Achse OA verschiebbar. Beispielsweise ist die erste optische Einheit 20 in Richtung +y verschiebbar (vgl. **Fig. 8**). Ferner ist die zweite optische Einheit 21 beispielsweise in Richtung -y verschiebbar (vgl. **Fig. 8**). Insbesondere erfolgen die Verschiebungen gegenläufig um die gleichen Beträge.

**[0091]** Bei einer weiteren Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators WM umfassen die erste optische Einheit 20 und die zweite optische Einheit 21 jeweils ein erstes optisches Element und mindestens ein weiteres optisches Element mit voneinander abweichenden Brechzahlverläufen  $n_1(\lambda)$  und  $n_i(\lambda)$ , welche entlang der Bezugsachse in Form der optischen Achse OA hintereinander angeordnet sind. Die optischen Elemente weisen eine bezüglich lokaler Koordinaten x und y der jeweiligen optischen Ein-

heit 20, 21 eine ortsabhängige Länge in z-Richtung parallel zur Bezugsachse auf, wobei der Index i das optische Element kennzeichnet.

**[0092]** Bei einer noch weiteren Ausführungsform des Wellenfrontmanipulators WM umfassen die erste optische Einheit 20 und die zweite optische Einheit 21 jeweils ein erstes optisches Element mit mindestens einer Freiformfläche, einer Brechzahl  $n_1$  und einer Abbe-Zahl  $v_1$  sowie ein zweites optisches Element mit mindestens einer Freiformfläche, einer Brechzahl  $n_2$  und einer Abbe-Zahl  $v_2$ , welche entlang der Bezugsachse in Form der optischen Achse OA hintereinander angeordnet sind. Die Abbe-Zahlen  $v_1$  und  $v_2$  unterscheiden sich voneinander ( $v_1 \neq v_2$ ).

**[0093]** Beispielsweise ist zwischen der ersten optischen Einheit 20 und der zweiten optischen Einheit 21 ein Immersionsmedium 26 angeordnet. Das Immersionsmedium 26 kontaktiert sowohl die erste optische Einheit 20 als auch die zweite optische Einheit 21. Beispielsweise ist das Immersionsmedium 26 als eine Flüssigkeit ausgebildet, insbesondere als hochreines Wasser, als organischer Kohlenwasserstoff, als eine Salzlösung oder als ein Immersionsöl. Die vorgenannte Aufzählung ist nicht abschließend zu verstehen. Vielmehr ist für die Erfindung jedes Immersionsmedium 26 verwendbar, welches für die Erfindung geeignet ist. Bei einer weiteren Ausführungsform ist es vorgesehen, dass das Immersionsmedium 26 als ein elastischer Optokitt ausgebildet ist. Mittels des elastischen Optokitts ist die erste optische Einheit 20 an der zweiten optischen Einheit 21 angeordnet.

**[0094]** Die in **Fig. 8** dargestellte Ausführungsform des Okulars 6 wird insbesondere in einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 verwendet, welches eine Augenverfolgungseinrichtung 27 aufweist (vgl. auch **Fig. 1**). Die Augenverfolgungseinrichtung 27 (auch als Eye-Tracking-Einrichtung bezeichnet) wird zur Bestimmung der Position der Augenpupille in dem räumlichen Bereich B (also der Eye-Box) und zur Bestimmung der Blickrichtung des Beobachters verwendet. Wenn die Position der Augenpupille in dem räumlichen Bereich B und die Blickrichtung des Beobachters bekannt ist, dann können mittels des an der Zwischenpupille ZP angeordneten Wellenfrontmanipulators WM feldwinkelabhängige, also blickwinkelabhängige Fehler des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 zumindest teilweise korrigiert werden. Es ist bekannt, dass eine gleichmäßig gute Korrektur eines großen Bildfeldes beispielsweise bei einem digitalen Okular oder einer Virtual-Reality-Einrichtung schwierig ist, da bis jetzt komplexe optische Systeme mit einer großen Anzahl an optischen Einheiten verwendet werden. Bei dem erfindungsgemäßen optischen System 7 erfolgt nun abhängig von der bestimmten Position der Augenpu-

pille und von der bestimmten Blickrichtung des Beobachters eine Auslenkung der ersten optischen Einheit 20 und der zweiten optischen Einheit 21 des Wellenfrontmanipulators WM, wobei die Auslenkung abhängig ist von dem zu betrachtenden Bereich (also einem „Region of Interest“) im Sehfeld. Damit wird eine zumindest teilweise Kompensation der an dem zu betrachtenden Bereich auftretenden Aberrationen ermöglicht.

**[0095]** Bereits weiter oben wurde hinsichtlich der **Fig. 5** eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 erläutert. Bei einer weiteren Ausführungsform dieses erfindungsgemäßen optischen Systems ist es beispielsweise vorgesehen, dass die Einheit E als eine Blendeneinheit ausgebildet ist. Diese Ausführungsform ermöglicht, dass der Beobachter unmittelbar und intuitiv wahrnimmt, wenn er mit seiner Augenposition den zulässigen Bereich der Eye-Box verlässt. Ferner wird dem Beobachter eine Rückmeldung vermittelt, in welcher Richtung und wie weit er sein Auge seitlich relativ zur optischen Achse OA des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 bewegen soll, um wieder ausreichend zentriert zur optischen Achse OA des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 zu sein. Beispielsweise ist die Blendeneinheit als eine mechanische Blendeneinheit ausgebildet. Insbesondere ist es vorgesehen, dass die Blendeneinheit mit einer kreisförmigen Blendenöffnung versehen ist, wobei eine Größe der Blendenöffnung fest vorgegeben oder einstellbar ist. Zusätzlich oder alternativ hierzu ist es vorgesehen, dass die Blendeneinheit mit einer elliptischen Blendenöffnung versehen ist, wobei eine Größe der Blendenöffnung fest vorgegeben oder einstellbar ist. Eine elliptische Blendenöffnung ist von Vorteil, um eine Eye-Box bereitzustellen, die eine vertikal und horizontal unterschiedliche Ausdehnung aufweist. Insbesondere bei Geräten zur binokularen Beobachtung (beispielsweise einem Fernglas oder einem Mikroskop mit binokularem Einblick) ist oft eine Eye-Box mit einer horizontalen (seitlichen) Ausdehnung von Vorteil, die größer ist als die vertikale Ausdehnung der Eye-Box, da zusätzlich zu der unvermeidbaren Kopfbewegung des Beobachters ein zusätzlicher Spielraum zur Berücksichtigung der zwischen verschiedenen Personen unterschiedlichen Pupillendistanzen zwischen einem rechtem Auge und einem linkem Auge wünschenswert ist. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die Erfindung nicht auf die vorgenannten Formen der Blendenöffnung eingeschränkt ist. Vielmehr kann die Blendenöffnung jegliche Form aufweisen, welche für die Erfindung geeignet ist und/oder für eine gewünschte Form der Eye-Box erforderlich ist.

**[0096]** Die Ausführungsform des optischen Systems 7 gemäß der **Fig. 2** ist für eine maximale Eye-Box von 7 mm Durchmesser ausgelegt. Dies bedeutet, dass der Beobachter mit einer angenommenen

Augenpupille von 3 mm Durchmesser (wobei von einem auf mäßige Helligkeit adaptierten Auge ausgegangen wird) eine Augenposition an der optischen Achse OA zu jeder Seite um maximal 2 mm bewegen kann, bevor irgendeine Vignettierung eintritt. Hierzu weist die Blendeneinheit eine kreisförmige Blendenöffnung mit ca. 11 mm Durchmesser auf. Bei weiteren Ausführungsformen kann auch eine kleinere Blendenöffnung verwendet werden, um eine geringere Vignettierung für eine seitlich dezentrierte Augenpupille zuzulassen.

**[0097]** Bei einer noch weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 ist es vorgesehen, dass ein erstes Strahlbündel von einem ersten Ort der Anzeigeeinheit 5 in die Lichteinfallrichtung L verläuft, dass ein zweites Strahlbündel von einem zweiten Ort der Anzeigeeinheit 5 in die Lichteinfallrichtung L verläuft und dass das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel an der Zwischenpupille ZP mindestens zu 70 % oder mindestens zu 80 % oder mindestens zu 90 % überlappen. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist bei dieser Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 vorgesehen, dass das erste Strahlbündel von dem ersten Ort der Anzeigeeinheit 5 in die Lichteinfallrichtung L verläuft, dass das zweite Strahlbündel von dem zweiten Ort der Anzeigeeinheit 5 in die Lichteinfallrichtung L verläuft und dass die zweite Linsengruppe LG2 derart ausgelegt ist, dass sich das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel an der Zwischenpupille ZP mindestens zu 70 % oder mindestens zu 80 % oder mindestens zu 90 % überlappen. Die vorgenannte Ausführungsform gewährleistet, dass die Zwischenpupille ZP von der ersten Linsengruppe LG1 ohne größere Abbildungsfehler in den räumlichen Bereich B (die Eye-Box) abgebildet wird, so dass eine eindeutige Korrespondenz zwischen den Positionen in der Eye-Box B und den entsprechenden Positionen in der konjugierten Zwischenpupille ZP erhalten bleibt. Alle von den verschiedenen Bereichen der Anzeigeeinheit 5 ausgehenden Strahlbündel werden durch die in der Ebene der Zwischenpupille ZP angeordnete Blendeneinheit E gleichmäßig vignettiert. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass der Beobachter bei seitlicher Dezentrierung seiner Augenpupille eine gleichmäßig über den gesamten Bereich der Anzeigeeinheit auftretende Verringerung der Bildhelligkeit wahrnimmt, bevor schließlich ein vollständiger Beschnitt des Bildes eintritt.

**[0098]** **Fig. 9** zeigt für das erfindungsgemäße optische System 7, welches die Einheit E aufweist und mit einer maximalen Eye-Box von 7 mm Durchmesser versehen ist, eine schematische Darstellung des Öffnungsfehlers (longitudinale sphärische Aberration), der tangentialen und sagittalen Bildschalenlagen (astigmatische Feldkurven) und der Relativverzeichnung. Hingegen zeigt die **Fig. 10** für das

erfindungsgemäße optische System 7 mit einer zentrierten Augenpupille von 3 mm Durchmesser eine schematische Darstellung des Öffnungsfehlers (longitudinale sphärische Aberration), der tangentialen und sagittalen Bildschalenlagen (astigmatische Feldkurven) und der Relativverzeichnung.

**[0099]** Fig. 11 zeigt für das erfindungsgemäße optische System 7 mit einer zentrierten Augenpupille von 3 mm Durchmesser eine schematische Darstellung der Queraberrationen. Hingegen zeigt Fig. 12 für das erfindungsgemäße optische System 7 mit einer um 1 mm relativ zur optischen Achse OA dezentrierten Lage der Augenpupille von 3 mm Durchmesser eine schematische Darstellung der Queraberrationen. Ferner zeigt Fig. 13 für das erfindungsgemäße optische System 7 mit einer um 2 mm relativ zur optischen Achse OA dezentrierten Lage der Augenpupille von 3 mm Durchmesser eine schematische Darstellung der Queraberrationen.

**[0100]** Fig. 14 zeigt Kurven der Modulationstransferfunktion (MTF) des Okulars 6 bis 80 Linienpaare/mm an der Anzeigeeinheit 5 für unterschiedliche Sehfeldwinkel für eine zentrierte Augenpupille von 3 mm Durchmesser. Hingegen zeigt Fig. 15 Kurven der Modulationstransferfunktion (MTF) des Okulars 6 bis 80 Linienpaare/mm an der Anzeigeeinheit 5 für unterschiedliche Sehfeldwinkel für eine um 1 mm seitlich relativ zur optischen Achse OA dezentrierte Augenpupille von 3 mm Durchmesser. Ferner zeigt Fig. 16 Kurven der Modulationstransferfunktion (MTF) des Okulars 6 bis 80 Linienpaare/mm an der Anzeigeeinheit 5 für unterschiedliche Sehfeldwinkel für eine um 2 mm seitlich relativ zur optischen Achse OA dezentrierte Augenpupille von 3 mm Durchmesser.

**[0101]** Das Okular 6 kann im Hinblick auf den Verwendungszweck in Ferngläsern eine kissenförmige Verzeichnung von 5,3 % am Rand des Sehfeldes aufweisen. Dieser Wert der Verzeichnung und der Verlauf über das Bildfeld sind dabei so gewählt, dass der beim seitlichen Verschwenken auftretende „Globus-Effekt“ (vgl. Publikation von H. Merlitz, „Distortion of binoculars revisited: Does the sweet spot exist?“, (Verzeichnung von Binokularen erneut betrachtet: Existiert der optimale Punkt) J. Opt. Soc. Am. A/Band 27, Nr. 1/Januar 2010) minimiert ist. Beim „Globus-Effekt“ handelt es sich um einen bekannten und empirisch gut bestätigten, aber hinsichtlich seiner genauen physiologischen und wahrnehmungs-psychologischen Ursachen nach wie vor diskutierten Effekt, bei dem der Seheindruck des Beobachters beim seitlichen Verschwenken eines Fernglases, wie beispielsweise beim „Abmustern“ des Sternenhimmels, eine Art Abrollbewegung auf einer Kugeloberfläche ausführen würde. Die Einhaltung der sogenannten Merlitz-Bedingung, die in der vorstehenden Publikation diskutiert wird, mit einem

empirisch ermittelten Merlitz-Parameter von  $k = 0,7$ , der ebenfalls in der vorgenannten Publikation diskutiert wird, führt für das vorgegebene Sehfeld von  $\pm 30^\circ$  zu einer zu verwendenden kissenförmigen Verzeichnung von 5,3 % am Rand des Sehfeldes. Diese wird von der hier diskutierten Ausführungsform des erfindungsgemäßen optischen Systems 7 eingehalten. Somit wird der Globus-Effekt bestmöglich vermieden.

**[0102]** Die in der vorliegenden Beschreibung, in den Zeichnungen sowie in den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebigen Kombinationen für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen wesentlich sein. Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsformen beschränkt. Sie kann im Rahmen der Ansprüche und unter Berücksichtigung der Kenntnisse des zuständigen Fachmanns variiert werden.

#### Bezugszeichenliste

1	digitales Mikroskop
2	Auge
3	Objektiv
4	Detektor
5	Anzeigeeinheit
6	Okular
7	optisches System
10	(erste) Antriebseinheit
11	zweite Antriebseinheit
20	erste optische Einheit
21	zweite optische Einheit
22	erste Freiformfläche
23	zweite Freiformfläche
24	erste Planfläche
25	zweite Planfläche
26	Immersionsmedium
27	Augenverfolgungseinrichtung (Eye-Tracking-Einrichtung)
B	räumlicher Bereich (Eye-Box)
E	Einheit
FE	Filtereinheit
L	Lichteinfallrichtung
L1	erste Linse
L2	zweite Linse
L3	dritte Linse

L4	vierte Linse
L5	fünfte Linse
L6	sechste Linse
L7	siebte Linse
L8	achte Linse
L9	neunte Linse
L10	zehnte Linse
L 11	elfte Linse
L12	zwölfte Linse
L13	dreizehnte Linse
L14	vierzehnte Linse
LE1	erste Linseneinheit
LE2	zweite Linseneinheit
LE1A	erste Linseneinheit
LE2A	zweite Linseneinheit
LG1	erste Linsengruppe
LG2	zweite Linsengruppe
O	Objekt
OA	optische Achse
POS1	erste Position
POS2	zweite Position
WM	Wellenfrontmanipulator
ZB	Zwischenbild
ZP	Zwischenpupille

### Patentansprüche

1. Optisches System (7) mit

- einer Anzeigeeinheit (5) zum Anzeigen eines Bilds;
- einem Okular (6) zum Betrachten des Bilds mit mindestens einem Auge (2); sowie mit
- einem an dem Okular (6) angeordneten vorgebbaren räumlichen Bereich (B), in welchem das Auge (2) derart bewegbar ist, ohne dass ein vorgebbarer Schwellenwert einer Bildgüte einer mit dem Okular (6) erzeugten Abbildung des Bilds unterschritten wird, wobei in einer Lichteinfallrichtung (L) ausgehend von der Anzeigeeinheit (5) in Richtung des räumlichen Bereichs (B) gesehen zunächst die Anzeigeeinheit (5), dann das Okular (6) und dann der räumliche Bereich (B) angeordnet sind; wobei
- der räumliche Bereich (B) den Bereich darstellt, innerhalb dessen das Auge (2) ein scharfes Bild der mit dem Okular (6) erzeugten Abbildung wahrnimmt;
- das Okular (6) mindestens eine erste Linsengruppe (LG1) und mindestens eine zweite Linsengruppe (LG2) aufweist, wobei entgegen der Lichteinfallrichtung (L) gesehen zunächst die erste

Linsengruppe (LG1) und dann die zweite Linsengruppe (LG2) angeordnet sind;

- eine Zwischenpupille (ZP) zwischen der ersten Linsengruppe (LG1) und der zweiten Linsengruppe (LG2) angeordnet ist;
- die zweite Linsengruppe (LG2) zur Abbildung des von der Anzeigeeinheit (5) angezeigten Bilds in die Zwischenpupille (ZP) ausgelegt ist;
- die erste Linsengruppe (LG1) zur Abbildung des in der Zwischenpupille (ZP) angeordneten Bilds in den räumlichen Bereich (B) ausgelegt ist;
- die Zwischenpupille (ZP) und der räumliche Bereich (B) zueinander konjugiert sind;
- eine Filtereinheit (E, FE) und/oder ein Wellenfrontmanipulator (E, WM) an der Zwischenpupille (ZP) angeordnet sind/ist; und wobei das optische System (7) mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:
  - (i) mindestens eine erste Antriebseinheit (10, 11) zur Bewegung der Filtereinheit (E, FE), wobei die erste Antriebseinheit (10, 11) wirkend an der Filtereinheit (E, FE) angeordnet ist und wobei die Filtereinheit (E, FE) derart beweglich ausgebildet ist, dass die Filtereinheit (E, FE) von einer ersten Filtereinheits-Position (POS1) außerhalb der Zwischenpupille (ZP) in eine zweite Filtereinheits-Position (POS2) an der Zwischenpupille (ZP) bewegbar ist;
  - (ii) mindestens eine zweite Antriebseinheit (10, 11) zur Bewegung des Wellenfrontmanipulators (E, WM), wobei die zweite Antriebseinheit (10, 11) wirkend an dem Wellenfrontmanipulator (E, WM) angeordnet ist und wobei der Wellenfrontmanipulator (E, WM) derart beweglich ausgebildet ist, dass der Wellenfrontmanipulator (E, WM) von einer ersten Wellenfrontmanipulator-Position (POS1) außerhalb der Zwischenpupille (ZP) in eine zweite Wellenfrontmanipulator-Position (POS2) an der Zwischenpupille (ZP) bewegbar ist.

2. Optisches System (7) nach Anspruch 1, wobei die Anzeigeeinheit (5) eine digitale Anzeigeeinheit ist.

3. Optisches System (7) nach Anspruch 1 oder 2, wobei das optische System (7) mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

- (i) Die Filtereinheit (E, FE) ist als ein Anti-Aliasing-Filter ausgebildet;
- (ii) die Filtereinheit (E, FE) ist als ein Anti-Aliasing-Filter ausgebildet, der ein doppelbrechendes Plättchen aufweist;
- (iii) die Filtereinheit (E, FE) ist als ein Anti-Aliasing-Filter ausgebildet, der doppelbrechende Schichten aufweist;
- (iv) die Filtereinheit (E, FE) ist als ein Apodisationsfilter ausgebildet;
- (v) die Filtereinheit (E, FE) ist als ein optischer Raumfrequenzfilter ausgebildet.

4. Optisches System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das optische System (7) mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

- (i) Der Wellenfrontmanipulator (E, WM) ist als ein statischer Wellenfrontmanipulator ausgebildet;
- (ii) der Wellenfrontmanipulator (E, WM) weist mindestens eine Linseneinheit (LE1, LE2) auf;
- (iii) der Wellenfrontmanipulator (E, WM) weist mindestens eine erste Linseneinheit (LE1) und mindestens eine zweite Linseneinheit (LE2) auf, wobei die erste Linseneinheit (LE1) eine erste sphärische Brechkraft und/oder eine erste zylindrische Brechkraft aufweist, wobei die zweite Linseneinheit (LE2) eine zweite sphärische Brechkraft und/oder eine zweite zylindrische Brechkraft aufweist, und wobei mindestens eines der folgenden Merkmale gegeben ist: (a) die erste sphärische Brechkraft ist unterschiedlich zur zweiten sphärischen Brechkraft; (b) die erste zylindrische Brechkraft ist unterschiedlich zur zweiten zylindrischen Brechkraft;
- (iv) der Wellenfrontmanipulator (E, WM) weist mindestens eine Phasenplatte auf.

5. Optisches System (7) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das optische System (7) mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

- (i) Der Wellenfrontmanipulator (E, WM) ist als ein einstellbarer Wellenfrontmanipulator ausgebildet;
- (ii) der Wellenfrontmanipulator (E, WM) weist mindestens eine Flüssiglinseneinheit auf;
- (iii) der Wellenfrontmanipulator (E, WM) weist mindestens eine Elastopolymerlinseneinheit auf;
- (iv) der Wellenfrontmanipulator (E, WM) weist mindestens eine erste Linseneinheit (LE1A) und mindestens eine zweite Linseneinheit (LE2A) auf, wobei die erste Linseneinheit (LE1A) als eine erste Zylinderlinseneinheit ausgebildet ist, wobei die zweite Linseneinheit (LE2A) als eine zweite Zylinderlinseneinheit ausgebildet ist, und wobei die erste Linseneinheit (LE1A) sowie die zweite Linseneinheit (LE2A) relativ zueinander drehbar ausgebildet sind.

6. Optisches System (7) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei der Wellenfrontmanipulator (E, WM) einstellbar ist sowie mindestens eine erste optische Einheit (20) und mindestens eine zweite optische Einheit (21) aufweist, wobei die erste optische Einheit (20) und die zweite optische Einheit (21) in Lichteinfallrichtung (L) oder entgegen der Lichteinfallrichtung (L) hintereinander angeordnet sind, wobei die erste optische Einheit (20) und die zweite optische Einheit (21) jeweils in einer Bewegungsrichtung senkrecht zu einer Achse (OA) relativ zueinander bewegbar angeordnet sind, und wobei die erste optische Einheit (20) und die zweite optische Einheit (21) jeweils mindestens eine refraktive Freiformfläche (22, 23) aufweisen.

7. Optisches System (7) nach Anspruch 6, wobei das optische System (7) eines der folgenden Merkmale aufweist:

- (i) Zwischen der ersten optischen Einheit (20) und der zweiten optischen Einheit (21) ist ein Immersionsmedium (26) angeordnet, wobei das Immersionsmedium (26) sowohl die erste optische Einheit (20) als auch die zweite optische Einheit (21) kontaktiert;
- (ii) zwischen der ersten optischen Einheit (20) und der zweiten optischen Einheit (21) ist ein Immersionsmedium (26) angeordnet, wobei das Immersionsmedium (26) sowohl die erste optische Einheit (20) als auch die zweite optische Einheit (21) kontaktiert, und wobei das Immersionsmedium (26) als Flüssigkeit ausgebildet ist;
- (iii) zwischen der ersten optischen Einheit (20) und der zweiten optischen Einheit (21) ist ein Immersionsmedium (26) angeordnet, wobei das Immersionsmedium (26) sowohl die erste optische Einheit (20) als auch die zweite optische Einheit (21) kontaktiert, und wobei das Immersionsmedium (26) als ein elastischer Optokitt ausgebildet ist.

8. Optisches System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei eine Blendeneinheit (E) an der Zwischenpupille (ZP) angeordnet ist, wobei die Blendeneinheit (E) von der Anzeigeeinheit (5) ausgehende Strahlbündel beschneidet.

9. Optisches System (7) nach Anspruch 8, wobei die Blendeneinheit (E) als eine mechanische Blendeneinheit ausgebildet ist.

10. Optisches System (7) nach Anspruch 8 oder 9, wobei das optische System (7) mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist:

- (i) die Blendeneinheit (E) weist eine kreisförmige Blendenöffnung auf, wobei eine Größe der Blendenöffnung fest vorgegeben oder einstellbar ist;
- (ii) die Blendeneinheit (E) weist eine elliptische Blendenöffnung auf, wobei die Größe der Blendenöffnung fest vorgegeben oder einstellbar ist.

11. Optisches System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die erste Linsengruppe (LG1) eine Zwischenkaustik (ZB) aufweist.

12. Optisches System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei ein erstes Strahlbündel von einem ersten Ort der Anzeigeeinheit (5) in die Lichteinfallrichtung (L) verläuft, wobei ein zweites Strahlbündel von einem zweiten Ort der Anzeigeeinheit (5) in die Lichteinfallrichtung (L) verläuft, wobei das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel an der Zwischenpupille (ZP) mindestens zu 70 % oder mindestens zu 80 % oder mindestens zu 90 % überlappen.

13. Optisches System (7) nach Anspruch 12, wobei das erste Strahlbündel von dem ersten Ort der Anzeigeeinheit (5) in die Lichteinfallrichtung (L) verläuft, wobei das zweite Strahlbündel von dem zweiten Ort der Anzeigeeinheit (5) in die Lichteinfallrichtung (L) verläuft und wobei die zweite Linsengruppe (LG2) derart ausgelegt ist, dass sich das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel an der Zwischenpupille (ZP) mindestens zu 70 % oder mindestens zu 80 % oder mindestens zu 90 % überlappen.

14. Optisches System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei

- das optische System (7) eine optische Achse (OA) aufweist;
- die Anzeigeeinheit (5) an der optischen Achse (OA) angeordnet ist;
- die optische Achse (OA) durch das Okular (6) verläuft; und wobei
- entgegen der Lichteinfallrichtung (L) gesehen zunächst die erste Linsengruppe (LG1) und dann die zweite Linsengruppe (LG2) entlang der optischen Achse (OA) angeordnet sind.

15. Optisches System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das optische System (7) mit mindestens einer Augenverfolgungseinrichtung (27) zur Bestimmung einer Position einer Augenpupille und einer Blickrichtung eines Beobachters versehen ist.

16. Optische Einrichtung (1) mit einem optischen System (7) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die optische Einrichtung (1) als ein Fernglas, als ein Fernrohr, als ein Teleskop, als ein Lichtmikroskop, als ein Nachtsichtgerät, als ein digitaloptisches Gerät zur Verwendung in der Chirurgie, als ein Augmented-Reality-Gerät, als ein Virtual-Reality-Gerät und/oder als ein digitales Mikroskop, insbesondere ein digitales Operationsmikroskop ausgebildet ist.

Es folgen 16 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

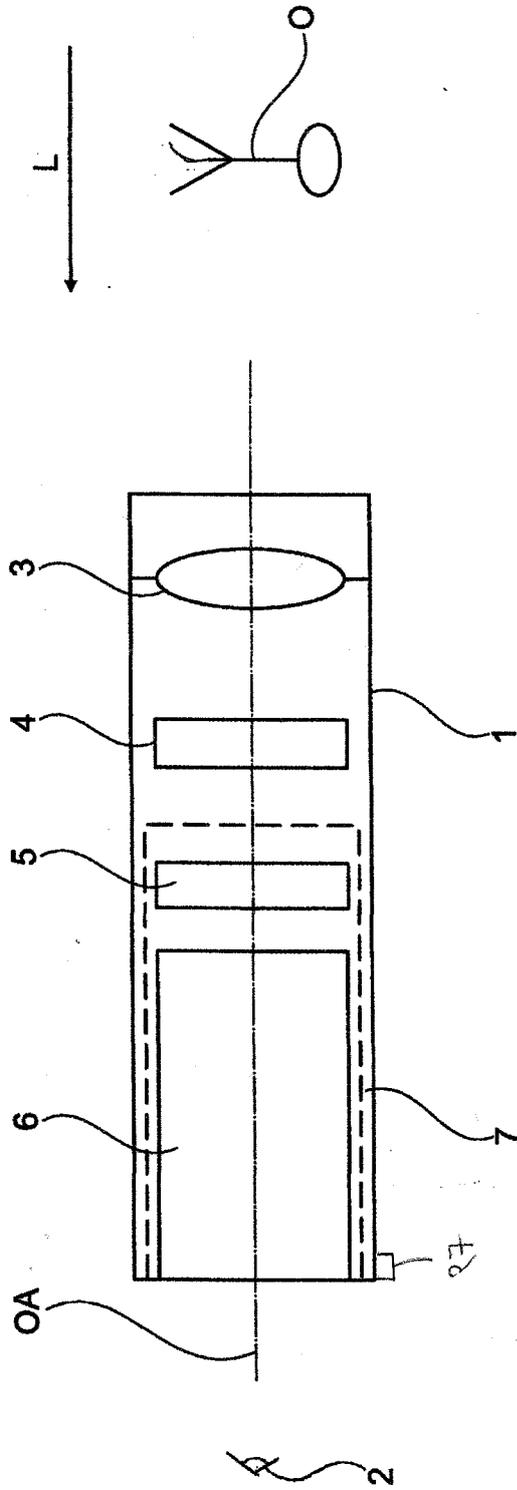


Fig. 1

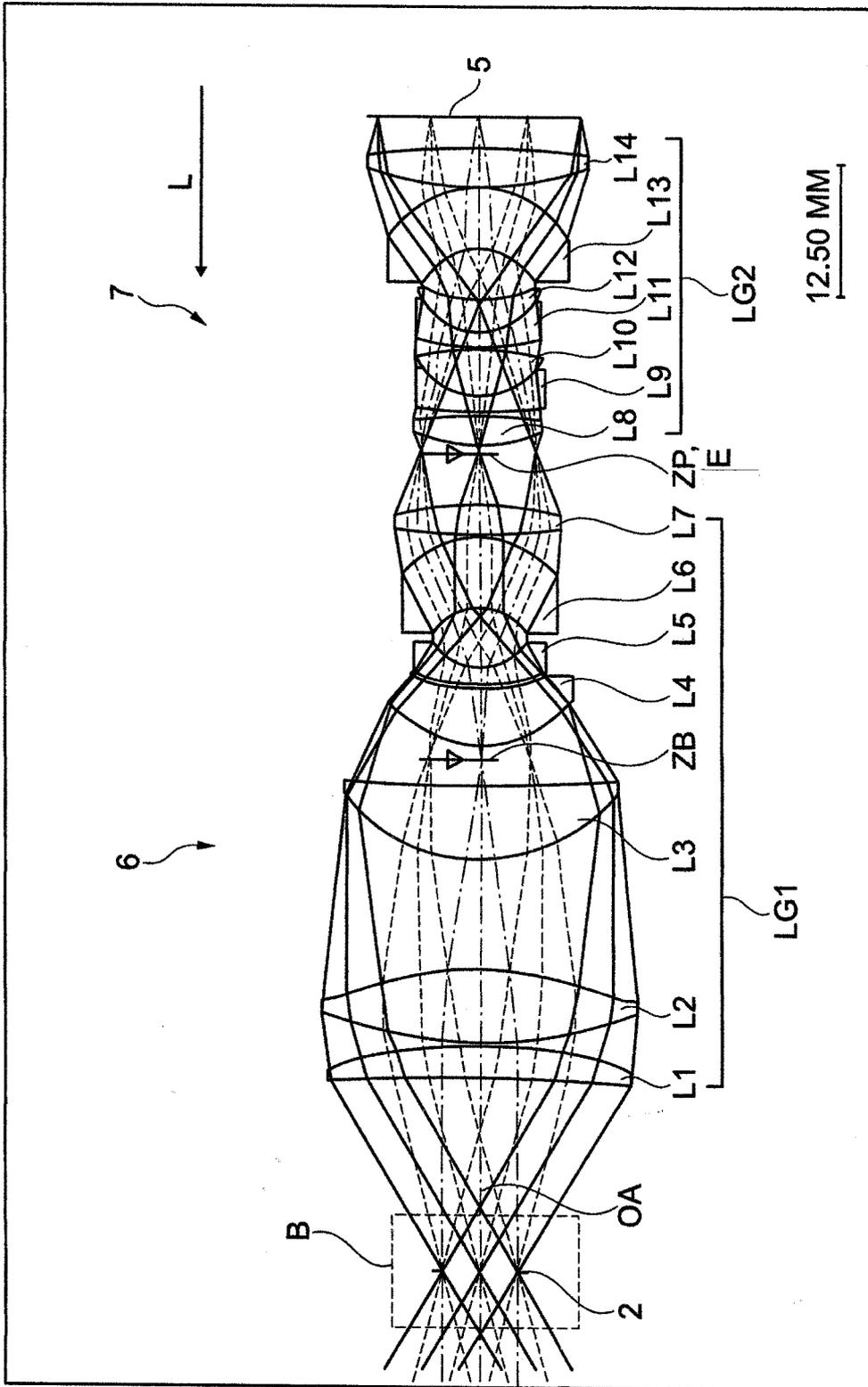


Fig. 2

Fläche	Flächenart	RADIUS [mm]	DICKE [mm]	MATERIAL	HALBER DURCH- MESSER [mm]
0	sphärisch	Unendlich (0)			
1	sphärisch	Unendlich (0)	18,394375		3,50
2	asphärisch	Unendlich (0)	3,100000	SLAH55V	13,89
3	asphärisch	-62,290531	0,200000		14,22
4	asphärisch	30,269950	7,147947	SFPL51	14,95
5	asphärisch	-30,148389	10,456106		14,92
6	asphärisch	17,837562	7,084380	SFPL51	12,85
7	asphärisch	260,017356	2,500000		12,36
8	sphärisch	Unendlich (0)	1,300000		11,23
9	asphärisch	10,148112	5,480848	LLAH86	8,46
10	asphärisch	113,128555	0,300000		6,28
11	asphärisch	758450,286487	1,500000	NBASF2 (Schott)	6,04
12	asphärisch	4,820927	5,718365		4,46
13	asphärisch	-5,565127	6,794478	NLASF41 (Schott)	4,41
14	asphärisch	-9,156565	0,200000		7,30
15	sphärisch	45,281369	3,108156	SLAH58	7,76
16	sphärisch	-24,766728	4,700086		7,73
17	sphärisch	Unendlich (0)	0,749971		5,50
18	sphärisch	13,658545	2,789578	SFPL51	5,90
19	sphärisch	-69,232726	0,511507		5,87
20	sphärisch	75,607371	1,500000	STIH13	5,79
21	sphärisch	7,201321	4,306687	SFPL51	5,49
22	sphärisch	-28,259966	0,200000		5,62
23	sphärisch	19,253252	1,500000	STIH53	5,70
24	sphärisch	6,288036	3,129225	SLAH59	5,31
25	sphärisch	14,179835	4,716014		5,20
26	sphärisch	-5,934123	5,839733	SNPH1	5,28
27	sphärisch	-9,995262	0,100000		8,49
28	asphärisch	24,874386	3,672545	SNPH1	10,38
29	asphärisch	Unendlich (0)	3,000000		10,30
30	sphärisch	Unendlich (0)	0,000000		

Fr.3

**Asphärenkoeffizienten**

Fläche	2	3	4	5	6	7	9	10
K	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	-0,631345E-06	0,518072E-06	-0,300029E-04	-0,734132E-05	0,408021E-04	0,479986E-05	-0,118467E-03	0,595263E-03
C2	-0,286767E-07	-0,139891E-06	0,936253E-08	0,718653E-07	-0,682421E-07	0,214249E-07	-0,288285E-05	0,508565E-06
C3	0,338233E-10	0,108110E-10	0,108319E-09	0,163072E-09	0,157004E-09	0,393197E-10	0,374605E-07	-0,103656E-06
C4	0	0	0	0	0	0	0	0

Fläche	11	12	13	14	28	29
K	0	0	0	0	0	0
C1	0,148361E-02	0,136719E-03	-0,379101E-03	0,939382E-05	-0,509284E-04	-0,982181E-04
C2	-0,136817E-05	0,296970E-06	-0,132321E-04	0,312259E-06	-0,934490E-06	-0,429766E-06
C3	-0,421401E-06	-0,325313E-05	0,624502E-06	0,159325E-07	0,694985E-08	0,681145E-08
C4	0	0	0	0	0	0

Fig 4

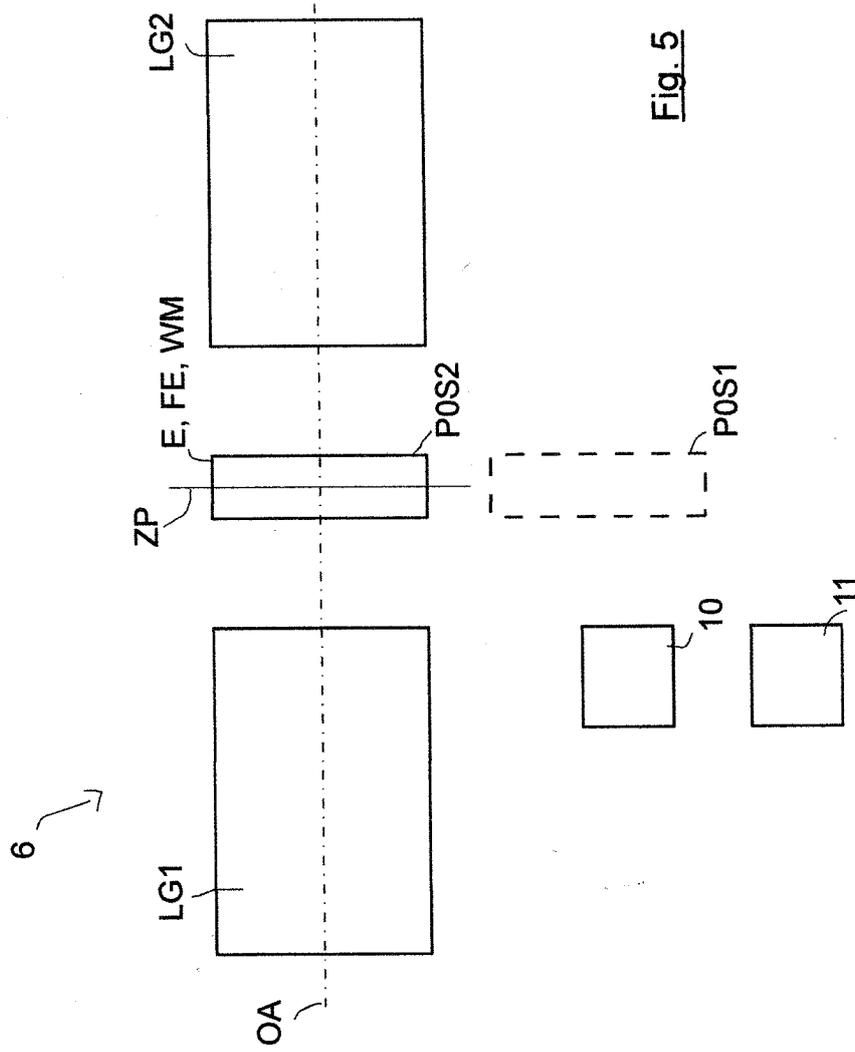


Fig. 5

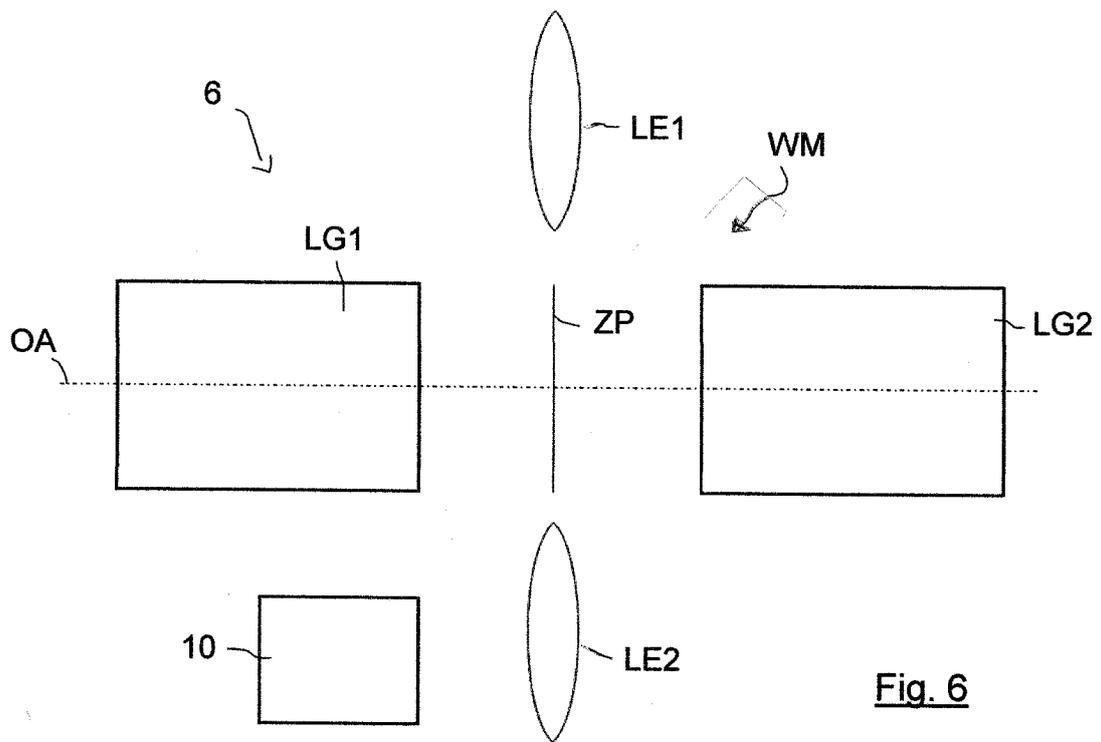


Fig. 6

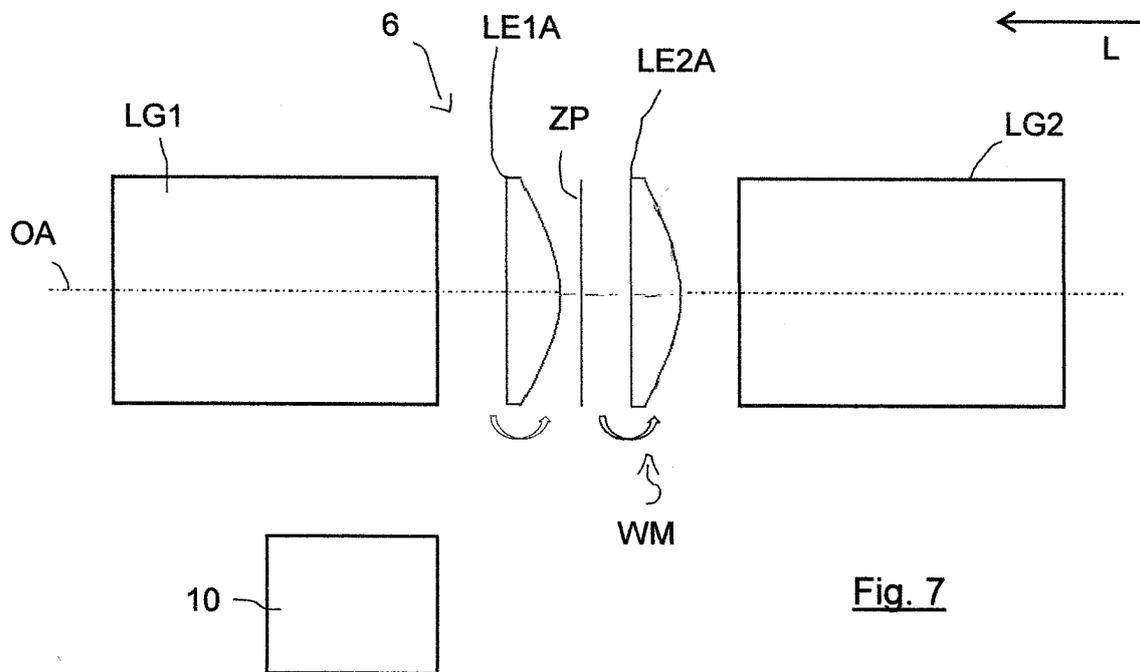


Fig. 7

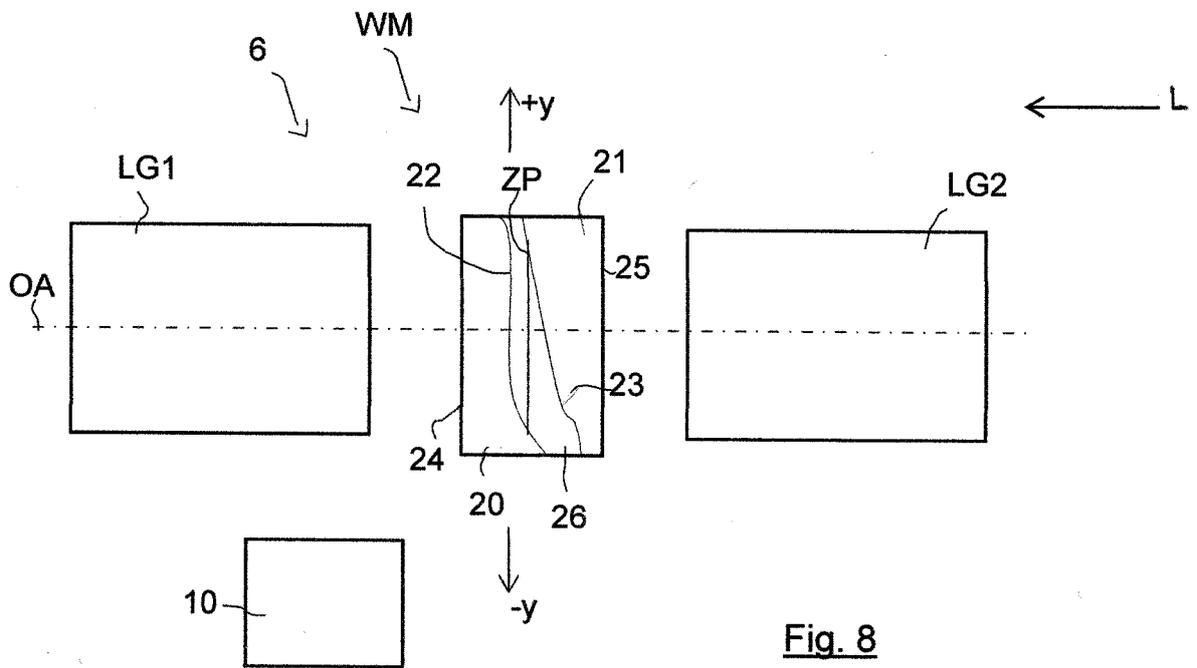


Fig. 8

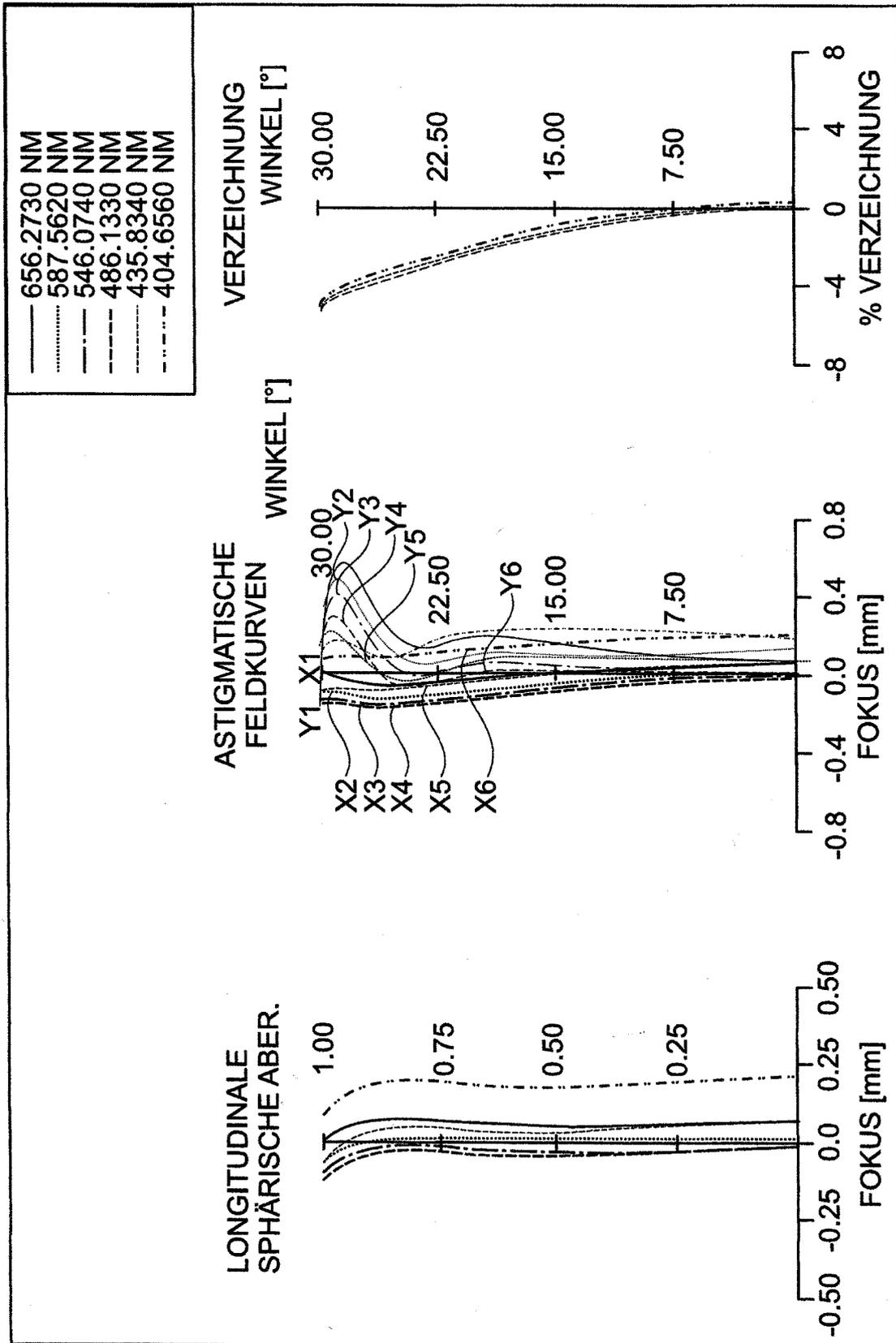


Fig. 9

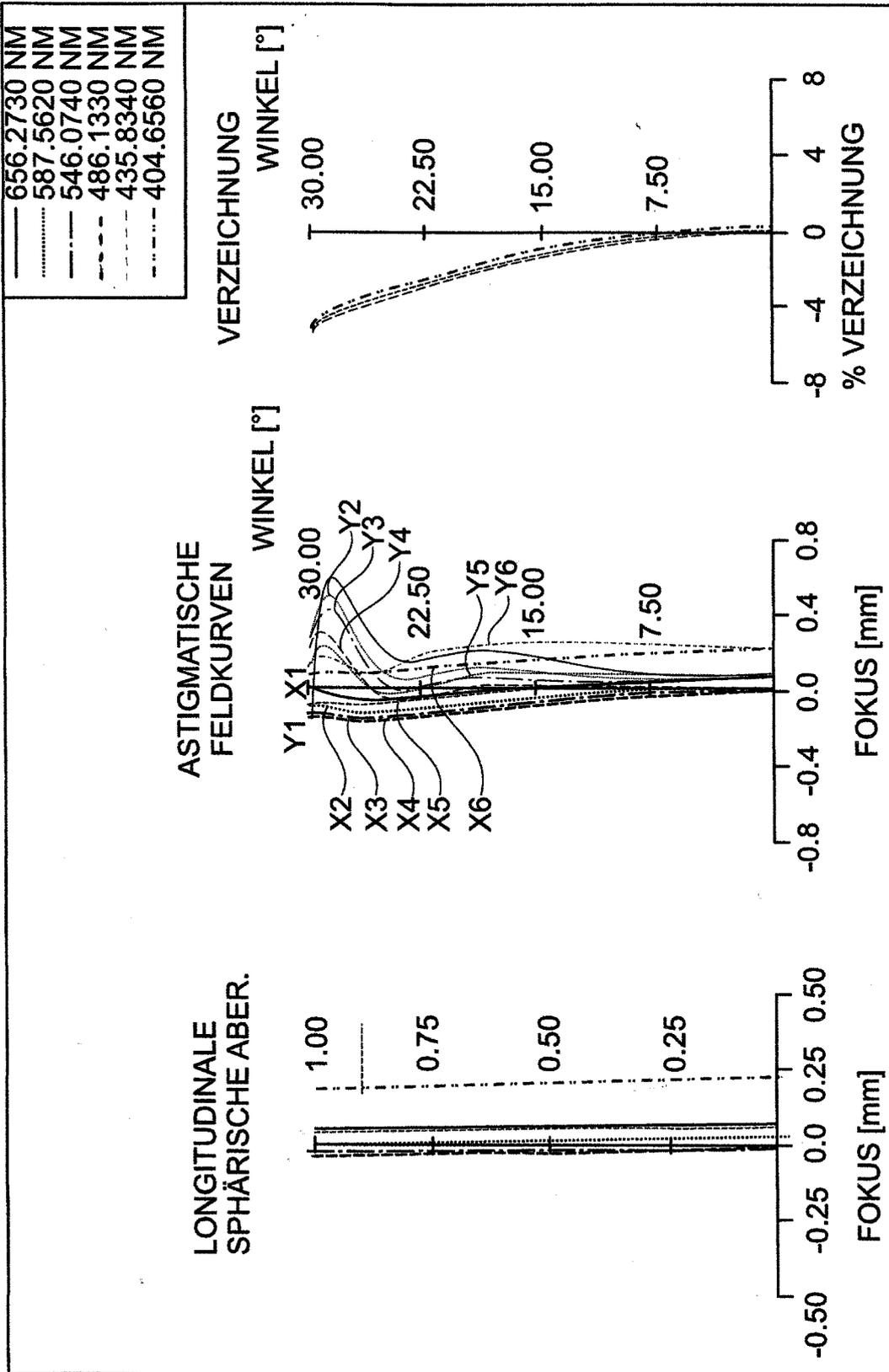


Fig. 10

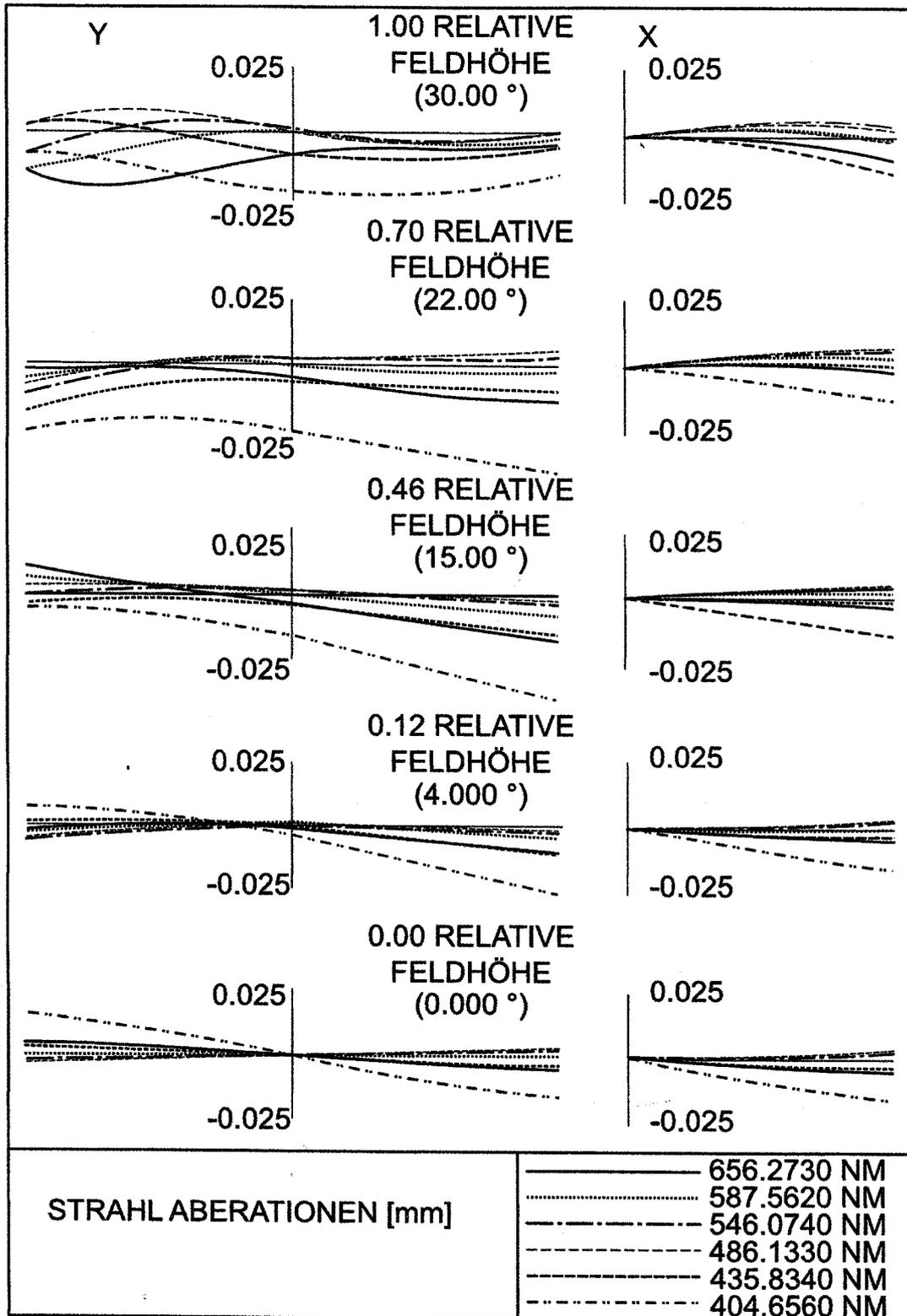


Fig. 11

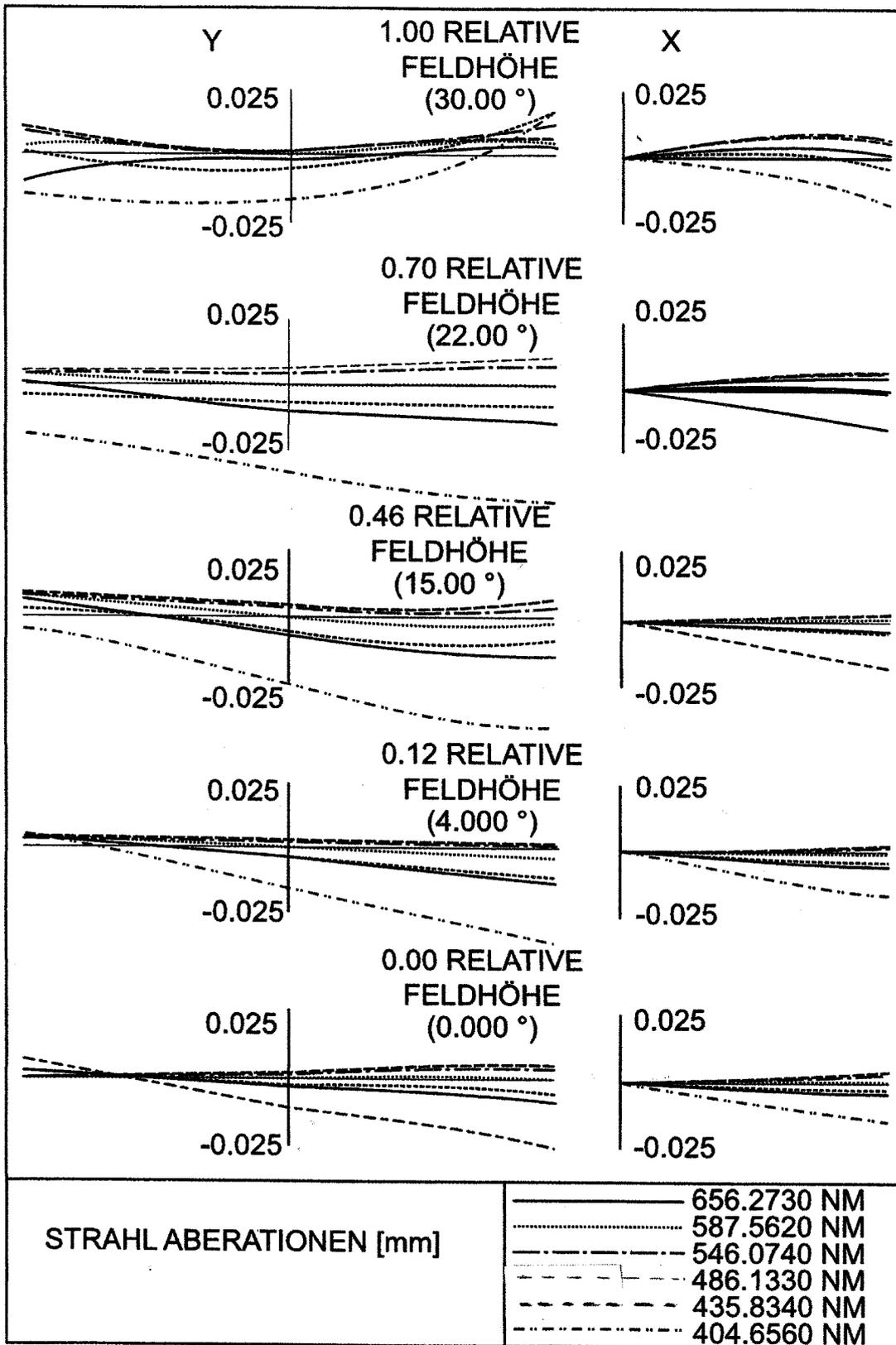


Fig. 12

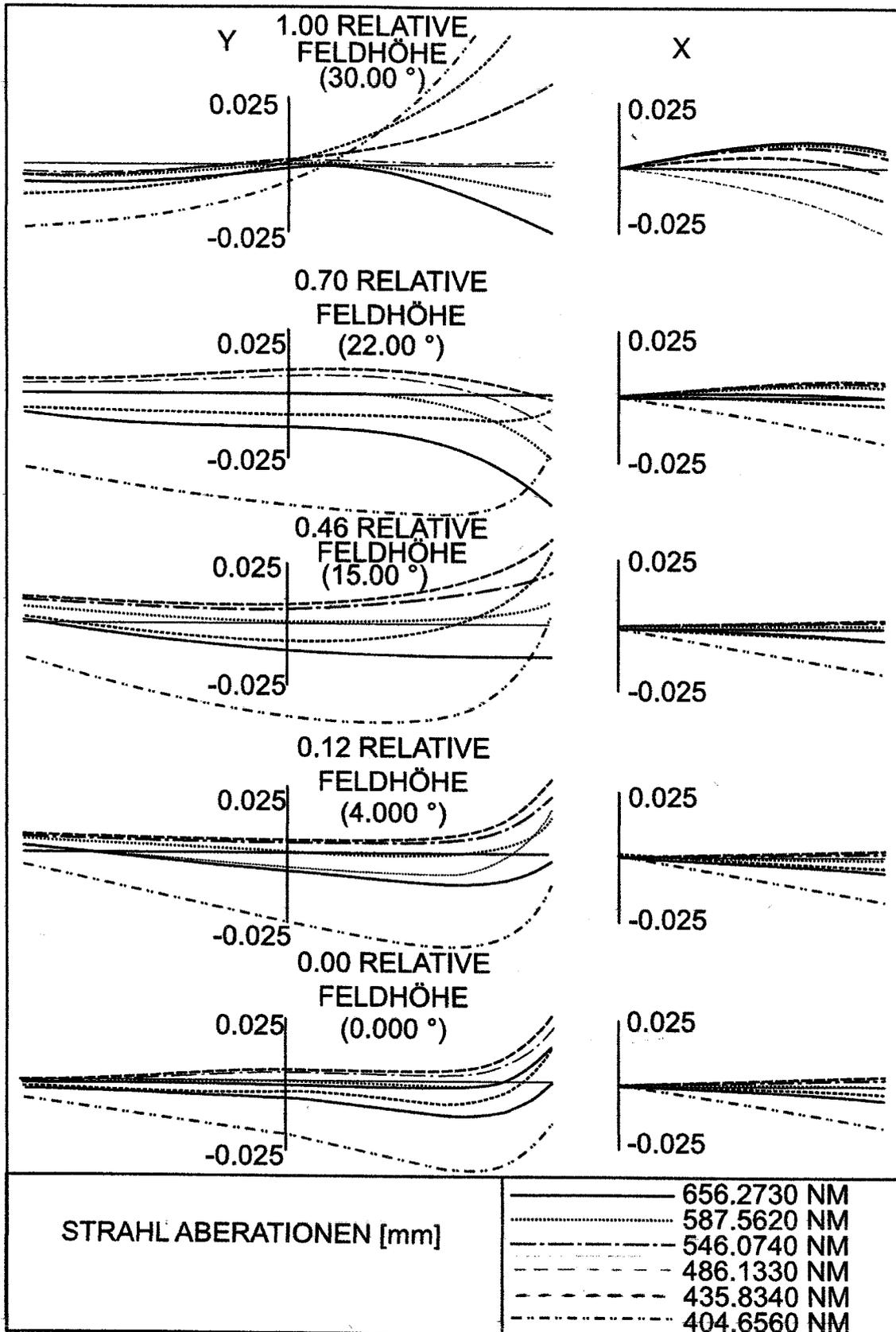
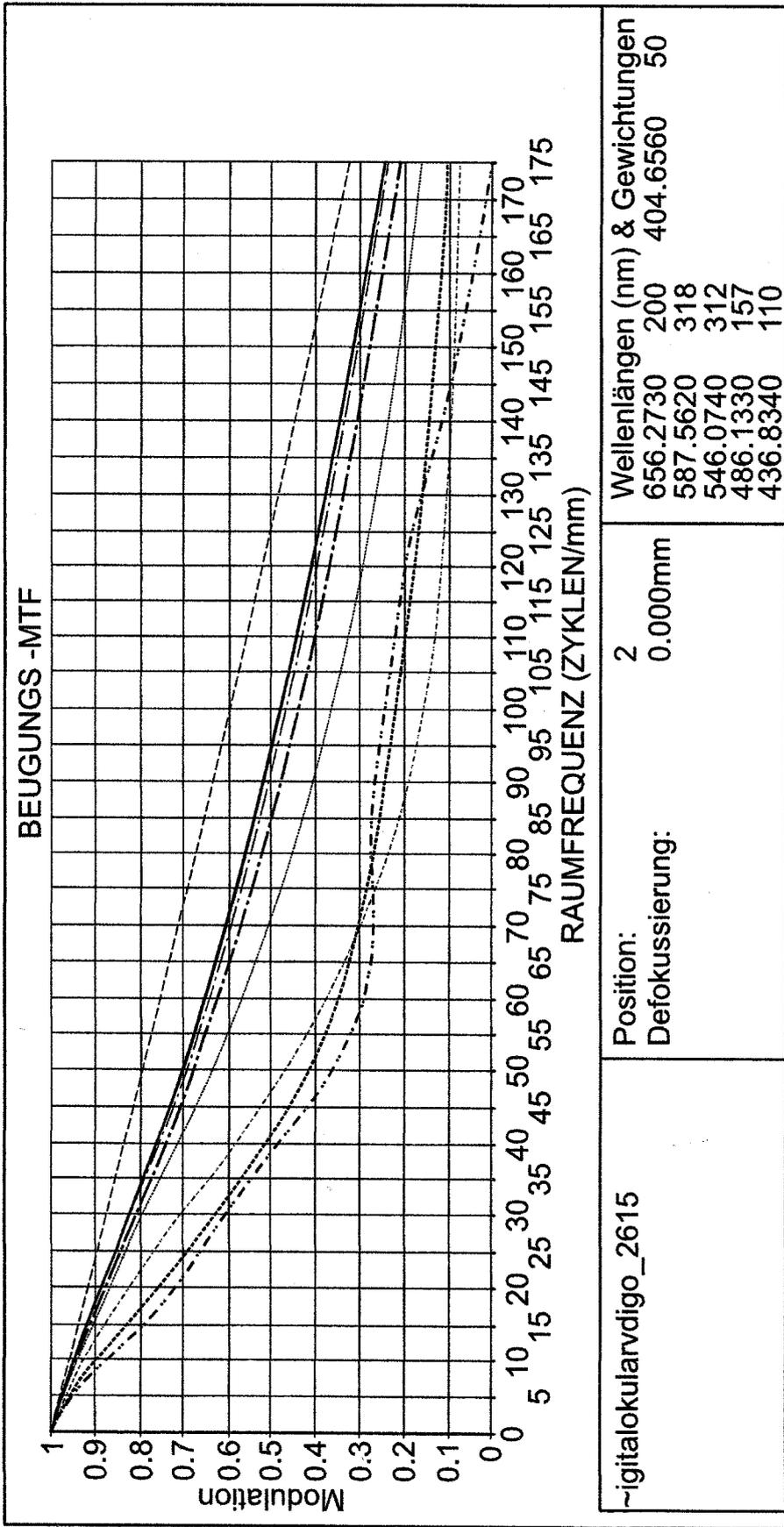


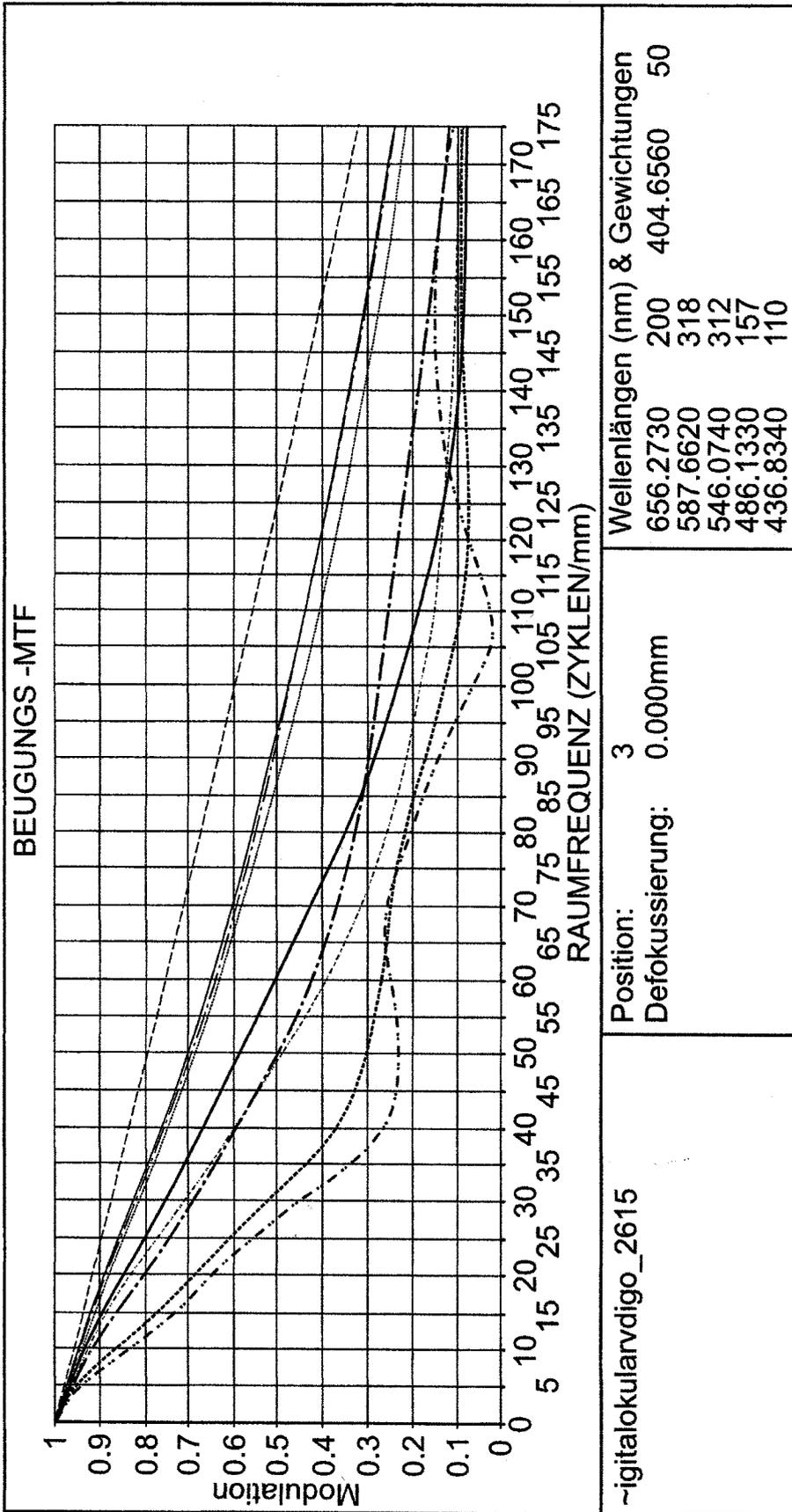
Fig. 13



- F1:T Diff. Grenze
- F1:R Diff. Grenze
- F1:T (Winkel) 0.000°
- F1:R (Winkel) 0.000°
- F2:T (Winkel) 4.000°
- F2:R (Winkel) 4.000°

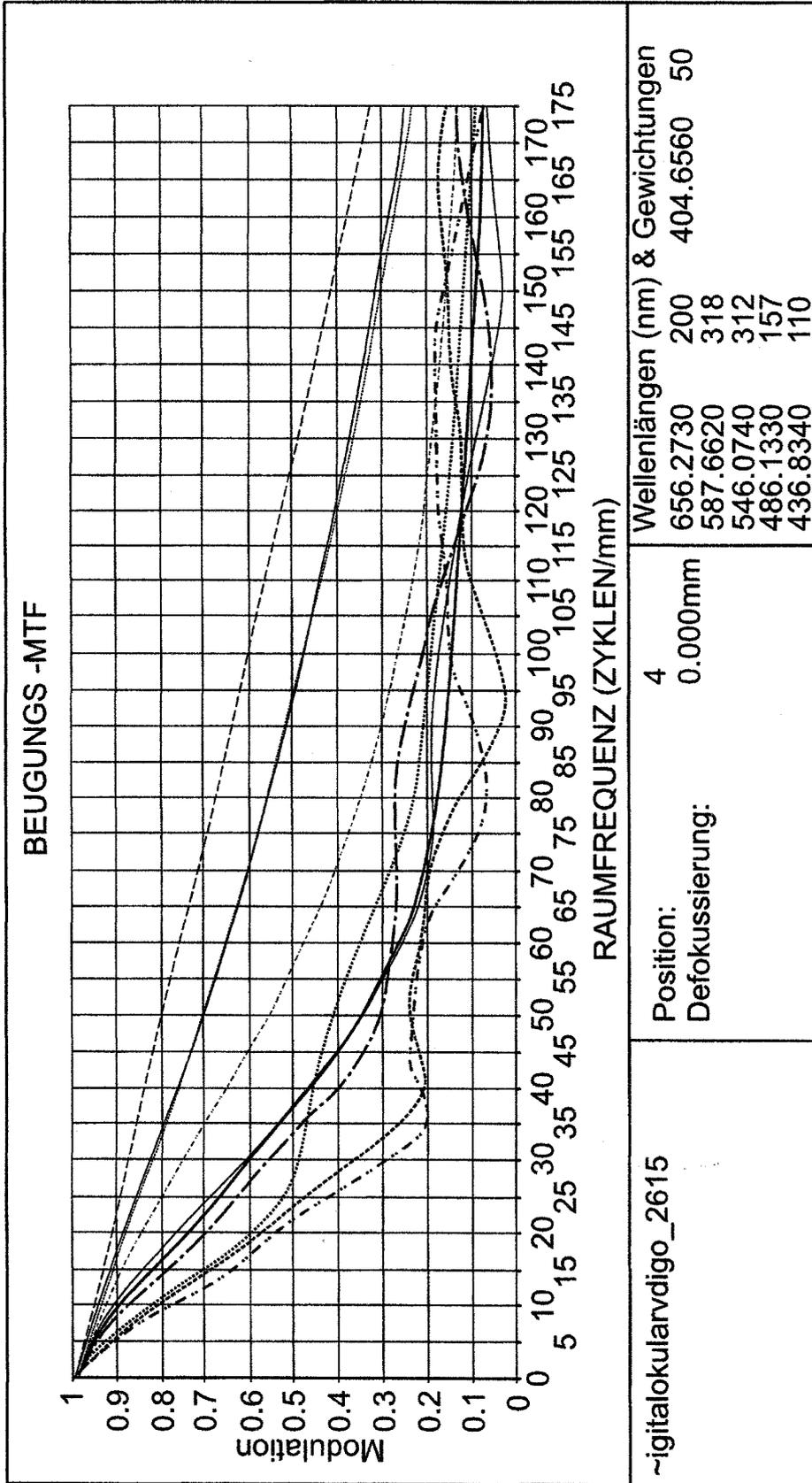
- F3:T (Winkel) 15.000°
- F3:R (Winkel) 15.000°
- F4:T (Winkel) 22.000°
- F4:R (Winkel) 22.000°

**Fig. 14**



- F1:T Diff. Grenze
- F1:R Diff. Grenze
- F1:T (Winkel) 0.000°
- F1:R (Winkel) 0.000°
- F2:T (Winkel) 4.000°
- F2:R (Winkel) 4.000°
- F3:T (Winkel) 15.000°
- F3:R (Winkel) 15.000°
- F4:T (Winkel) 22.000°
- F4:R (Winkel) 22.000°

Fig. 15



- F1:T Diff. Grenze
- F1:R Diff. Grenze
- F1:T (Winkel) 0.000°
- F1:R (Winkel) 0.000°
- F2:T (Winkel) 4.000°
- F2:R (Winkel) 4.000°

- F3:T (Winkel) 15.000°
- F3:R (Winkel) 15.000°
- F4:T (Winkel) 22.000°
- F4:R (Winkel) 22.000°
- F5:T (Winkel) 30.000°
- F5:R (Winkel) 30.000°

Fig. 16