(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
16. Mai 2024 (16.05.2024)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/099979 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G03H 1/04 (2006.01) *G03H 1/26* (2006.01)
G02B 27/10 (2006.01) *G03H 1/06* (2006.01)
G03H 1/08 (2006.01) *G02F 1/13* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2023/080862

(22) Internationales Anmeldedatum:
06. November 2023 (06.11.2023)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2022 129 368.8
07. November 2022 (07.11.2022) DE

(71) Anmelder: **AKMIRA OPTRONICS GMBH** [DE/DE]; Ricarda-Huch-Str. 2, 14480 Potsdam (DE).

(72) Erfinder: **KNÜTTEL, Alexander**; c/o AKmira optronics GmbH, Ricarda-Huch-Str. 2, 14480 Potsdam (DE).

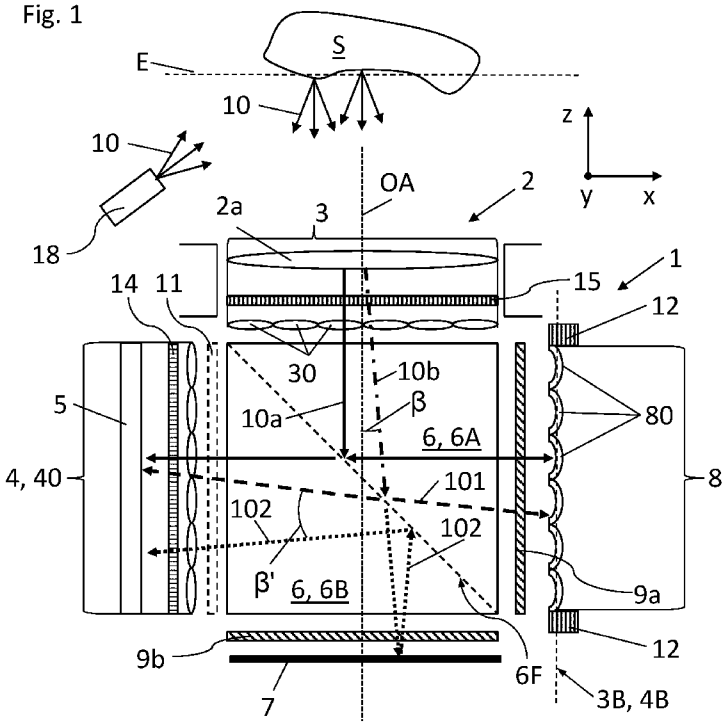
(74) Anwalt: **DERTINGER, Thomas**; Schulz Junghans Patentanwälte PartGmbB, Großbeerenstr. 71, 10963 Berlin (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,

(54) **Title:** ULTRACOMPACT OPTICAL SYSTEM FOR 3-D IMAGING

(54) **Bezeichnung:** ULTRAKOMPAKTES OPTISCHES SYSTEM ZUR 3D-BILDGEBUNG

Fig. 1



(57) **Abstract:** The invention relates to an optical system (1) for 3-D imaging, comprising at least the following components: - an input aperture (2) with an optical axis (OA), - a first metalens array (3) and a second metalens array (4), and - a detector (5), wherein the input aperture (2) is configured to collimate object light (10) coming from an examination object (S) in a first spectral range and set said light into a predefined polarization state, wherein the object light (10) propagates at a first inclination angle (β) in relation to the optical axis (OA) of the input aperture (2) to the first metalens array (3), wherein the first metalens array (3) is configured and arranged to focus a first component (101) of the object light (10) and leave a second component (102) of the object light (10) unchanged, wherein the second metalens array (4) is configured and arranged to collimate the focused first component (101) and transmit the second component

WO 2024/099979 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten** *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— *hinsichtlich der Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)*

— *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)*

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

— *in Schwarz-Weiss; die internationale Anmeldung enthielt in ihrer eingereichten Fassung Farbe oder Graustufen und kann von PATENTSCOPE heruntergeladen werden.*

(102) unchanged such that the first component (101) and the second component (102) enclose a second inclination angle (β') with one another in relation to their respective propagation direction and are incident on the detector (5), forming an interference pattern in the process, wherein the second inclination angle (β') corresponds to twice the first inclination angle (β) in terms of magnitude.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft Optisches System (1) zur 3D-Bildgebung aufweisend zumindest die folgenden Komponenten: - Eine Eingangsapertur (2), aufweisend eine optische Achse (OA), - Ein erstes Metalinsen-Array (3) und ein zweites Metalinsen-Array (4), - Einen Detektor (5), wobei die Eingangsapertur (2) dazu eingerichtet ist, in einem ersten Spektralbereich von einem Untersuchungsgegenstand (S) kommendes Objektlicht (10) zu kollimieren und in einen vordefinierten Polarisationszustand festzulegen, wobei das Objektlicht (10) unter einem ersten Neigungswinkel (β) in Bezug auf die optische Achse (OA) der Eingangsapertur (2) zum ersten Metalinsen-Array (3) propagiert, wobei das erste Metalinsen-Array (3) dazu eingerichtet und angeordnet ist, einen ersten Anteil (101) des Objektlichts (10) zu fokussieren und einen zweiten Anteil (102) des Objektlichts (10)unverändert zu lassen, wobei das zweite Metalinsen-Array (4) dazu eingerichtet und angeordnet ist, den fokussierten ersten Anteil (101) zu kollimieren und den zweiten Anteil (102) unverändert zu transmittieren, so dass der erste Anteil (101) und der zweite Anteil (102) in Bezug auf deren jeweiligen Propagationsrichtung einen zweiten Neigungswinkel (β') miteinander einschließen und unter Ausbildung eines Interferenzmusters auf den Detektor (5) treffen, wobei der zweite Neigungswinkel (β') betragsmäßig dem doppelten ersten Neigungswinkel (β) entspricht.

Ultrakompaktes Optisches System zur 3D-Bildgebung

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein optisches System zur 3D-Bildgebung gemäß Anspruch 1.

Aus dem Stand der Technik sind optische 3D-Bildgebende Systeme bekannt, die eine Information über die dreidimensionale Lage, Oberflächenstruktur oder Beschaffenheit eines Objektes durch Auswerten eines holografischen Interferenzmusters, erlangen. Diese holografischen Systeme arbeiten häufig mit einem Abtastlichtstrahl, dem sogenannten Objektlicht und einem Referenzlichtstrahl, dem sogenannten Referenzlicht, die in einer holografischen Einheit zusammengeführt werden und aufgrund der zeitlichen und räumlichen Kohärenz des Lichtes dort zu einem Interferenzmuster auf einem Detektor führen. Durch verschiedene Auswertemaßnahmen, kann auf die Wellenfronten und damit auf eine 3D-Information des mit dem Objektlicht abgetasteten Untersuchungsgegenstandes geschlossen werden.

Diese holografischen Systeme weisen allerdings verschiedene Nachteile auf. Oftmals benötigen solche Systeme bewegliche Komponenten und einen vergleichsweisen großen Bauraum, haben eine vergleichsweise schlechte räumliche Auflösung oder sind komplex und kostenintensiv in der Fertigung.

Dennoch sind diese Systeme insbesondere in der minimalinvasiven Medizin von großer Bedeutung. Aber auch im Mobiltelefonbereich sind 3D-bildgebende Anwendungen mittlerer Weile angekommen. Dort werden allerdings vollständig andere System verwendet, die nicht auf einem holografischen Prinzip basieren.

Die Aufgabe der Erfindung ist daher, ein 3D-bildgebendes System zu Verfügung zu stellen, welches die vorgenannten Nachteile überwindet.

Das erfindungsgemäße Problem wird durch ein System gemäß Anspruch 1 gelöst.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben und werden nachfolgend beschrieben.

Danach ist ein optisches System zur 3D-Bildgebung aufweisend zumindest die folgenden Komponenten vorgesehen:

- Eine Eingangsapertur, aufweisend eine optische Achse,
- Ein erstes Metalinsen-Array und ein zweites Metalinsen-Array,
- Einen Detektor,

wobei die Eingangsapertur dazu eingerichtet ist, in einem ersten Spektralbereich von einem Untersuchungsgegenstand kommendes Objektlicht zu kollimieren, insbesondere wenn die Eingangsapertur eine Linse aufweist und das Objektlicht aus einer Brennebene der Eingangsapertur stammt, und in einen vordefinierten Polarisationszustand festzulegen, der sich aus zwei zueinander konjugierten Polarisationszuständen zusammensetzt, wobei das Objektlicht unter einem ersten Neigungswinkel, β, in Bezug auf die optische Achse der Eingangsapertur zum ersten Metalinsen-Array propagiert, wobei das erste Metalinsen-Array dazu eingerichtet und angeordnet ist, einen ersten Anteil des Objektlichts, der einen ersten Polarisationszustand der zwei zueinander konjugierten Polarisationszustände umfasst, zu fokussieren und einen zweiten Anteil des Objektlichts, der einen zweiten Polarisationszustand der zwei zueinander konjugierten Polarisationszustände umfasst, unverändert zu lassen, insbesondere unverändert kollimiert zu lassen, wobei das zweite Metalinsen-Array dazu eingerichtet und in Ausbreitungsrichtung des Objektlichtes hinter dem ersten Metalinsen-Array angeordnet ist, den fokussierten ersten Anteil zu kollimieren und den zweiten Anteil unverändert zu transmittieren, insbesondere unverändert kollimiert zu transmittieren, so dass der erste Anteil und der zweite Anteil, nachdem sie durch das erste und das zweite Metalinsen-Array propagiert sind, jeweils die gleiche Wellenfrontkrümmung aufweisen, und insbesondere kollimiert sind, und in Bezug auf deren jeweiligen Propagationsrichtung einen zweiten Neigungswinkel, $\beta' = 2*\beta$, miteinander einschließen und unter Ausbildung eines Interferenzmusters auf den Detektor treffen, wobei der zweite Neigungswinkel betragsmäßig dem doppelten ersten Neigungswinkel entspricht und basierend auf dem Interenzenzmuster eine dreidimensionales Lageinformation eines Objektbereichs des Untersuchungsgegenstandes erstellt werden kann.

Das erfindungsgemäße System schafft es durch die Verwendung von Metalinsen ein holografisches bildgebendes System zur Verfügung zu stellen, das die vorgenannten Probleme löst.

Metalinsen bzw. Metalinsen-Arrays können auf einer planaren Struktur gefertigt werden, ohne dass es aufwendiger Schleifprozesse mit für die Fertigung von Krümmungsradien für herkömmliche Linsen bedarf. Noch wichtiger ist aber die Möglichkeit, Metalinsen so zu fertigen, dass diese abhängig von Polarisation, Wellenlänge oder auch Winkel unterschiedliche optische Operationen ausführen können bzw. Eigenschaften aufweisen [1].

In diesem Zusammenhang ist die Polarisation von besonderer Bedeutung, da diese über Wellenlängen hinweg kontrollierbar ist. Ling Li, et al. [2] beschreibt, wie einzelne Metalinsen polarisationsabhängig ihre Brennweite ändern. Je nach Design der Metalinse kann diese auch in einem breitbandigen Spektralbereich agieren, ohne ihre Fokussierungseigenschaften zu verändern. Dies ist ein fundamentaler Unterschied zu Beugungsstrukturen, wie optischen Gittern oder Hologrammen, welche inhärent das Licht wellenlängenabhängig beugen. Möglich sind die Metalinsen Eigenschaften unter anderem aufgrund der Strukturen, welche kleiner als die optische Wellenlänge und deutlich kleiner als die typische Kamerapixel-Dimension von 2 – 5 µm sind. Zusammenfassend wird im Stand der Technik beschrieben, dass sich Metalinsen bis zu einer numerischen Apertur von NA > 0.5 und optischen Bandbreiten > 100 nm für verschiedene Farbbänder im roten, grünen und blauen (RGB) Farbbereich designen lassen.

Die Eingangsapertur kann insbesondere optische Komponenten enthalten wie beispielsweise eine Linse oder eine Vielzahl von Linsen die in einer Linsenanordnung zum Beispiel einem Objektiv angeordnet sind. Alternativ kann die Eingangsapertur auch keine Linse aufweisen, sondern lediglich eine Lochblende umfassen, die - sofern der Untersuchungsgegenstand einen ausreichend großen Abstand (z.B. im Bereich von ca. 100 mm bis 500 mm) zur Lochblende aufweist - das vom Untersuchungsgegenstand einfallende Objektlicht in ausreichendem Maße kollimiert in das System abbildet.

Weiterhin weist die Eingangsapertur ein optisches Element auf, das dazu eingerichtet ist, dem vom Untersuchungsgegenstand eintreffenden Objektlicht einen vordefinierten Polarisationszustand aufzuprägen. Ein solches optisches Element kann beispielsweise ein Polarisator sein.

Im Kontext der vorliegenden Spezifikation bezieht sich der Ausdruck „Eingangsapertur“ insbesondere auf einen Bereich vor dem ersten Metalinsen-Array, das heißt dass die Eingangsapertur sich nicht zwingendermaßen lediglich auf eine Öffnung des Systems bezieht, sondern dass der Ausdruck „Eingangsapertur“ sich auf alle optischen Komponenten und Elemente des Systems erstrecken kann, die in Propagationsrichtung des Objektlichtes vor dem ersten Metalinsen-Array angeordnet sind.

Der Begriff „Metalinsen-Array“ bezieht sich insbesondere auf die Anordnung einer Vielzahl von Metalinsen, deren jeweiligen optischen Achsen im Wesentlichen parallel zueinander ausgerichtet sind. Die optischen Achsen der einzelnen Metalinsen sind dabei insbesondere parallel zur optischen Achse der Eingangsapertur ausgerichtet.

Die Dimensionen, beispielsweise die Durchmesser, einer einzelnen Metalinse sind dabei im Stand der Technik bekannt und können sich insbesondere im Bereich von wenigen Millimetern bewegen, bspw. 0.2 mm bis 10 mm.

Insbesondere kann jeder Metalinse eines Metalinsen-Arrays mindestens eine Brennweite zugeordnet werden. Diese Brennweite ist beispielsweise abhängig vom Polarisationszustand des auftreffenden Objektlichtes.

Weiterhin kann die Brennweite der Metalinsen und damit auch die dem ersten und/oder zweiten Metalinsen-Array zugeordnete Brennweite, wellenlängenabhängig sein.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, sind die Brennweiten aller Metalinsen des ersten Metalinsen-Arrays gleich.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung, sind die Brennweiten aller Metalinsen des zweiten Metalinsen-Arrays gleich.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung, sind die mittleren Brennweiten des ersten und des zweiten Metalinsen-Arrays gleich.

Der Ausdruck „mittlere Brennweite“ bezieht sich dabei insbesondere auf eine Brennweite, die dem jeweiligen Metalinsen-Array zugeordnet wird, und die sich insbesondere aus einem Durchschnitt aller Brennweiten der im Array angeordneten

Metalinsen ergibt, insbesondere wobei die mittlere Brennweite diesem Durchschnitt entspricht.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, umfasst der Detektor eine Kamera, die eine Vielzahl von fotosensitiven Pixeln aufweist, wobei diese fotosensitiven Pixel dazu eingerichtet sind, zumindest Objektlicht aus dem ersten Spektralbereich zu registrieren. Auf diese Weise kann mittels des Detektors ein Interferenzmuster aufgenommen werden.

Das aufgenommene Interferenzmuster kann sodann in Form von Daten an eine dem System zugeordnete oder eine vom System umfasste Auswerteeinheit übermittelt werden, die aus den übermittelten Daten eine dreidimensionale Information oder eine dreidimensionale Darstellung zumindest des Untersuchungsgegenstandes oder eines Bereiches davon generiert.

Der Begriff „kollimiert“ und verwandte Begriffe sind im Kontext der vorliegenden Spezifikation insbesondere so auszulegen, dass das Licht zumindest für eine Wellenlänge, insbesondere für einen Wellenlängen- oder Spektralbereich, nur minimale Wellenfrontkrümmung aufweist. Bei abweichenden Wellenlängen erhöht sich die Konvergenzen oder Divergenzen des Lichtstrahles bzw. Wellenfeldes typischer Weise je nach Wellenlänge. Auch diese chromatisch bedingten Abweichungen von der idealen Kollimierung sind mit dem Begriff „kollimiert“ im Kontext dieser Erfindung umfasst. Zudem sind Justage- und System-Toleranz-bedingte Abweichungen ebenso unter dem Begriff „kollimiert“ zu verstehen.

Insbesondere, wenn das System keine Linse in der Eingangsapertur aufweist, gelten die Ausführungen im vorigen Absatz in dem vom Fachmann zugrunde gelegten Verständnis, nämlich dass die Kollimation nicht perfekt sein muss, also das Licht leicht divergent oder konvergent in das System abgebildet wird.

Insbesondere sei hier darauf verwiesen, dass das System dazu ausgelegt ist, auch nicht kollimiertes Objektlicht in analoger Art und Weise auf den Detektor abzubilden und/oder zu verarbeiten, insbesondere wobei das System von im Sinne der Spezifikation nicht kollimierten Lichtstrahlen Gebrauch macht, um eine Tiefeninformation, d.h. 3D-Information über den Untersuchungsgegenstand zu generieren. Die Beschreibung der Erfindung anhand kollimierter Lichtstrahlen dient

insbesondere lediglich zur klaren Offenbarung der Lage und Funktion der Komponenten des Systems zueinander, insbesondere aber nicht zum Ausschließen der Aufnahme und/oder der Verarbeitung von durch die Eingangsapertur nicht kollimierten Lichtstrahlen.

Insbesondere sind unter dem Begriff „kollimiert“ und verwandten Begriffen auch eine Konvergenz und/oder Divergenz des Lichtstrahls bis zu einem Divergenz- oder Konvergenzwinkel ξ der im Bereich $0° < \xi \leq 2*\beta_{max}$ liegt, im Rahmen der Erfindung zu verstehen, wobei β_{max} der vom System maximal abbildbare oder aufnehmbare erste Neigungswinkel ist.

Alternativ oder ergänzend kann unter dem Begriff „kollimiert“ und verwandten Begriffen im Rahmen der Spezifikation auch verstanden sein, dass ein Lichtstrahldurchmesser (in diesem Zusammenhang als Lichtstrahlbündel zu verstehen) an seiner schmalsten Stelle einen minimale Divergenzwinkel aufweist. Dieses Bild zur Definition eines kollimierten Lichtstrahls wird im Bereich der wellenoptischen Beschreibung eines Laserstahls angewendet, und kann in analoger Weise auf das System angewendet werden. Diese Definition ist insbesondere auf Eingangsaperturen anwendbar, die zumindest eine Linse aufweisen.

Der erste Neigungswinkel kann gemäß der Erfindung bezüglich einer Propagationsrichtung und der optischen Achse der Eingangsapertur gemessen werden.

In Bezug auf eine Wellendarstellung des Objektlichtes bedeutet, dies, dass die ebenen Wellenfronten des kollimierten Objektlichts nach der Eingangsapertur bezüglich der optischen Achse der Eingangsapertur einen Winkel von $90° + \beta$ aufweisen.

Der vordefinierte Polarisationszustand des Objektlichtes nach der Eingangsapertur umfasst zwei zueinander konjugierte Polarisationszustände. Diese zwei Polarisationszustände können insbesondere zwei linear-polarisierte Polarisationszustände sein, insbesondere ein p-polarisierter und ein s-polarisierter Zustand.

Alternativ können die zwei Polarisationszustände auch einen rechts- und einen links-drehenden zirkular-polarisierten Zustand darstellen.

Es ist anzumerken, dass der vordefinierten Polarisationszustand insbesondere eine Überlagerung dieser beiden konjugierten Polarisationszustände ist.

Trifft nun das Objektlicht mit dem vordefinierten Polarisationszustand auf das erste Metalinsen-Array, so wird dieses erste Metalinsen-Array aufgrund seiner optischen Eigenschaften das Objektlicht, das den ersten Polarisationszustand der zwei zueinander konjugierten Polarisationszustände aufweist, fokussieren, und zwar insbesondere auf die dem ersten Metalinsen-Array zugeordnete Brennebene. Im Gegensatz dazu, lässt das erste Metalinsen-Array, ebenfalls aufgrund seiner optischen Eigenschaften, das Objektlicht, das den zweiten Polarisationszustand der zwei zueinander konjugierten Polarisationszustände aufweist, im Wesentlichen unverändert transmittieren. D.h. das erste Metalinsen-Array führt bei Objektlicht, das den zweiten Polarisationszustand aufweist, zu keiner erhöhten Konvergenz oder Divergenz, sondern verhält sich im Wesentlichen wie ein optisch transparentes Medium ohne Beugungseigenschaften, also wie ein neutrales optisches Medium, zum Beispiel wie eine homogene Glasscheibe.

Dadurch wird das auf das erste Metalinsen-Array auftreffende Objektlicht in einen ersten Anteil, der aus Objektlicht des ersten Polarisationszustands besteht, und in einen zweiten Anteil, der aus Objektlicht des zweiten Polarisationszustands besteht, aufgespalten.

Idealerweise beträgt das Verhältnis dieser Aufspaltung ca. 1:1, d.h. das Objektlicht wird in zwei gleich intensive Anteile aufgespalten.

Die beiden Anteile des Objektlichts treffen sodann auf das zweite Metalinsen-Array, das mit identischen, oder zumindest analogen optischen Eigenschaften wie das erste Metalinsen-Array ausgestattet ist.

Das zweite Metalinsen-Array ist insbesondere so angeordnet, dass es den ersten Anteil rekollimiert und den bereits kollimierten zweiten Anteil im Wesentlichen unverändert transmittieren lässt. Auch hier verhält sich das zweite Metalinsen-Array bezüglich des zweiten Anteils, wie bereits zum ersten Metalinse-Array ausgeführt, im Wesentlichen als transparentes neutrales optisches Medium.

Insbesondere ist das System z.B. mittels entsprechender optischer Komponenten so ausgestaltet, dass ein Winkel, unter dem der erste Anteil auf das erste Metalinsen-

Array trifft, im Vergleich zum ersten Neigungswinkel invertiert ist, wenn er durch das zweite Metalinsen-Array hindurchpropagiert. Auf diese Weise schließen der erste Anteil und der zweite Anteil den zweiten Neigungswinkel miteinander ein. Hierbei kann der zweite Neigungswinkel entweder bezüglich der Propagationsrichtung des ersten und des zweiten Anteils gemessen werden, oder alternativ aber äquivalent als Winkel zwischen den Wellenfronten des ersten und des zweiten Anteils.

Der zweite Neigungswinkel ist aufgrund des erfindungsgemäßen Designs betragsmäßig doppelt so groß wie der erste Neigungswinkel. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die dem ersten und dem zweiten Metalinsen-Array zugeordneten Brennweiten gleich groß sind.

Der erste und der zweite Anteil werden hinter dem zweiten Metalinsen-Array überlagert, sodass sich ein Interferenzmuster auf dem Detektor ausbildet. Anhand des Interferenzmusters und eine Analyse desselben, kann eine dreidimensionale Information eines Objektbereichs des Untersuchungsgegenstandes erstellt werden.

Der Objektbereich umfasst dabei einen oder mehrere Beleuchtungsbereiche mit Objektlicht, wobei der Beleuchtungsbereich auf dem Untersuchungsgegenstand insbesondere im Wesentlichen kreisförmig mit einem Durchmesser im Bereich von 1 mm bis 50 mm ausgebildet ist.

Der Ausdruck „fokussieren“ oder verwandte Ausdrücke, beziehen sich insbesondere auf Einstellen der Wellenfrontkrümmung, die bewirkt, dass der zugeordnete Lichtstrahl bzw. das Lichtwellenbündel konvergent ist, also auf einen kleinsten Strahldurchmesser (Fokalpunkt) an einer Position im Raum abgebildet wird.

Eine vollständige dreidimensionale Information über den Untersuchungsgegenstand kann beispielsweise durch ein optisches Abtasten, insbesondere durch eine relative Verlagerung des Systems gegenüber dem Untersuchungsgegenstand erzeugt werden. Zusätzlich oder alternativ können auch eine Vielzahl an Objektbereichen des Untersuchungsgegenstandes gleichzeitig vom System abgebildet, aufgenommen und ausgewertet werden.

Es wird angemerkt, dass Objektlicht, das in einem Abstand zur Eingangsapertur vom Untersuchungsgegenstand zurückgeworfen wird, der bewirkt, dass das Objektlicht durch die Eingangsapertur nicht kollimiert wird, sondern eine davon abweichende

Wellenfrontkrümmung aufweist, sodass man divergierendes oder konvergierendes das Objektlicht erzeugt.

Diese Situation ist im Fall eine Eingangsapertur, die anstelle einer Linse nur eine Lochblende umfasst, oftmals der Fall, da eine Lochblende keine zugeordnete Brennweite aufweist. Sofern das Objektlicht jedoch aus einem ausreichend großen Abstand auf die Lochblende fällt, bewirkt die Lochblende einen ausreichend hohen Grad an Kollimation bzw. einen ausreichend niedrigen Grad an Divergenz des Objektlichts, so dass es im Sinne der Erfindung als kollimiert angesehen wird.

Aber auch im Fall, dass das Objektlicht auch im Rahmen der Definition der vorliegenden Spezifikation nicht kollimiert ist, wird dieses Licht vom System entsprechend den physikalischen Prinzipien abgebildet, aufgenommen und kann in einer entsprechenden Auswertung mit einbezogen werden, um eine 3D-Information über einen Objektbereich (z.B. eine Oberfläche des Untersuchungsgegenstandes) des Untersuchungsgegenstand zu erlangen.

Der zweite Anteil des Objektlichts wird in jedem Fall (kollimiert oder nicht kollimiert) nach den dargelegten Prinzipien unverändert durch das erste und das zweite Metalinsen-Array propagieren. Analog verhält sich auch der durch das erste Metalinsen-Array fokussierten erste Anteil, wobei der erste Anteil demnach nicht auf eine dem ersten Metalinsen-Array zugeordnete Brennebene fällt, sondern davor oder dahinter, und wobei das zweite Metalinsen-Array entsprechend der Wellenfronkrümmung ein mit entsprechend veränderter Wellenfrontkrümmung ersten Anteil erzeugt.

Auch diese ursprünglich nicht kollimierten ersten und zweiten Anteile führen zu einem Interferenzmuster auf dem Detektor und können entsprechend ausgewertet werden, um eine dreidimensionale Information über den Objektbereich zu erlangen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass der erste und der zweite Anteil des Objektlichtes jeweils senkrecht linear-polarisiert zueinander sind, insbesondere s- und p-polarisiert, insbesondere wobei der vordefinierte Polarisationszustand ein linear-polarisierter Polarisationszustand ist, der aus einer Superposition des ersten und des zweiten Anteils besteht.

Linear-polarisiertes Licht kann vergleichsweise einfach erzeugt werden. Des Weiteren kann ein Polarisationszustand bezüglich seiner Polarisierung vergleichsweise leicht festgestellt werden, wenn die Polarisierung linear entlang einer Richtung liegt. Im Gegensatz dazu, kann es schwieriger sein, einen zirkular polarisierten Zustand von einem elliptisch polarisierten Zustand zu unterscheiden. Eine Vielzahl von optischen Elementen, ist dazu eingerichtet, zueinander konjugiertes linear-polarisiertes Licht aufzuspalten bzw. unterschiedlich zu manipulieren, sodass eine lineare Polarisation des ersten und des zweiten Anteils von Vorteil sein kann.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung, umfasst das System zwischen dem ersten und dem zweiten Metalinsen-Array einen polarisationsabhängigen Strahlteiler, insbesondere einen polarisationsabhängigen Strahlteilerwürfel, wobei das System weiterhin die folgenden Komponenten aufweist:

- Einen ersten Spiegel, insbesondere wobei der erste Spiegel planar ist,
- Ein Reflektor-Array, das ein Vielzahl von reflektierenden Retroreflektoren umfasst,
- Ein erstes λ/4-Element, das zwischen dem polarisationsabhängigen Strahlteiler und dem ersten Spiegel angeordnet ist,
- Ein zweites λ/4-Element, das zwischen dem polarisationsabhängigen Strahlteiler und dem Reflektor-Array, angeordnet ist,

wobei der polarisationsabhängige Strahlteiler in Bezug auf von dem ersten Metalinsen-Array einfallenden Objektlicht so angeordnet ist, dass der erste Anteil von dem Strahlteiler reflektiert wird und der zweite Anteil durch den Strahlteiler transmittiert, wobei das Reflektor-Array so angeordnet ist, dass es den ersten Anteil wieder in Richtung des Strahlteilers und zum zweiten Metalinsen-Array zurückreflektiert, wobei der erste Spiegel so angeordnet ist, dass er den zweiten Anteil wieder in Richtung des Strahlteilers und zum zweiten Metalinsen-Array zurückreflektiert, insbesondere wobei der zurückreflektierte erste und der zurückreflektierte zweite Anteil aufgrund der durch die jeweiligen λ/4-Elemente vertauschten Polarisationszustände durch den polarisationsabhängigen Strahlteiler in Richtung des zweiten Metalinsen-Arrays propagieren, insbesondere wobei der erste und der zweite Anteil jeweils zweimal durch entweder das erste oder das zweite λ/4-Element propagieren, so dass der erste und der zweite Anteil nach dem zweiten

Durchgang durch das jeweilige λ/4-Element die Polarisationszustände vertauscht haben.

In anderen Worten, ist der polarisationsabhängige Strahlteiler in Bezug auf von dem ersten Metalinsen-Array einfallenden Objektlicht so angeordnet, dass der erste Anteil von dem Strahlteiler reflektiert wird und der zweite Anteil durch den Strahlteiler transmittiert, wobei das Reflektor-Array auf einer Seite des Strahlteilers angeordnet ist, zu der der vom ersten Metalinsen-Array kommende und vom Strahlteiler reflektierte erste Anteil propagiert, wobei den es auf das Reflektor-Array treffenden ersten Anteil wieder in Richtung des Strahlteilers und zum zweiten Metalinsen-Array zurückreflektiert, wobei der erste Spiegel auf einer Seite des Strahlteilers angeordnet ist, die dem ersten Metalinsen-Array gegenüberliegt, also auf der Seite, zu der der vom ersten Metalinsen-Array kommende und vom Strahlteiler transmittierte zweite Anteil propagiert, wobei der erste Spiegel den auf den ersten Spiegel treffenden zweiten Anteil wieder in Richtung des Strahlteilers und zum zweiten Metalinsen-Array zurückreflektiert, insbesondere wobei der zurückreflektierte erste und der zurückreflektierte zweite Anteil aufgrund der vertauschten Polarisationszustände durch den polarisationsabhängigen Strahlteiler in Richtung des zweiten Metalinsen-Arrays propagieren.

Der polarisationsabhängige Strahlteiler ist insbesondere dazu eingerichtet einen der beiden Anteile des Objektlichtes zu reflektieren und den jeweils anderen zu transmittieren.

Als λ/4-Element kann beispielsweise ein λ/4-Plättchen in verwendet werden. Also ein optische Verzögerungselement, das unterschiedliche Brechungsindizes für verschiedene Polarisationsrichtungen aufweist. Dadurch kann der Polarisationszustand des Objektlichtes verändert werden. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass bei zweimaligem Durchgang des ersten und/oder des zweiten Anteils der jeweilige Anteil seinen konjugiert polarisierten zustand einnimmt. Beispielsweise würde bei zweimaligem Durchgang durch das λ/4-Element ein s-polarisierter Zustand in einen p-polarisierten Zustand überführt und umgekehrt.

Dadurch propagieren die zurückreflektierten Anteile am polarisationsabhängigen Strahlteiler beide in Richtung des zweiten Metalinsen-Array.

Bei dieser Konfiguration ist zu beachten, dass das zweite Metalinsen-Array bezüglich der Fokussierung-Eigenschaften in Abhängigkeit der Polarisation des Objektlichts entsprechend so gestaltet sein muss, dass es den fokussierten ersten Anteil kollimiert. D.h. sofern vor dem zweiten Metalinsen-Array kein weiteres optisches Element angeordnet ist, das die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils wieder auf ihre ursprünglichen nach der Eingangsapertur eingeprägten Polarisationszustände überführt, sollte die Fokussierung Eigenschaft des zweiten Metalinsen-Arrays im Vergleich zum ersten Metalinsen-Array auf den jeweils konjugierten Polarisationszustand gerichtet sein.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Zahl der im Reflektor-Array umfassten Retroreflektoren identisch zur Zahl der Metalinsen jeweils des ersten und des zweiten Metalinsen-Arrays.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass zwischen dem polarisationsabhängigen Strahlteiler und dem zweiten Metalinsen-Array ein erstes λ/2-Element angeordnet ist, das dazu eingerichtet ist, die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils zu vertauschen, insbesondere so dass die Polarisationszustände des ersten und zweiten Anteils wieder den Polarisationszuständen des ersten und zweiten Anteils nach der Eingangsapertur entsprechen.

Das erste λ/2-Element ist insbesondere so angeordnet, dass es in Propagationsrichtung des ersten und zweiten Anteils erst durchlaufen wird, nachdem der erste und der zweite Anteil zweimal durch den Strahlteiler, bzw. eine Strahlteilerfläche des Strahlteilers propagiert sind.

Diese Ausführungsform erlaubt es ein dem ersten Metalinsen-Array identisches zweites Metalinsen-Array zu verwenden, dass nicht wie im Absatz zuvor beschrieben bezüglich der Polarisationszustände inverse Eigenschaften haben muss, sondern dass bezüglich der Polarisationszustände die identischen Eigenschaften wie das erste Metalinsen-Array aufweist.

Das erste λ/2-Element ist insbesondere ein λ/2-Plättchen.

Dies erlaubt eine kostengünstige und vereinfachte Produktion des Systems.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das System eine Aktuatoranordnung umfasst, die dazu eingerichtet ist, eine Position des ersten Spiegels und/oder des Reflektor-Arrays einzustellen, so dass eine Phase zwischen den dem ersten und dem zweiten Anteil zugeordneten Wellenfronten einstellbar ist.

Diese Ausführung erlaubt es eine relative Phasenlage zwischen dem ersten und dem zweiten Anteil einzustellen, so dass insbesondere ein Gleichlichtanteil auf dem Detektor vermieden werden kann. Insbesondere ist die Aktuatoranordnung dazu eingerichtet, die Position des ersten Spiegels und/oder des Reflektor-Arrays so einzustellen, dass Phasenverschiebungen von mehr als 2π möglich sind. Dies hat insbesondere Vorteile für eine Farbauflösung des Systems.

Die Aktuatoranordnung sollte dazu eingerichtet sein die Position des ersten Spiegels und oder des Reflektor-Arrays in Bruchteilen von Wellenlängen des ersten Spektralbereichs insbesondere entlang der optischen Achse zu verschieben. Es kann insbesondere zu Justage-Zwecken vorteilhaft sein, wenn die Aktuatoranordnung dazu eingerichtet ist, den ersten Spiegel und oder das Reflektor-Array bezüglich der optischen Achse der Eingangsapertur zu kippen.

Des Weiteren kann es von Vorteil sein das die Aktuatoranordnung dazu eingerichtet ist, eine Position des Reflektor-Arrays senkrecht zur optischen Achse der Eingangsapertur zu verstellen.

Die Aktuatoranordnung dient insbesondere dazu, eine optische Weglänge des ersten und/oder des zweiten Anteils des Objektlichtes zu verlängern bzw. zu verkürzen.

Eine Steuerung der Aktuatoranordnung kann über eine externe Steuereinheit, die dem System zugeordnet ist, erfolgen.

Gemäß einer Ausführungserfindung umfasst die Aktuatoranordnung zumindest ein Piezo-Element. Insbesondere umfasst die Aktuatoranordnung zumindest ein Ringpiezoanordnung.

Zwar stellt ein Piezo-Element strenggenommen ein bewegliches Teil dar, allerdings ist aufgrund der vergleichsweise monolithischen Bauweise eines Piezo-Elements kein besonderer Verschleiß aufgrund von exponierter Feinmechanik zu befürchten,

sodass man das System trotz des Piezo-Elements als weitestgehend frei von beweglichen Komponenten betrachten kann.

Die Verwendung von Piezo-Elementen trägt insbesondere zur erhöhten Robustheit des Systems bei. Zudem sind Piezoaktuatoren besonders genau und präzise steuerbar und einstellbar.

Gemäß einer alternativen Ausführungsform, bei der kein Strahlteiler benötigt wird, ist vorgesehen, dass das System ein transparentes massives Element umfasst, das mit einer ersten Fläche in Richtung des ersten Metalinsen-Array weist, und mit einer zweiten, der ersten Fläche gegenüberliegenden, Fläche in Richtung des zweiten Metalinsen-Arrays weist, insbesondere wobei ein vom transparenten massiven Element umfasstes Volumen frei von selektiv reflektierenden und selektiv beugenden Flächen ist, insbesondere wobei das transparente Element quaderförmig oder plättchenförmig ist.

Diese Ausführungsform kann vorteilhaft sein, wenn eine besonders kompakte Bauweise entlang einer Baurichtung zum Beispiel entlang der optischen Achse der Eingangsapertur gewünscht ist.

Das massive transparente Element kann dabei eine einfache Glasplatte oder eine einfache Polymerplatte sein, die im ersten Spektralbereich transparent ist.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist das massive transparente Element aus einem Stoff ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Glass, Polymer oder Kristall.

Während bei einer Ausführungsform mit Strahlteiler die Metalinsen-Arrays ein Winkel von 90° zueinander einschließen, liegen bei dieser Ausführungsform die Metalinsen-Arrays genau gegenüber und schließen das massive Transparent zwischen sich ein.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das System zumindest einen Flüssigkristall umfasst, der dazu eingerichtet ist, eine Phase zwischen den dem ersten und dem zweiten Anteil zugeordneten Wellenfronten des Objektlichtes anzupassen, insbesondere wobei der mindestens Flüssigkristall dazu eingerichtet ist, über ein Steuermodul die Phase zwischen den Wellenfronten des ersten und des zweiten Anteils zu verändern.

Der Flüssigkristall kann beispielsweise zusätzlich zu massiven transparenten Element entlang der optischen Achse der Eingangsapertur zwischen dem ersten und dem zweiten Metalinsen-Array angeordnet werden. Alternativ kann das massive transparente Element den Flüssigkristall umfassen bzw. aus dem Flüssigkristall bestehen. Bei letzterer Ausführungsform sollte der Flüssigkristall doppelbrechende Eigenschaften aufweisen.

Sofern es sich um eine Ausführungsform mit einem Strahlteiler handelt, kann der Flüssigkristall auf einer der Seiten die den ersten Spiegel oder das Reflektor-Array aufweisen angeordnet sein.

In einer weiteren Ausführungsform sofern es sich bei dem Strahlteiler um einen Strahlteilerwürfel handelt, kann eines der den Strahlteiler konstituierenden Dreiecksprismen den Flüssigkristall umfassen bzw. aus dem Flüssigkristall bestehen.

Alternativ können auch beide den Strahlteiler konstituierenden Dreiecksprismen einen Flüssigkristall umfassen. So kann sowohl für den ersten als auch für den zweiten Anteil des Objektlichts individuell eine Phase bezüglich des jeweils anderen Anteils eingestellt werden. Zudem ermöglicht die Verwendung von zwei Flüssigkristallen eine insgesamt längere optische Wegstrecke, so dass größere Phasenverschiebungen zwischen dem ersten und dem zweiten Anteil möglich werden.

Die Verwendung eines Flüssigkristalls zur Einstellung der relativen Phasen des ersten und des zweiten Anteils zueinander, ermöglicht die Herstellung eines Systems, das vollständig ohne bewegliche Komponenten auskommt, und daher einen extrem hohen Grad an Robustheit mit sich bringt.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, die bereits in einem vorangehenden Absatz beschrieben wurde, ist vorgesehen, dass das transparente massive Element den mindestens einen Flüssigkristall umfasst oder aus dem mindestens einen Flüssigkristall besteht.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, die bereits in einem vorangehenden Absatz beschrieben wurde und die einen polarisationsabhängigen Strahlteilwürfel gemäß zumindest einer der vorigen Ausführungsformen umfasst, ist vorgesehen, dass der polarisationsabhängige Strahlteiler ein erstes und ein zweites Prisma

umfasst, die einen Strahlteilerwürfel des Strahlteilers bilden, wobei das erste und/oder das zweite Prisma den mindestens einen Flüssigkeitskristall umfasst, insbesondere wobei sowohl das erste als auch das zweite Prisma einen Flüssigkeitskristall aufweisen.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, liegen eine Brennebene des ersten Metalinsen-Arrays und eine Brennebene des zweiten Metalinsen-Arrays aufeinander.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass in Propagationsrichtung hinter dem zweiten Metalinsen-Array und vor dem Detektor, ein Analysator angeordnet ist, der dazu eingerichtet ist, die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils zu verändern, so dass eine Interferenz des ersten Anteils mit dem zweiten Anteil auf dem Detektor erreicht wird.

Diese Ausführungsform ermöglicht einen höheren Interferenzkontrast auf dem Detektor.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die Eingangsapertur einen Polarisator umfasst, der dazu eingerichtet ist, das Objektlicht aus dem ersten Spektralbereich in den vordefinierten Polarisationszustand zu bringen.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die Eingangsapertur zumindest eine Linse umfasst, die dazu eingerichtet ist, das Objektlicht zu kollimieren.

Gemäß einer alternativen Ausführungsform der Erfindung, ist vorgesehen, dass die Eingangsapertur eine Lochblende als abbildendes Element umfasst, und insbesondere wobei die Eingangsapertur frei von Linsen oder brechenden Optischen Elementen ist, die das vom Untersuchungsgegenstand stammende Objektlicht kollimieren.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das System dazu eingerichtet ist, die Propagationsrichtung des auf das System treffenden Objektlichts aus dem ersten Spektralbereich wellenlängenabhängig abzulenken, so dass das Objektlicht, sowie der erste und der zweite Anteil zusätzlich zum ersten

Neigungswinkel einen wellenlängenabhängigen Winkel mit der optischen Achse einschließen.

Dies kann beispielsweise durch ein entsprechendes Metalinsendesign des ersten Metalinsen-Arrays erfolgen.

Diese Ausführungsform ermöglicht eine verbesserte Farb-Auflösung des Systems, da Objektlicht der ersten Spektralbereichs wellenlängenabhängig auf unterschiedliche Bereiche des Detektors abgebildet wird.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das Objektlicht des ersten Spektralbereichs aus zwei oder mehr disjunkten Wellenlängenbereichen besteht und/oder wobei das System dazu eingerichtet ist, das Objektlicht in zwei oder mehr disjunkte Wellenlängenbereich zu filtern, die den ersten Spektralbereich formen, wobei zwischen den Wellenlängenbereichen Lücken sind, insbesondere wobei diese Lücken jeweils mindestens 50 nm breit sind, sodass für jeden Wellenlängenbereich ein Interferenzmuster auf dem Detektor generiert wird, aus denen eine dreidimensionale Lageinformation und eine Farbzusammensetzung bezüglich der Wellenlängenbereiche eines Objektbereichs des Untersuchungsgegenstandes erstellt werden kann.

Insbesondere erfolgt eine Aufspaltung des ersten Spektralbereichs in die drei Grundfarben rot, grün und blau, die sich beispielsweise in folgende Wellenlängenbereiche übersetzen lassen:

Der Wellenlängenbereich des ersten Spektralbereichs für den blauen Farbkanal erstreckt sich dabei insbesondere von 420 nm bis 480 nm, der Wellenlängenbereich des ersten Spektralbereichs für den grünen Farbkanal erstreckt sich dabei insbesondere von 520 nm bis 565 nm, und der Wellenlängenbereich des ersten Spektralbereichs für den roten Farbkanal erstreckt sich insbesondere von 630 nm bis 680 nm.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das Objektlicht mindestens einen weiteren Spektralbereich umfasst, der von dem ersten Spektralbereich verschieden und disjunkt ist, wobei das erste und das zweite Metalinsen-Array sowie der polarisationsabhängige Strahlteiler für Licht aus dem mindestens einen weiteren Spektralbereich transparent und optisch inaktiv, also

neutral sind, wobei der polarisationsabhängige Strahlteiler weiterhin ein VPH (Volumen-Phasen-Hologramm) umfasst, das dazu eingerichtet ist, das Licht aus dem mindestens einen weiteren Spektralbereich polarisations- und winkelabhängig zu beugen und für das Licht aus dem ersten Spektralbereich transparent und optisch inaktiv, also neutral zu sein.

Dabei können die erste und der mindestens eine weitere Spektralbereich entlang des Spektrums wechselnde Wellenlängenbereiche besetzen. Insbesondere im Hinblick auf die vorherige Ausführungsform, kann der weitere Spektralbereich beispielsweise zwischen dem grünen und dem roten Farbkanal angeordnet sein, und insbesondere in einem Spektralbereich zwischen 570 nm und 620 nm beschränkt sein. Alternativ und oder zusätzlich kann der mindestens eine weitere Spektralbereich sich vom nahen Infrarotbereich also insbesondere von 700nm oder 800 nm aufwärts bis in den Infrarotbereich von mehr als 1300 nm erstrecken. Da das VPH insbesondere in Littrow-Anordnung angeordnet ist und für Wellenlängen aus dem weiteren Spektralbereich designed ist, wird einfallendes Objektlicht des Weiteren (auch als zweiter Spektralbereich im Kontext der Spezifikation bezeichnet) Spektralbereichs, das entlang der optischen Achse der Eingangsapertur propagiert und auf das VPH trifft in einem Winkel von 90° gebeugt in Richtung des Detektors. Dabei ist das einfallende Objektlicht aus dem zweiten Spektralbereich insbesondere s-polarisiert, wenn es auf das VPH trifft.

Bei dieser Ausführungsform wird insbesondere Referenzlicht, das über einen Referenzarm in den Strahlteiler eingekoppelt wird, mit dem Objektlicht, das über den sogenannten Objektarm eingekoppelt wird, auf dem Detektor zu Interferenz gebracht.

Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist daher vorgesehen, dass das System dazu eingerichtet ist, Referenzlicht aus dem zweiten Spektralbereich, insbesondere über einen Referenzarm, über eine der Eingangsapertur gegenüberliegenden Seite des Strahlteilers auf das VPH zu leiten, wobei der erste Spiegel insbesondere für Referenzlicht, also insbesondere für Licht aus dem zweiten Spektralbereich, transparent ist.

Gemäß dieser Ausführungsform kann auf der der Eingangsapertur gegenüberliegenden Seite des Strahlteilers Referenzlicht, das insbesondere

ebenfalls s-polarisiert ist, wenn es auf das VPH trifft, aus dem zweiten Spektralbereich kollimiert und ebenfalls in Littrow-Konfiguration auf des VPH geschickt werden (dazu muss der erste Spiegel für den zweiten Spektralbereich durchlässig sein). Dort wird das Referenzlicht ebenso in 90° in die entgegengesetzte Richtung vom Detektor gebeugt. Dort wird es an einem Spiegel oder eine Prismaanordnung reflektiert, wobei der Spiegel und/oder die Prismaanordnung einen Winkel von mehr oder weniger als 45° beispielsweise 45°± 0.2° mit dem VPH einschließen. Dadurch wird das zurückreflektierte Referenzlicht am VPH zumindest teilweise transmittiert, und interferiert mit dem Objektlicht des zweiten Spektralbereichs. Dieses Interferenzmuster kann in vorteilhafter Weise dazu genutzt werden, eine erhöhte räumliche Auflösung entlang der optischen Achse der Eingangsapertur zu erzeugen. Insbesondere besteht der weitere Spektralbereich aus einer Vielzahl von disjunkten Spektrallinien, die eine sehr geringe Linienbreite aufweisen, zum Beispiel in der Größenordnung von sub-Nanometern, und sich über ein Bereich von beispielsweise 10 nm bis 50 nm erstrecken. Da das VPH jede dieser Spektrallinien leicht unterschiedlich beugt, kann mit dieser Art von „optischen Kämmen“, aus den sich daraus ergebenden Interferenzmustern auf dem Detektor die erhöhte räumliche Auflösung entlang der optischen Achse erzeugt werden.

Ähnliche holografische Systeme sind bekannt weisen jedoch anstelle eines VPHs beispielsweise herkömmliche Transmissions-Beugungsgitter auf, die allerdings nachteilige Eigenschaften hinsichtlich der gewünschten Eigenschaften aufweisen.

Es wird angemerkt, dass für die Funktionalität dieser Ausführungsform, bezüglich des Lichts des zweiten Spektralbereichs vorteilhafterweise, der erste Spiegel zumindest teilweise transparent ist.

Des Weiteren kann es von Vorteil sein, wenn das zweite λ/4-Element insbesondere optisch neutral ist, also keine nennenswerte Wirkung auf das Licht ausübt.

Alternativ, kann ein drittes λ/4-Element vorgesehen sein, dass beispielsweise vom einfallenden Referenzlicht aus gesehen vor dem ersten Spiegel angeordnet ist, insbesondere also für Objektlicht des ersten Spektralbereichs nicht erreichbar ist, wobei das dritte λ/4-Element dazu eingerichtet ist, zusammen mit dem zweiten λ/4-Element die Polarisation des Referenzlichtes um 90° zu drehen, insbesondere so,

dass das Referenzlicht vorteilhafter Weise in s-polarisiertem Zustand auf das VPH trifft.

Dies ist in der folgenden Ausführungsform der Erfindung beschrieben, wonach das System ein drittes λ/4-Element umfasst, das auf einer dem Strahlteiler abgewandten Seite des ersten Spiegels angeordnet ist, und das dazu eingerichtet ist, in Zusammenwirken mit dem zweiten λ/4-Element, das Referenzlicht in einen vordefinierten Polarisationszustand zu bringen, so dass das Referenzlicht linear s-polarisiert ist, wenn es, vom ersten Spiegel kommend auf das VPH trifft.

Überdies ist es vorteilhaft, wenn auch der polarisationsabhängige Strahlteiler keinen optischen Effekt auf Licht des zweiten Spektralbereichs ausübt, also ebenfalls optisch neutral ist. Des Weiteren sind vorteilhafter Weise das erste und das zweite Metalinsen-Array optisch neutral für Licht aus dem zweiten Spektralbereich.

Das Referenzlicht des zweiten Spektralbereichs kann durch eine Referenzlichtquelle, beispielsweise einen Laser, der auch als Objektlichtquelle dienen kann, zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin weist das System gegebenenfalls eine Kollimationslinse für das Referenzlicht auf, sodass das Referenzlicht kollimiert in Richtung des VPH propagieren kann. Gegebenenfalls ist auch ein Polarisator vorgesehen, der dafür Sorge trägt, dass das Referenzlicht im s-polarisierten Zustand auf das VPH trifft.

Gemäß einer Weiterbildung der vorigen Ausführungsform ist vorgesehen, dass das System zwischen dem Reflektor-Array und dem Strahlteiler eine wellenlängen-selektive Prismaanordnung aufweist, die dazu eingerichtet ist, Licht, insbesondere das vom VPH in Richtung des Reflektor-Arrays gebeugte Referenzlicht des mindestens einen weiteren Spektralbereichs unter einem Prismawinkel in Richtung des Detektors zu reflektieren und wobei die Prismaanordnung für Licht aus dem ersten Spektralbereich transparent und optisch inaktiv ist.

Der Prismawinkel ist wie bereits erwähnt so eingestellt, dass eine Reflexionsfläche der Prismaanordnung mit dem VPH einen Winkel von ungleich 45° formt, wobei insbesondere der Winkel betragsmäßig von größer 45.2° eingeschlossen wird.

Durch diese „Schrägstellung“ wird der von der Prismaanordnung zurückreflektierte Referenzlichtstrahl in ausreichend hohem Maße durch das VPH transmittiert, so dass

ausreichend Referenzlicht zur Interferenz auf dem Detektor mit dem Objektlicht des zweiten Spektralbereichs zur Verfügung steht. Durch diese Erweiterung des Systems kann die Auflösung entlang der optischen Achse bis zum sub-Millimeterbereich oder sogar in den sub-Mikrometerbereich verbessert werden.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden nachfolgend anhand der Figurenbeschreibung von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer ersten Ausführungsform der Erfindung;

Fig. 2 eine schematische Ansicht einer zweiten Ausführungsform der Erfindung mit Farbauftrennung;

Fig. 3 eine schematische Ansicht einer dritte Ausführungsform der Erfindung VPH;

Fig. 4 eine schematische Ansicht einer vierten Ausführungsform der Erfindung ohne Strahlteiler;

In Fig. 1 ist ein System 1 gemäß einer beispielhaften Ausführungsform der Erfindung schematisch dargestellt. Das System 1 ist dazu eingerichtet, in holographischen bildgebenden Anwendungen zum Einsatz zu kommen. Insbesondere ist das System 1 zur dreidimensionalen Farbbildgebung geeignet.

Besonders vorteilhaft an dem in Fig. 1 dargestellten System ist die extrem hohe bauliche Kompaktheit, die insbesondere dadurch erreicht wird, dass keinerlei beweglichen Komponenten oder störungsanfällige feinmechanische Komponenten verwendet notwendig sind.

Das in Fig. 1 dargestellte System 1 wird im Kontext Erfindung auch als kompaktes 3D-Farbmodul bezeichnet. Das System 1 ist dazu eingerichtet, eine Oberfläche oder einen Bereich unterhalb der Oberfläche eines Untersuchungsgegenstands S – in der vorliegenden Spezifikation alternativ auch als Objekt bezeichnet - dreidimensional zu erfassen und ggf. auch darzustellen.

Dazu wird das Objekt S beispielsweise in einem punktförmigen Bereich mit einer externen Lichtquelle 18, die von dem System 1 umfasst sein kann oder auch separat angeordnet sein kann, beleuchtet. Das Licht 10 mit dem der

Untersuchungsgegenstand S beleuchtet wird, wird im Zusammenhang von Holografie auch als Objektlicht 10 bezeichnet. Als Lichtquelle 18 kann auch natürliches Umgebungslicht dienen - auch wenn dieses dann das Objekt S nicht zwingendermaßen in einem punktförmigen Bereich beleuchtet.

Das Objekt S - als Reaktion auf die Beleuchtung wirft das Objektlicht 10 über verschiedene Prozesse wie beispielsweise Streuung, Reflexion oder Lumineszenz zurück. Das vom Objekt S stammende Objektlicht 10 wird über die Eingangsapertur 2 des Systems 1 eingesammelt.

Im Folgenden und auch in Teilen der Beschreibung wird der Fall betrachtet, bei dem das vom Untersuchungsgegenstand S stammende Objektlicht S, aus oder nahe einer Ebene E vom Untersuchungsgegenstand S stammt, die in einer Brennebene E der Eingangsapertur 2 liegt. In den Fällen, in denen das Objektlicht 10 aus einer in der Nähe liegenden Ebene der Brennebene E der Eingangsapertur 2 stammt, verhält sich das System 1 entsprechend der unterschiedlich gekrümmten Wellenfronten des Objektlichtes 10 an der Eingangsapertur 2, was dem Fachmann bekannt ist.

Die Eingangsapertur 2 ist dazu eingerichtet, das vom Untersuchungsgegenstand S stammende Objektlicht 10 zu kollimieren, insbesondere dasjenige Objektlicht 10 welches aus der Brennebene E der Eingangsapertur 2 stammt. Dazu ist anzumerken, dass die Eingangsapertur 2 eine Kollimationsoptik 2a, z.B. in Form einer oder mehrere Linsen 2a aufweisen kann. In dem in Fig. 1 dargestellten Fall umfasst die Eingangsapertur 2 eine Kollimationslinse 2a. Jedoch ist es ebenso möglich, dass die Kollimationsoptik 2a lediglich eine Lochblende umfasst (nicht dargestellt). Bei entsprechend kleiner Lochblende und/oder ausreichend hohem Objektabstand wird das einfallende Objektlicht 10 ebenso kollimiert oder weist zumindest einen ausreichend hohen Grad an Kollimation auf.

Unabhängig von der Ausgestaltung der Eingangsapertur 2 wird als kollimiertes Licht insbesondere Licht mit im Wesentlichen ebenen Wellenfronten bezeichnet.

Zudem weist die Eingangsapertur 2 eine optische Achse OA auf. Die optische Achse OA in Fig. 1 erstreckt sich mittig und senkrecht zur Eingangsapertur 2 bzw. zu der Kollimationslinse 2a. Die Kollimationslinse 2a ist zumindest dazu eingerichtet, Objektlicht 10 aus einem ersten Spektralbereich Bereich zu kollimieren. Darüber

hinaus kann die Kollimationslinse 2a ebenso dazu eingerichtet sein, Objektlicht 10 aus einem zweiten Spektralbereich zu kollimieren. In diesem Fall kann die Kollimationslinse 2a beispielsweise einen Achromat, einen Apochromat oder einen Superapochromat umfassen.

In den Figuren wird auf die Darstellung von Licht in Form von Strahlenoptik zurückgegriffen. Das heißt die Wellenfronten und die Krümmungen der Wellenfronten in den Figuren abgebildeten Lichtstrahlen sind regelmäßig nicht dargestellt. Der Fachmann weiß jedoch, wie Lichtwellenfronten durch die verschiedenen optischen Komponenten des Systems 1 beeinflusst werden und wie eine Ausbreitungsrichtung bzw. die Eigenschaften des Lichts dadurch beeinflusst wird.

In Fig. 1 sind zwei unterschiedliche Lichtstrahlen 10a, 10b des Objektlichtes 10 eingezeichnet. Die erste Situation betrifft einen ersten Objektlichtstrahl 10a, der aus einem Bereich des Untersuchungsgegenstandes S stammt, der auf der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 liegt. Die zweite Situation betrifft einen zweiten Objektlichtstrahl 10b, der aus einem Bereich des Untersuchungsgegenstandes stammt, der lateral versetzt zur optischen Achse der Eingangsapertur 2 liegt. Der Ausdruck “lateral versetzt“ kann beispielsweise in mittels eines Kartesischen-Koordinatensystem (x,y,z wie in Fig. 1 angedeutet) beschrieben werden, das der Eingangsapertur 2 zugeordnet wird. Dabei erstreckt sich die z-Achse entlang der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 und die x- und die y-Achse erstrecken sich senkrecht dazu, also lateral zur optischen Achse OA. Die Bezeichnung „erster“ und „zweiter“ dient lediglich einer Unterscheidung, nicht jedoch zum Anzeigen einer Abfolge.

Der erste Objektlichtstrahl 10a wird durch die Kollimationslinse 2a kollimiert und propagiert anschließend parallel zur optischen Achse OA der Kollimationslinse 2a weiter, d.h. er schließt einen Winkel von 0° mit der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 ein. Der Winkel, der von dem kollimierten Objektlicht 10, 10a, 10b mit der optischen Achse OA eingeschlossen wird, wird im Rahmen dieser Spezifikation auch als erster Neigungswinkel β bezeichnet.

Der erste Neigungswinkel β wird dabei insbesondere durch den zwischen der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 und der Propagationsrichtung des kollimierten Objektlichtstrahls 10, 10a, 10b eingeschlossenen Winkel definiert.

Der zweite Objektlichtstrahl 10b wird durch die Kollimationslinse 2a ebenso kollimiert und propagiert anschließend allerdings mit einem ersten Neigungswinkel zur optischen Achse OA der Kollimationslinse 2a weiter, der ungleich 0° beträgt. Der erste Neigungswinkel β enthält nach den Gesetzen der Strahlenoptik (im Zusammenwirken mit der Eingangsapertur 2) eine Information über die laterale Position auf dem Untersuchungsgegenstand von der der betreffende Objektlichtstrahl 10b stammt.

Hinter der Kollimationslinse 2a ist ein Polarisator 15 angeordnet, der dazu eingerichtet und optional einstellbar ist, das Objektlicht 10 in einen vordefinierten Polarisationszustand zu bringen. Der Polarisator 15 ist insbesondere so eingerichtet, dass er das Objektlicht 10 in den vordefinierten Polarisationszustand bringt - zumindest für Objektlicht 10 aus dem ersten Spektralbereich.

Es wird angemerkt, dass der Polarisator 15 auch vor der Kollimationslinse 2a angeordnet sein kann. Und das einfallendes Objektlicht 10 erst durch die dem Polarisator 15 nachgeordnete Kollimationslinse 2a kollimiert wird. Ebenso ist es vorstellbar, dass die Kollimationslinse 2a bzw. die Eingangsapertur 2 selbst eine entsprechende Polarisatoreigenschaft trägt.

Die Begriffe „hinter“ und “vor“ sind insbesondere so zu verstehen, dass sie sich auf einer Anordnung bezüglich Ausbreitungsrichtung des Objektlichtes 10 beziehen und weniger auf deren geometrische Abfolge oder Anordnung, die durch Faltungen durch Strahlteiler oder Spiegel von dem „rein optischen“ Strahlengang abweichen können.

In dem vorliegenden Fall ist der Polarisator 15 so angeordnet und eingestellt (z.B. in einem Drehwinkel von 45°), dass das Objektlicht 10, unabhängig von einer Einfallsrichtung oder dem ersten Neigungswinkel β, s- und p-polarisiertes Licht in etwa zu gleichen Anteilen aufweist. D.h. der vordefinierte Polarisationszustand setzt sich in diesem Beispiel aus einem ersten Polarisationszustand, der s-polarisiertes Objektlicht umfasst und aus einem zweiten Polarisationszustand, der p-polarisiertes Objektlicht umfasst, zusammen. Es wird davon ausgegangen, dass dem Fachmann die Begriffe s- und p-polarisiertes Licht als zueinander konjugierte linear polarisierte Polarisationsrichtungen bekannt sind. Die Zuordnung des s-polarisierten Objektlichtes zum ersten Polarisationszustand des p-polarisierten Objektlichtes zum

zweiten Polarisationszustand kann auch genau andersherum erfolgen, und dient nur illustrierenden Zwecken.

Im Allgemeinen kann der Polarisator 15 dazu eingerichtet sein, das einfallende Objektlicht 10 in Objektlicht 10 zu wandeln, welches zwei zueinander konjugierte Polarisationszustände aufweist. Diese könnten zum Beispiel auch links und rechts drehendes zirkular polarisiertes Objektlicht 10 sein.

Im Folgenden wird ohne Einschränkung der Allgemeinheit, auf den Fall von s- und p-polarisierten Polarisationszuständen eingegangen. Dies ist insofern allgemeingültig, da das vom Untersuchungsgegenstand stammende Objektlicht auch unpolarisiert sein kann, wobei dieses Objektlicht durch das erste Metalinsen-Array in jedem Fall - auch ohne Polarisator 15 – als erster und zweiter Anteil „gesehen“ wird, da auch unpolarisiertes Licht s- und p-polarisierte Komponenten umfasst.

Das Objektlicht 10 mit dem gerade beschriebenen vordefinierten Polarisationszustand trifft nun erfindungsgemäß auf ein erstes Metalinsen-Array 3. Das erste Metalinsen-Array 3 umfasst eine Vielzahl an Metalinsen 30, die in einem Array angeordnet sind. Das erste Metalinsen-Array 3 ist erfindungsgemäß nun so angeordnet und eingerichtet, dass es einen ersten Anteil 101 des Objektlichtes, der den ersten Polarisationszustand aufweist, fokussiert, d.h. zumindest die Wellenfrontkrümmung erhöht, so dass das Objektlicht konvergent ist, während hingegen ein zweiter Anteil 102 des Objektlichts, der den zweiten Polarisationszustand aufweist, im Wesentlichen unverändert durch das ersten Metalinsen-Array propagiert. D.h. sofern das Objektlicht von der Eingangsapertur 2 kollimiert wurde, so bleibt der zweite Anteil 102 kollimiert, nachdem er durch erste Metalinsen-Array 3 propagiert ist.

Der Begriff „unverändert“ im Kontext mit dem Metalinsen-Array 3, 4 bezieht sich insbesondere darauf, dass die Wellenfronten des zweiten Anteils 102 bzw. des zweiten Polarisationszustandes idealerweise komplett unverändert durch das Metalinsen-Array 3, 4durchtreten können, sodass vor und hinter dem Metalinsen-Array die Wellenfronten des zweiten Anteils 102 bzw. des zweiten Polarisationszustandes unverändert sind. Dem Fachmann ist klar, dass aufgrund von Imperfektionen im Metalinsen-Array 3, 4 dennoch leichte Veränderung der Wellenfronten auftreten können. Dies soll mit dem Ausdruck „im Wesentlichen“ zum

Tragen kommen. Der synonym verwendete Begriff im Rahmen dieser Spezifikation ist „optisch neutral“.

Der fokussierte erste Anteil 101 ist insbesondere so fokussiert, dass er auf eine dem ersten Metalinsen-Array 3 zugeordnete Brennebene 3B fokussiert wird.

Hinter dem ersten Metalinsen-Array 3 ist ein polarisationsabhängiger Strahlteiler 6 angeordnet, insbesondere vor der Brennebene 3B des ersten Metalinsen-Arrays 3. In dem Beispiel von Figur 1 ist der polarisationsabhängige Strahlteiler 6 ein polarisationsabhängiger Strahlteilerwürfel. Der Strahlteilerwürfel 6 umfasst zwei Dreiecksprismen, z.B. ein erstes und ein zweites Dreiecksprisma 6A, 6B, die an ihrer Grundfläche verbunden sind und entlang der Grundflächen eine Strahlteilerfläche 6Fdefinieren. Die Strahlteilerfläche 6F erstreckt sich in einem 45° Winkel zur optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 bzw. des ersten Metalinsen-Arrays 3.

Die erste Objektlichtstrahl 10a, umfassend einen ersten und zweiten Anteil, sowie der zweite Objektlichtstrahl 10b, ebenfalls umfassend einen ersten und zweiten Anteil 101, 102, treffen nun auf das erste Dreiecksprisma 6A des Strahlteilers 6 und propagieren durch dieses hindurch bis zur Strahlteilerfläche 6F.

An der Strahlteilerfläche 6F wird Objektlicht 101 des ersten Polarisationszustandes des ersten und zweiten Objektlichtstrahls 10a, 10b reflektiert, während hingegen Objektlicht 102 des zweiten Polarisationsstandes transmittiert wird.

Im Folgenden werden zunächst die Objektlichtstrahlen des ersten Anteils 101 betrachtet, die durch das erste Metalinsen-Array 3 fokussiert wurden, also den ersten Polarisationszustand hinter dem ersten Metalinsen-Array 3 aufweisen, und dadurch an der Strahlteilerfläche 6F reflektiert werden. Dieses Licht propagiert weiter im ersten Dreiecksprisma 6A und trifft anschließend auf ein erstes $\lambda/4$ -Plättchen 9a, das beispielsweise an einer Fläche des Strahlteilerwürfels 6 angeordnet ist.

Das erste $\lambda/4$-Plättchen 9a bewirkt eine Veränderung des Polarisationszustand des ersten Anteils 101; in diesem Beispiel wird der Polarisationszustand von linear-polarisiert in zirkular polarisiert verändert.

Hinter dem ersten $\lambda/4$-Plättchen 9a ist ein Reflektor-Array 8 senkrecht zur (entsprechend gefalteten) optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 angeordnet.

Das Reflektor-Array 8 umfasst eine Vielzahl in einem Array angeordneten Retroreflektoren 80, die dazu eingerichtet sind, weitgehend unabhängig von einer Einfallsrichtung des eintreffenden Lichtes 101, das Licht in die Richtung zu reflektieren, aus der es gekommen ist. Weiterhin ist das Reflektor-Array 8 entlang oder parallel versetzt in der Nähe der Brennebene 3B des ersten Metalinsen-Arrays 3 angeordnet.

Das Reflektor-Array 8 umfasst die gleiche Zahl an Retroreflektoren 80 wie das erste Metalinsen-Array 3 Metalinsen 30 umfasst, und auch die gleiche Zahl an Retroreflektoren 80 wie das zweite Metalinsen-Array 4 Metalinsen 40 umfasst,

Der vom Reflektor-Array 8 zurückreflektierte erste Anteil 101 propagiert nun abermals durch das erste λ/4-Plättchen 9a, wodurch der Polarisationszustand des ersten Anteils 101 wiederum verändert wird, und zwar so, dass der Polarisationszustand des ersten Anteils 101 nun dem zweiten Polarisationszustand des Objektlichtes hinter der Eingangsapertur 2 entspricht – in diesem Beispiel ändert sich der Polarisationszustand des ersten Anteils also von s-polarisiertem Licht in p-polarisiertes Licht, nachdem der erste Anteil 101 insgesamt zweimal durch das erste λ/4 -Plättchen 9a propagiert ist.

Der erste Anteil 101 propagiert sodann wiederum durch das erste Dreiecksprisma 6A und trifft auf die Strahlteilerfläche 6F, wo der erste Anteil 101 aufgrund der veränderten Polarisation nun transmittiert wird. Der erste Anteil 101 propagiert danach weiter durch das zweite Dreiecksprisma 6B und trifft anschließend auf ein zweites Metalinsen-Array 4, das gegenüber dem Reflektor-Array 8 am Strahlteiler 6 angeordnet ist.

Wenden wir uns nun dem zweiten Anteil 102 des Objektlichtes zu. Der zweite Anteil 102 des Objektlichtes, also der Anteil, der den zweiten Polarisationszustand aufweist, propagiert hinter der Strahlteilerfläche 6F durch das zweite Dreiecksprisma 6B des Strahlteilers 6 und anschließend durch ein zweites λ/4-Plättchen 9b, das beispielsweise an einer dem ersten Metalinsen-Array 3 gegenüberliegenden Seite des Strahlteilerwürfels 6 angeordnet ist.

Das zweite λ/4-Plättchen 9b bewirkt eine Veränderung des Polarisationszustand des zweiten Anteils 102; in diesem Beispiel wird der Polarisationszustand von linear-

polarisiert in zirkular polarisiert verändert. Hinter dem zweiten λ/4-Plättchen 9b ist ein planarer Spiegel 7 senkrecht zur optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 angeordnet, der den zweiten Anteil 102 zurückreflektiert. Der zurückreflektierte zweite Anteil 102 propagiert nun abermals durch das zweite λ/4-Plättchen 9b, wodurch der Polarisationszustand des zweiten Anteils 102 wiederum verändert wird, und zwar so, dass der Polarisationszustand des zweiten Anteils 102 nun dem ersten Polarisationszustand des Objektlichtes hinter der Eingangsapertur 2 entspricht – in diesem Beispiel ändert sich der Polarisationszustand des zweiten Anteils 102 also von p-polarisiertem Licht in s-polarisiertes Licht, nachdem der zweite Anteil 102 zweimal durch das zweite λ/4-Plättchen 9b propagiert ist.

Der am ersten Spiegel 7 zurückreflektierte zweite Anteil 102 propagiert anschließend durch das zweite Dreiecksprisma 6B und trifft abermals auf die Strahlteilerfläche 6F, wo aufgrund der veränderten Polarisation des zweiten Anteils 102, der zweite Anteil 102 reflektiert wird. Der zweite Anteil 102 propagiert also weiterhin durch das zweite Dreiecksprisma 6B und trifft anschließend, wie auch der erste Anteil 101 auf das zweite Metalinsen-Array 4.

Das zweite Metalinsen-Array 4 weist im Wesentlichen die gleichen Eigenschaften wie das erste Metalinsen-Array 4 auf und umfasst eine Vielzahl im Array angeordnete Metalinsen 40. Im Gegensatz zum ersten Metalinsen-Array 3 hat in diesem Beispiel das zweite Metalinsen-Array 4 jedoch die Eigenschaft Licht im Polarisationszustand des zweiten Anteils 102 unverändert, insbesondere unverändert kollimiert zu lassen und Licht des ersten Anteils 101 zu kollimieren. D.h. hinter dem zweiten Metalinsen-Array 4 ist das Licht sowohl des ersten als auch des zweiten Anteils 101, 102 kollimiert, sofern das Objektlicht von der Eingangsapertur 2 kollimiert in Richtung des erste Metalinsen-Arrays 3 geleitet wurde.

Hinter dem zweiten Metalinsen-Array 4 ist ein Analysator 14 angeordnet, der die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils 101, 102 angleicht, so dass die Lichtstrahlen des ersten und des zweiten Anteils 101, 102 miteinander interferieren können. Der Analysator 14 ist dabei beispielsweise in eine Winkelstellung von 45° eingestellt, so dass die angeglichenen ersten und zweiten Anteile 101, 102 die gleichen Polarisationsrichtungen aufweisen.

Hinter dem Analysator 14 ist ein Detektor 5 angeordnet, der dazu eingerichtet ist, die interferierenden ersten und zweiten Anteile 101, 102 des Objektlichts aufzunehmen. Der Detektor 5 kann beispielsweise eine Kamera sein. Die interferierenden ersten und zweiten Anteile 101, 102 des Objektlichtes bilden dabei ein Interferenzmuster auf dem Detektor 5 aus, das anhand einer Auswerteeinheit (nicht dargestellt) ausgewertet werden kann, um eine dreidimensionale Bildinformation zu generieren.

Bezugnehmend auf Objektlicht 10, das einen ersten Neigungswinkel ungleich 0° mit der optischen Achse OA einschließt ist nun folgendes anzumerken. Aufgrund der speziellen und erfindungsgemäßen Anordnung der optischen Komponenten des Systems 1 schließen die Objektlichtstrahlen des ersten Anteils 101 und des zweiten Anteils 102 des Objektlichts, die unter dem ersten Neigungswinkel β in das System 1 treten, also hinter der Eingangsapertur 2 den ersten Neigungswinkel β mit der optischen Achse OA einschließen, nach Reflexion an dem Reflektor-Array 8 bzw. dem planaren Spiegel 7 einen zweiten Neigungswinkel β‘ ein. Dieser zweite Neigungswinkel β‘ ist betragsmäßig doppelt so groß wie der erste Neigungswinkel β und wird durch den Einsatz der Kombination aus planarem Spiegel 7 und Reflektor-Array 8 erreicht. Während der erste Anteil 101 bei einem Einfallswinkel β nach Reflexion am Reflektor-Array 8 einen Ausfallswinkel β aufweist, weist der zweite Anteil 102 nach Reflexion am planaren Spiegel 7 einen Ausfallswinkel von -β auf. Diese Winkel addieren sich dann betragsmäßig zu dem doppelten ersten Neigungswinkel 2β auf, der dem zweiten Neigungswinkel β‘ entspricht.

Der Vorteil dieser Anordnung ist ein verbessertes laterales Auflösungsvermögen des Systems 1 im Vergleich zu anderen Systemen. Weiterhin umfasst ein solches System 1 keine beweglichen Feinmechanik-Komponenten, was das System 1 extrem robust macht und eine sehr kompakte Bauweise ermöglicht.

Das erfindungsgemäße System 1 erlaubt es, dem Fachmann aus den lokalen Wellenfrontwinkeln pro Metalinse des zweiten Metalinsen-Arrays bzw. aus den Interferenz-Frequenzen des auf dem Detektor erzeugten Interferenzmusters, die Wellenfronten des Objektlichtes errechnen, welche wiederum auf eine z-Abweichung von der Brennebene der Eingangsapertur schließen lassen; also neben der lateralen Ortsauflösung noch auf eine Bildinformation bzgl. einer z-Position des Bereichs des Untersuchungsgegenstands zu generieren.

Als Alternative zu den optischen Eigenschaften des zweiten Metalinsen-Arrays 4 kann auch in Betracht gezogen werden, das zweite Metalinsen-Array 4 identisch zum ersten Metalinsen-Array 3 auszugestalten, d.h. insbesondere identisch auch in Bezug auf seine optischen Eigenschaften was die Polarisationszustände angeht.

In diesem Fall wäre hinter dem Strahlteilerwürfel 6 auf Seiten des zweiten Metalinsen-Arrays 4, vor dem zweiten Metalinsen-Array 4 ein λ/2-Plättchen 11 (gestrichelt angedeutet) angeordnet, das die Polarisationszustände der ersten und zweiten Anteile 101, 102 um 90° dreht, so dass diese wieder ihren ursprünglichen vordefinierten Polarisationszuständen entsprechen. Diese Ausführungsform mit zwei komplett identischen Metalinsen-Arrays 3, 4 hat den Vorteil, dass das System 1 und die Metalinsen-Arrays 3, 4 vergleichsweise kostengünstig hergestellt werden können.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung, die zumindest bezüglich einer Ausführungsform in Fig. 1 dargestellt ist, umfasst das System 1 ein Mittel zum Verschieben einer Lichtwellenphase für den ersten und/oder den zweiten Anteil 101, 102 des Objektlichtes. Dadurch kann ein störendes DC- oder Gleichlichtsignal auf dem Detektor 5 vermieden werden. Dafür wird typischerweise die Phase in dem ersten oder in dem zweiten Anteil beispielsweise durch eine geringfügige Veränderung der optischen Wegstrecke (auch als optische Weglänge bezeichnet) erreicht.

Die Änderung der optischen Wegstrecke kann über eine tatsächliche geometrische Verlängerung der Wegstrecke für den ersten und oder den zweiten Anteil erfolgen, oder durch eine Anpassung oder Variation des Brechungsindexes, durch den der erste und/oder der zweite Anteil läuft.

In Fig. 1 ist eine Phasenanpassung durch einen Aktuator 12 realisiert, der das Reflektor-Array 8 zumindest entlang der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 (auch wenn diese durch den Strahlteilerwürfel gefaltet ist) verschieben kann.

Der Aktuator 12 kann beispielsweise ein Piezo-Element umfassen, das über eine elektrische Ansteuerung steuerbar ist. Insbesondere kann das Piezo-Element ein Piezo-Ringelement sein.

Der Aktuator 12 ermöglicht also eine Veränderung der optischen Wegstrecke für den ersten Anteil 101 des Objektlichts, der von der Eingangsapertur 2 kommend über

den Strahlteiler 6 in Richtung des Reflektor-Arrays 8 reflektiert wird. Durch eine Verschiebung des Reflektor-Arrays 8 entlang der optischen Achse OA kann so eine relative Phase zum zweiten Anteil 102 des Objektlichtes eingestellt werden.

Alternativ oder zusätzlich kann ein weiterer Aktuator 12‘ auch auf Seiten des ersten Spiegels 7 angeordnet sein und dazu eingerichtet sein, den Spiegel 7 zumindest entlang der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 zu verschieben.

Es ist auch möglich, dass sowohl ein Aktuator 12 das Reflektor-Array 8 steuert und ein weiterer Aktuator 12‘ den ersten Spiegel 7 steuert, so dass die optischen Wegstrecken sowohl vom ersten 101 als auch vom zweiten Anteil 102 geändert werden können.

Alternativ oder ergänzend wäre es auch möglich, eine Brechungsindex Änderung in einem oder beiden Dreiecksprismen 6A, 6B des Strahlteilerwürfel 6 zu erzeugen, so dass die Lichtwellenphasen des ersten und/oder des zweiten Anteils 101, 102 eingestellt werden können (nicht dargestellt). Der Brechungsindex kann durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an das erste und/oder zweite Dreiecksprisma 6A, 6B verändert werden. Dazu müssen die Dreieckprismen 6A, 6B aus einem dem Fachmann geläufigen Material gefertigt sein.

Alternativ kann die Phasenänderung in einem der beiden Polarisationszustände durch das erste und/oder das zweite Metalinsen Arrays 3, 4 eingestellt werden. Dies kann beispielsweise durch ein Phasenschieber-Element erreicht werden, oder durch neue Entwicklungen in der Metalinse des Arrays selbst, welche es erlauben die Phase einer Polarisationsrichtung durch Anlegen einer elektrischen oder magnetischen Größe zu variieren.

Unabhängig davon, wie die Phasenverschiebungen erzeugt werden, ist das System 1 insbesondere dazu ausgelegt, relative Phasenverschiebung von mehr als 2π zu ermöglichen, sodass es neben der Gleichlichtunterdrückung in den Interferogrammen einzelner Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche möglich wird, auch verschiedene Farben oder weiter auseinanderliegende Wellenlängenbereiche über die Phasenlage zu trennen. Die entsprechende Trennung ist bspw. mittels einer Fouriertransformation möglich und dem Fachmann grundsätzlich bekannt.

In Fig. 2 ist in Anlehnung an Fig. 1 eine Erweiterung der Erfindung für alle drei Grundfarben RGB des Systems 1 vorgestellt. Obwohl die Verschiebung von Phasen über einen größeren Bereich (mehrere 2π) in den vorigen Absätzen bereits beschrieben wurde, kann dies den Dynamikbereich des Detektors 5 begrenzen, da die Signale aller Grundfarben bevorzugt in einem zentralen Bereich um die optische Achse OA des Systems (nun bezogen auf den Detektor) ein hohes Maß an Interferenz zeigen (und weniger am Rande) und es so zu einer unerwünschten Signalüberhöhung kommen kann. Daher ist in Fig. 2 eine Ausführungsform dargestellt, welche die drei Grundfarben wellenlängen-selektiv leicht von dem zentralen Bereich um die optische Achse OA im Bereich des ersten Metalinsen-Arrays 3 ablenkt. Dies kann über ein lokales Prisma, ein optisches Gitter oder ein VPH (nicht dargestellt), welches der eigentlichen Linsenwirkung des ersten Metalinsen-Arrays 3 überlagert ist, realisiert werden.

Alternativ oder zusätzlich kann diese Eigenschaft auch von dem ersten Metalinsen-Array 3 selbst erfüllt werden. In Fig. 2 ist die wellenlängen-selektive Ablenkung über das erste Metalinsen-Array 3 für drei verschiedene Wellenlängen (auch als drei Farben RGB im Kontext der Spezifikation bezeichnet) in Form von Strahlen (Pfeile 21, 22, 23) dargestellt.

Jede der drei Wellenlängen / Farben pro Objektpunkt bzw. Objektbereich generiert ein Interferogramm bzw. ein Interferenzmuster mit einer Raumfrequenz und einer Richtung auf dem Detektor 5. Zusammen mit Phasenverschiebungen wie für Fig. 1 beschrieben, lassen sich die jeweiligen spektralen Bildanteile für den Fachmann trennen, so dass durch Auswertung des Interferenzmusters auf dem Detektor 5 über eine Auswerteeinheit eine ortsaufgelöste 3D-Farbbildinformation generiert werden kann.

Um das Auflösungsvermögen des Systems 1 insbesondere entlang der optischen Achse OA zu erhöhen, kann das System 1 mit einem wie folgt ausgestalteten Strahlteiler 6 modifiziert werden. Dieses System erlaubt dann eine extrem hohe Auflösung entlang der z-Achse, die insbesondere im Submikrometerbereich liegt.

In dem in Fig. 3 dargestellten Ausführungsbeispiel umfasst der Strahlteilwürfel 6 entlang der Strahlteilerfläche eine Transmissions-Beugungsgitteranordnung in Form zumindest eines Volumen-Phasen-Hologramm Gitters (VPH) 16. VPHs 16 sind dem

Fachmann gemeinhin als Volumen-Phasen-Hologramm (Transmissions) Gitter (im Englischen „Volume Phase Holographic (Transmission) Grating“) bekannt. Ferner umfasst das System auf der vom Detektor 5 gegenüberliegenden Seite des Strahlteilerwürfels 6 eine wellenlängenselektive Prismaanordnung 17 insbesondere eine wellenlängenselektive Doppelprismaanordnung 17 auf.

Es ist anzumerken, dass gemäß diesem Beispiel das VPH 16 sowie die Prismaanordnung 17 für einen zweiten Spektralbereich Bereich eingerichtet sind, und insbesondere für den ersten Spektralbereich des Objektlichtes transparent sind, d.h. die Wellenfronten des ersten Spektralbereichs passieren das VPH 16 sowie die Prismaanordnung 17 unverändert. Umgekehrt ist die Prismaanordnung 17 so eingerichtet, dass Licht aus dem zweiten Spektralbereich an einer Prismafläche 17F reflektiert wird, während hingegen Licht aus dem ersten Spektralbereich durch die Prismafläche 17F hindurch propagiert, und damit unverändert durch die Prismaanordnung 17 kommt.

Ebenso ist das VPH 16 dazu eingerichtet, Licht aus und zweiten Spektralbereich winkel- und wellenlängenabhängig zu beugen, und Licht aus dem ersten Spektralbereich unverändert durch sich hindurch propagieren zu lassen.

Umgekehrt verhalten sich die Metalinsen-Arrays 3, 4, der Polarisator 15 sowie die λ/4-Plättchen 9a, 9b und gegebenenfalls auch das λ/2-Plättchen 11 ebenso transparent (und insbesondere optisch neutral) und lassen die Wellenfronten und Polarisationszustände des Objektlichts des zweiten Spektralbereichs unverändert. Das Licht aus dem zweiten Spektralbereich wird von dem System 1 dazu verwendet, eine besonders hohe räumliche Auflösung insbesondere entlang der optischen Achse zu erzeugen.

Anstelle des in Fig. 1 gezeigten Strahlengang für das Objektlicht des ersten Spektralbereichs ist in Figur 3 stattdessen der Strahlengang für das Objektlicht 20-1 und Referenzlicht 20-2 eingezeichnet, dass in diesem Beispiel ebenfalls im zweiten Spektralbereich liegt. Das Referenzlicht 20-2, welches vorzugsweise ebenfalls s-polarisiert ist, zumindest wenn es auf das VPH trifft, wird von einer Referenzlichtquelle 19, z.B. einer single-mode Apertur ausgesendet und über eine Kollimationsoptik 25 kollimiert. Die optischen Achsen der Kollimationsoptik 25 und der Eingangsapertur 2 liegen dabei aufeinander. Dann tritt das Referenzlicht 20-2 in

diesem kollimierten Zustand in den Strahlteilerwürfel 6 von einer der Eingangsapertur 2 gegenüberliegenden Seite des Strahlteilerwürfel 6 ein. Um dies zu ermöglichen, muss der planare erste Spiegel 7, der Objektlicht 10 aus dem ersten Spektralbereich reflektiert, für das Referenzlicht 20 aus dem zweiten Spektralbereich transparent sein. D.h. der Spiegel 7 ist zumindest ein dichroitischer Spiegel und verändert die Wellenfronten des Referenzlichtes nicht. Das zweite λ/4-Plättchen 9a kann ebenfalls dazu eingerichtet sein, den Polarisationszustand des Referenzlichtes 20-2 nicht zu ändern, oder in einem Zusammenspiel mit einem weiteren Verzögerungselement, bspw. einem dritten λ/4-Plättchen 9c, dazu eingerichtet sein, dass das Referenzlicht 20-2 beim Auftreffen auf das VPH 16 s-polarisiert ist.

Die Wirkungsweise des VPH 16 im Zusammenspiel mit der Prismaanordnung 17 wird nun im Folgenden beschrieben.

Das durch die Eingangsapertur 2 kollimierte Objektlicht 20-1 aus dem zweiten Spektralbereich trifft in dem dargestellten Beispiel auf das VPH 16 in einem Winkel von ca. 45°. Da das VPH 16 in so genannter Littrow-Anordnung positioniert ist und auf den zweiten Spektralbereich optimiert ist, wird das auftreffende Objektlicht 20-1 aus dem zweiten Spektralbereich von dem VPH 16 in einem Winkel von ungefähr 90° (relativ zum einfallenden Objektlicht 20-1) bzw. ungefähr 45° (relativ zur Strahlteilerfläche 6F) in Richtung Detektor 5 gebeugt. Idealerweise ist das Objektlicht 20-1 des zweiten Spektralbereichs beim Auftreffen auf das VPH 16 linear polarisiert, und zwar insbesondere s-polarisiert, da die Beugungseffizienz von VPHs dann am größten ist.

Auf der anderen Seite trifft das kollimierte Referenzlicht 20-2 ebenso auf das VPH 16 und wird von diesem in Richtung der Prismaanordnung 17, die auf der dem Detektor 5 gegenüberliegenden Seite des Strahlteilers 6b angeordnet ist, gebeugt. Auch hier steht das VPH 16 relativ zum Referenzlicht 20-2 in einer 45° Stellung sodass auch hier eine Littrow-Konfiguration vorliegt.

Das Referenzlicht 20-2 propagiert in Richtung der Prismaanordnung 17 und wird dort an einer Reflexionsfläche 17F der Prismaanordnung 17, die einen Winkel α mit der Strahlteilerfläche und damit dem VPH einschließt, reflektiert. Der Winkel α (nicht dargestellt, stattdessen der Differenzwinkel (Prismawinkel) $\Delta\alpha = 45°-\alpha$) ist in diesem Fall ungleich 45°, sondern entweder größer oder kleiner als 45°, insbesondere um

mehr als 0.2° größer oder kleiner als 45°. Dadurch wird das Referenzlicht, das unter einem Winkel von 45° von dem VPH 16 in Richtung der Prismaanordnung 17 gebeugt wird, von der Prismaanordnung 17 zurück auf das VPH 16 reflektiert, wo das Referenzlicht 20-2 unter einem von 45° verschiedenen Winkel auf das VPH 16 trifft. Dadurch wird aber zumindest ein Teil des zurückreflektierten Referenzlichtes 20-2 von dem VPH 16 nicht wieder in Richtung Referenzlichtquelle 19 zurückgebeugt, sondern propagiert durch das VPH 16 hindurch in Richtung Detektor 5, wo es unter einem Winkel, der dem doppelten Winkel α entspricht, relativ zum gebeugten Objektlicht 20-1 auf dem Detektor 5 interferiert.

Der Kerngedanke bei dieser Ausführungsform ist, dass der Strahlteilerwürfel 6 entlang seiner Strahlteilerfläche 6F ein VPH 16 aufweist, das mit der Reflexionsfläche 17F der Prismaanordnung 17 einen Winkel α von ungleich 45° einschließt. Dadurch wird Referenzlicht 20-2beim zweiten Auftreffen auf das VPH 16 (nach Reflexion an der Prismaanordnung 17) zumindest teilweise und in ausreichend hohem Maße vom VPH 16 in Richtung Detektor 5 transmittiert.

Insbesondere ist vorgesehen, dass das Licht aus dem zweiten Spektralbereich in Form Spektrallinien-Kämmen, die eine Vielzahl an disjunkten, schmalbandigen Spektrallinien – insbesondere mit Linienbreiten im Subnanometerbereich - umfassen, vorliegt.

Die Vielzahl an Spektrallinien wird aufgrund der Eigenschaften des VPH 16 dann wellenlängenselektiv leicht unterschiedlich gebeugt (vgl. Strahlen zu 20-1‘, 20-2‘), sodass hier eine dispersive Aufspaltung der Spektrallinien auf der Detektorseite 5 erfolgt, was eine hochpräzise Ortsauflösung entlang der optischen Achse OA ermöglicht. Die Information über die z- Position des Objektes S befinden sich insbesondere in den Phasendaten der einzelnen Spektrallinien. Kombiniert mit den Informationen, aus dem Interferenzmuster des ersten Spektralbereichs ermöglicht ein solches System 1 die Ermittlung einer hochauflösenden 3D-Farbinformation eines Objektes S.

Der zweite Spektralbereich liegt typischer Weise im Bereich des nahen Infrarots oder des Infrarots. Also beispielsweise im Bereich von 700 bis 900 nm, oder sogar in einem Bereich von 1300 nm und mehr. Im letzteren Fall, kann sogar unterhalb von biologischen Gewebeoberflächen gemessen werden.

Es ist natürlich auch möglich, eine separate Anordnung für das in den vorigen Absätzen beschriebene VPH 16 vorzusehen, die lediglich die für den zweiten Spektralbereich notwendigen optischen Komponenten aufweist, also insbesondere das VPH 16 und die Prismaanordnung, die dann auch als Spiegel ausgeführt sein kann.

Zusätzlich kann das System 1 mit einem weiteren VPH ausgestattet sein (nicht dargestellt), wobei das weitere VPH in einem anderen dritten Spektralbereich optisch aktiv ist und dort das auftreffende Licht wellenlängenabhängig und winkelabhängig beugt. Auf diese Weise kann mit entsprechenden Komponenten und Transmissionseigenschaften dieser Komponenten sogar an dritter Spektralbereich abgetastet werden.

So wäre es zu Beispiel möglich, einen Oberflächenverlauf im nahen Infrarot und gleichzeitig auch eine Struktur unterhalb der Oberfläche im Infrarotbereich zu erfassen, wobei im sichtbaren (ersten Spektral-) Bereich das System über die beschriebene Metalinsen-Array Wirkweise betrieben wird.

Alternativ ist es auch möglich, dass der zweite Spektralbereich und der erste Spektralbereich ineinander verschachtelt liegen, jedoch ohne zu überlappen, d.h. der erste Spektralbereich umfasst beispielsweise drei Wellenlängenbereiche die beispielsweise für die Farbkanäle (oder Farben) rot, grün und blau charakteristisch sind, während hingegen der zweite Spektralbereich in mindestens einem Wellenlängenbereich liegt der zwischen diesen drei Wellenlängenbereichen lokalisiert ist.

Der Wellenlängenbereich des ersten Spektralbereichs für den blauen Farbkanal erstreckt sich dabei insbesondere von 420 nm bis 480 nm, der Wellenlängenbereich des ersten Spektralbereichs für den grünen Farbkanal erstreckt sich dabei insbesondere von 520 nm bis 565 nm, und der Wellenlängenbereich des ersten Spektralbereichs für den roten Farbkanal erstreckt sich insbesondere von 630 nm bis 680 nm. Der zweite Spektralbereich kann sich daher zum Beispiel in einem Wellenlängenbereich von 505 nm bis 515 nm, und/oder von 570 nm bis 625 nm, oder von 690 nm aufwärts erstrecken.

Eine deutlich weniger komplexe Ausführungsform der Erfindung ist in Figur 4 dargestellt. In dieser Variante kann auf den Strahlteilerwürfel verzichtet werden, ohne dass auf den erfindungsgemäßen Grundgedanken verzichtet werden müsste. Der Vorteil der in Figur 4 dargestellten Ausführungsform ist die Möglichkeit einer ultrakompakten Bauform.

In Fig. 1 bestimmt die Kantenlänge des Strahlteilerwürfels die Dimension in allen drei Raumrichtungen. In Fig. 4 ist die Raumrichtung senkrecht zur optischen Achse jedoch kleiner wählbar. Statt des Strahlteilwürfels ist ein transparentes massives Element vorgesehen, das mit einer ersten Fläche in Richtung des ersten Metalinsen-Array weist, und mit einer zweiten der ersten Fläche gegenüberliegenden Fläche in Richtung des zweiten Metalinsen-Arrays weist, insbesondere wobei ein vom transparenten massiven Element umfasstes Volumen frei von selektiv reflektierenden und selektiv beugenden Flächen ist, insbesondere wobei das transparente Element quaderförmig oder plättchenförmig ist.

Das Element kann also beispielsweise eine Glasplättchen oder ein Polymerplättchen sein. An dem transparenten Element ist das erste Metalinsen-Array auf einer planaren Fläche gegenüber dem zweiten Metalinsen-Array angeordnet, das auf einer planaren Fläche auf einer der ersten Fläche gegenüberliegende Seite angeordnet ist. Die Eingangsapertur sowie die dort erzeugten Polarisationszustände, die dem Objektlicht aufgeprägt werden, sind bereits im Zusammenhang mit in Fig. 1 beschrieben.

Metalinsen können ohne weiteres mit einer numerischen Apertur NA = 0.5 hergestellt werden. Bei einem typischen Metalinsendurchmesser von 1 mm wäre der die Brennweite bei 1 mm zu einer Metalinsenebene, d.h. die die Metalinsen-Arrays separierende transparente Element müsste etwa 2 mm betragen (der Einfachheit halber wurde der Brechungsindex des transparenten Elements nicht berücksichtigt). Dies wäre nochmals deutlich kleiner als z.B. die Höhe einer Kante eines Strahlteiler-würfels (z.B. 5 mm). Des Weiteren sind Bauhöhe Höhe und laterale Dimensionen in diesem Beispiel entkoppelt, was insbesondere bei Mobiltelefon-Anwendungen vorteilhaft ist, da hier Aufbauhöhe ein absolutes Premium darstellt, während entlang der lateral Richtung Baugrößen kein Problem darstellen.

D.h. bei kompakter Bauweise entlang der z-Achse (Bauhöhe) kann dennoch ein großflächiger Detektor verwendet werden, da dieser sich entlang der x- und y-Richtung erstreckt.

Zum Strahlverlauf im Einzelnen wird insbesondere auf Figur 1 verwiesen, was die Polarisationszustände und deren Erzeugung an der Eingangsapertur angeht.

In Figur 4 sind zwei unterschiedliche Lichtstrahlen des Objektlichtes eingezeichnet. Die erste Situation betrifft einen ersten Objektlichtstrahl 31, der aus einem Bereich des Untersuchungsgegenstandes stammt, der auf der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 liegt. Die zweite Situation betrifft einen zweiten Objektlichtstrahl 32, der aus einem Bereich des Untersuchungsgegenstandes stammt, der lateral versetzt zur optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 liegt.

Der erste Objektlichtstrahl 31 wird durch die Eingangsapertur 2 kollimiert und propagiert anschließend parallel zur optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 weiter, d.h. er schließt einen Winkel von 0° mit der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 ein. Der Winkel, der von dem kollimierten Objektlicht mit der optischen Achse eingeschlossen wird, wird im Rahmen dieser Spezifikation auch als erster Neigungswinkel β bezeichnet.

Der erste Neigungswinkel β wird dabei insbesondere durch den zwischen der optischen Achse OA der Eingangsapertur 2 und der Propagationsrichtung des kollimierten Objektlichtstrahls eingeschlossenen Winkel definiert.

Der zweite Objektlichtstrahl 32 wird durch die Eingangsapertur 2 ebenso kollimiert und propagiert anschließend allerdings mit einem ersten Neigungswinkel β zur optischen Achse OA der Kollimationslinse 2a weiter, der ungleich 0° beträgt. Der erste Neigungswinkel β enthält nach den Gesetzen der Strahlenoptik (zusammen mit einer zugeordneten Brennweite der Eingangsapertur) eine Information über die laterale Position auf dem Untersuchungsgegenstand von der der betreffende Objektlichtstrahl stammt.

Die Eingangsapertur 2 umfasst weiterhin einen Polarisator 15, der dazu eingerichtet ist, das Objektlicht in einen vordefinierten Polarisationszustand zu bringen. Der Polarisator 15 ist insbesondere so eingerichtet, dass er das Objektlicht in den

vordefinierten Polarisationszustand bringt - zumindest für Objektlicht aus dem ersten Spektralbereich.

In dem vorliegenden Fall ist der Polarisator 15 so angeordnet und eingestellt (z.B. in einem Drehwinkel von 45°), dass das Objektlicht, unabhängig von einer Einfallsrichtung oder dem ersten Neigungswinkel β, s- und p-polarisiertes Licht in etwa zu gleichen Anteilen aufweist. D.h. der vordefinierte Polarisationszustand setzt sich in diesem Beispiel aus einem ersten Polarisationszustand, der s-polarisiertes Objektlicht umfasst und aus einem zweiten Polarisationszustand, der p-polarisiertes Objektlicht umfasst, zusammen. Die Zuordnung des s-polarisierten Objektlichtes zum ersten Polarisationszustand des p-polarisierten Objektlichtes zum zweiten Polarisationszustand kann auch genau andersherum erfolgen, und dient nur illustrierenden Zwecken.

Im Folgenden wird ohne Einschränkung der Allgemeinheit, auf den Fall von s- und p-polarisierten Polarisationszuständen eingegangen.

Das Objektlicht mit dem gerade beschriebenen vordefinierten Polarisationszustand trifft nun erfindungsgemäß auf das erste Metalinsen-Array 3. Das erste Metalinsen-Array 3 ist erfindungsgemäß nun so angeordnet und eingerichtet, dass es einen ersten Anteil 31-1 des Objektlichtes, der den ersten Polarisationszustand aufweist, zu fokussieren, während hingegen ein zweiter Anteil 31-2 des Objektlichts, der den zweiten Polarisationszustand aufweist, im Wesentlichen unverändert durch das ersten Metalinsen-Array 3 propagiert.

Der fokussierte erste Anteil 31-1 ist insbesondere so fokussiert, dass er auf eine dem ersten Metalinsen-Array 3 zugeordnete Brennebene 3B fokussierten wird.

Dies gilt sowohl für den ersten als auch den zweiten Objektlichtstrahl 31, 32.

Das zweite Metalinsen-Array 4 ist nun so angeordnet, dass eine dem zweiten Metalinsen-Array 4 zugeordnete Brennebene 4B auf der dem ersten Metalinsen-Array 3 zugeordnete Brennebene 3B liegt. Weiterhin ist das zweite Metalinsen-Array 4 so eingerichtet, dass es Objektlicht 31-1, das den ersten Polarisationszustand aufweist, und also auf die Brennebene 3B des ersten Metalinsen-Arrays 3 fokussiert ist, kollimiert und den zweiten Anteil 31-2 des Objektlichts, der den zweiten

Polarisationszustand aufweist, im Wesentlichen unverändert transmittiert - der zweite Anteil 31-2 ist danach also nach wie vor kollimiert.

Für den ersten Objektlichtstrahl 31, der einen Winkel von 0° mit optischen Achse OA einschließt bedeutet dies, dass er unter einem Winkel von 0° aus der zweiten Metalinsen-Array 4 kommt, und unter diesen Winkel auf den Detektor 5 trifft.

Für den zweiten Objektlichtstrahl 32, der unter einem ersten Neigungswinkel β von ungleich 0° zur optischen Achse OA propagiert, folgt, dass der erste Anteil 32-1 des zweiten Objektlichtstrahls 32 nach entsprechender Fokussierung und Rekollimierung des ersten Anteils 32-1 mit dem ersten Polarisationszustand, mit dem zweiten Anteil 32-2 des zweiten Objektlichtstrahls der im Wesentliche unverändert durch das erste und zweite Metalinsen-Array 3, 4 propagiert, einen zweiten Neigungswinkel β‘ einschließt, der doppelt so groß ist wie der erste Neigungswinkel β. Der erste und der zweite Anteil 32-1, 32-2 des zweiten Objektlichtstrahls 32 treffen also unter diesen zweiten Neigungswinkel auf den Detektor, der hinter dem zweiten Metalinsen-Array 4 angeordnet ist. Insbesondere kann vor dem Detektor 5 auch hier ein Analysator 14 eingeordnet sein, der die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils angleicht, insbesondere in 45° Drehung, sodass eine verbesserte Interferenz und damit ein verbessertes Interferenzmuster auf dem Detektor 5 entsteht.

Um wie im Zusammenhang mit Fig. 1 beschrieben, auch hier eine relative Phasenanpassung der Wellenfronten bezüglich des ersten Anteils des zweiten Anteils zu erreichen, kann das massive transparente Element einen Flüssigkristall umfassen (nicht dargestellt), der für Objektlicht des ersten und/oder des zweiten Polarisationszustands einen unterschiedlichen Brechungsindex aufzuweisen, sodass eine über den Flüssigkristall steuerbare Phasenrelationen bezüglich der Wellenfronten eingestellt werden kann. Dazu kann eine Steuereinheit im System vorgesehen sein.

Die in Fig. 4 beschriebene Ausführungsform ist insbesondere vorteilhaft für Metalinsen-Arrays 3, 4, deren mit Metalinsen eine vergleichsweise hohe numerisch Apertur aufweisen; zum Beispiel eine numerische Apertur größer als 0.4.

Unabhängig von der spezifischen Ausführungsform, kann das System 1 eine Laserlichtquelle 18 aufweisen, die dazu eingerichtet ist, den

Untersuchungsgegenstand steuerbar zu beleuchten und insbesondere das Objekt S bereichsweise zu beleuchten, so dass beispielsweise über einen optischen Abtastvorgang ein vollständiges Bild des Untersuchungsgegenstandes erzeugt werden kann.

Dazu kann vorgesehen sein, dass die Laserlichtquelle 18, in einer Sequenz verschiedene Wellenlängen emittiert und so das Untersuchungsobjekt mit verschiedenen Wellenlängen sequentiell beleuchtet, sodass eine Farbinformation aus der sequenziellen Beleuchtung gewonnen werden kann.

Alternativ kann die Laserlichtquelle dazu eingerichtet sein, Licht aus dem ersten und zweiten Spektralbereich gleichzeitig oder zeitlich versetzt zueinander zu emittieren.

Referenzen

[1] Jangwoon Sung et al, „Progresses in the practical metasurface for holography and lens“, Nanophotonics 2019, 8(10), p. 1701-1718.

[2] Ling Li, et al., „Polarization-Switchable Multi-Focal Noninterleaved Metalenses in the visible”, Laser&Photonics reviews, 2021, 15, 2100198,

Bezugszeichenliste

1	System
2	Eingangsapertur
2a	Kollimationsoptik / Linse / Objektiv
3	erstes Metalinsen-Array
30	Metalinsen
3B	Brennebene des ersten Metalinsen-Arrays
4	zweites Metalinsen-Array
40	Metalinsen
4B	Brennebene des zweiten Metalinsen Arrays
5	Detektor
6	Strahlteiler
6A	erstes Prisma des Strahlteilers
6B	zweites Prisma des Strahlteilers
6F	Reflexionsfläche

7	erster Spiegel
8	Reflektor-Array
80	Retroreflektoren
9a	erstes λ/4-Element
9b	zweites λ/4-Element
11	λ/2-Element
12, 12‘	Aktuatoranordnung
13	massives transparente Element
13-1	erste Seite des massiven transparenten Elements
13-2	zweite Seite des massiven transparenten Elements
14	Analysator
15	Polarisator
16	VPH
17	Prismaanordnung, Doppelprisma
17F	Reflexionsfläche
18	Objektlichtquelle
19	Referenzlichtquelle
25	Referenzlichtkollimationsoptik
21, 22, 23	Lichtstrahlen rot (21), grün (22), blau (23
31	erster Lichtstrahl
31-1	erster Anteil
31-2	zweiter Anteil
32	zweiter Lichtstrahl
32-1	erster Anteil
32-2	zweiter Anteil
10	Objektlicht
101	erster Anteil
102	zweiter Anteil
10a	erster Lichtstrahl
10b	zweiter Lichtstrahl
20-1, 20-1‘	Objektlichtstrahl im zweiten Spektralbereich
20-2, 20-2‘	Referenzlichtstrahl im zweiten Spektralbereich
E	Brennebene der Eingangsapertur
OA	optische Achse
S	Untersuchungsgegenstand

x, y, z	Richtungen eines Kartesischen Koordinatensystems
Δα	Prismawinkel
β	erster Neigungswinkel
β‘	zweiter Neigungswinkel

****

Patentansprüche

1. Optisches System (1) zur 3D-Bildgebung aufweisend zumindest die folgenden Komponenten:
   - Eine Eingangsapertur (2), aufweisend eine optische Achse (OA),
   - Ein erstes Metalinsen-Array (3) und ein zweites Metalinsen-Array (4),
   - Einen Detektor (5),

   wobei die Eingangsapertur (2) dazu eingerichtet ist, in einem ersten Spektralbereich von einem Untersuchungsgegenstand (S) kommendes Objektlicht (10) zu kollimieren und in einen vordefinierten Polarisationszustand festzulegen, der sich aus zwei zueinander konjugierten Polarisationszuständen zusammensetzt, wobei das Objektlicht (10) unter einem ersten Neigungswinkel (β) in Bezug auf die optische Achse (OA) der Eingangsapertur (2) zum ersten Metalinsen-Array (3) propagiert,
   wobei das erste Metalinsen-Array (3) dazu eingerichtet und angeordnet ist, einen ersten Anteil (101) des Objektlichts (10), der einen ersten Polarisationszustand der zwei zueinander konjugierten Polarisationszustände umfasst, zu fokussieren und einen zweiten Anteil (102) des Objektlichts (10), der einen zweiten Polarisationszustand der zwei zueinander konjugierten Polarisationszustände umfasst, unverändert zu lassen,
   wobei das zweite Metalinsen-Array (4) dazu eingerichtet und angeordnet ist, den fokussierten ersten Anteil (101) zu kollimieren und den zweiten Anteil (102) unverändert zu transmittieren, so dass der erste Anteil (101) und der zweite Anteil (102) nachdem sie durch das erste und das zweite Metalinsen-Array (3, 4) propagiert sind, jeweils die gleiche Wellenfrontkrümmung aufweisen, und insbesondere jeweils kollimiert sind, und in Bezug auf deren jeweiligen Propagationsrichtung einen zweiten Neigungswinkel (β‘) miteinander einschließen und unter Ausbildung eines Interferenzmusters auf den Detektor (5) treffen, wobei der zweite Neigungswinkel (β‘) betragsmäßig dem doppelten ersten Neigungswinkel (β) entspricht und basierend auf dem Interenzenzmuster eine dreidimensionales Lageinformation eines Objektbereichs des Untersuchungsgegenstandes (S) erstellt werden kann.

2. Das System (1) gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste und der zweite Anteil (101, 102) des Objektlichtes (10) jeweils senkrecht linear-

polarisiert zu einander sind, insbesondere wobei der vordefinierten Polarisationszustand ein linear-polarisierter Polarisationszustand ist, der aus einer Superposition des ersten und des zweiten Anteils (101, 102) besteht.

3. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das System (1) zwischen dem ersten und dem zweiten Metalinsen-Array (3) einen polarisationsabhängigen Strahlteiler (6), insbesondere einen polarisationsabhängigen Strahlteilerwürfel, umfasst, wobei das System (1) weiterhin die folgenden Komponenten aufweist:

- Einen ersten Spiegel (7),
- Ein Reflektor-Array (8), das ein Vielzahl von reflektierenden Retroreflektoren (80) umfasst,
- Ein erstes λ/4-Element (9a), das zwischen dem polarisationsabhängigen Strahlteiler (6) und dem ersten Spiegel (7) angeordnet ist,
- Ein zweites λ/4-Element (9b), das zwischen dem polarisationsabhängigen Strahlteiler (6) und dem Reflektor-Array (8), angeordnet ist,

wobei der polarisationsabhängige Strahlteiler in Bezug auf von dem ersten Metalinsen-Array (3) einfallenden Objektlicht (10) so angeordnet ist, dass der erste Anteil (101) von dem Strahlteiler (6) reflektiert wird und der zweite Anteil (102) durch den Strahlteiler (6) transmittiert, wobei das Reflektor-Array (8) auf einer Seite des Strahlteilers (6) angeordnet ist, zu der der vom ersten Metalinsen-Array (3) kommende und vom Strahlteiler (6) reflektierte erste Anteil 101) propagiert, wobei der erste Spiegel auf einer Seite des Strahlteilers (6) angeordnet ist, die dem ersten Metalinsen-Array (3) gegenüberliegt, wobei der erste Spiegel (7) den auf den ersten Spiegel (7) treffenden zweiten Anteil (102) wieder in Richtung des Strahlteilers (6) und zum zweiten Metalinsen-Array (4) zurückreflektiert, insbesondere wobei der zurückreflektierte erste und der zurückreflektierte zweite Anteil (101, 102) aufgrund der vertauschten Polarisationszustände durch den polarisationsabhängigen Strahlteiler (6) in Richtung des zweiten Metalinsen-Arrays propagieren.

4. Das System (1) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem Strahlteiler (6) und dem zweiten Metalinsen-Array (4) ein λ/2-Element (11)

angeordnet ist, das dazu eingerichtet ist, die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils (101, 102) zu vertauschen.

5. Das System (1) gemäß einem der Ansprüche 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass das System (1) eine Aktuatoranordnung (12) umfasst, die dazu eingerichtet ist, eine Position des ersten Spiegels (7) und/oder des Reflektor-Arrays (8) einzustellen, so dass eine Phase zwischen den dem ersten und dem zweiten Anteil (101, 102) zugeordneten Wellenfronten einstellbar ist.

6. Das System (1) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das System (1) ein transparentes massives Element (13) umfasst, das mit einer ersten Fläche (13-1) in Richtung des ersten Metalinsen-Arrays (3) weist, und mit einer zweiten der ersten Fläche (13-1) gegenüberliegenden Fläche (13-2) in Richtung des zweiten Metalinsen-Arrays (4) weist, insbesondere wobei ein vom transparenten massiven Element (13) umfasstes Volumen frei von selektiv reflektierenden und selektiv beugenden Flächen ist, insbesondere wobei das transparente Element quaderförmig oder plättchenförmig ist.

7. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das System (1) zumindest einen Flüssigkristall umfasst, der dazu eingerichtet ist, eine Phase zwischen den dem ersten und dem zweiten Anteil (101, 102) zugeordneten Wellenfronten anzupassen, insbesondere wobei der mindestens Flüssigkristall dazu eingerichtet ist, über ein Steuermodul die Phase zwischen den Wellenfronten des ersten und des zweiten Anteils (101, 102) zu verändern.

8. Das System gemäß Anspruch 6 und 7, wobei das transparente massive Element (13) den mindestens einen Flüssigkristall umfasst oder aus dem mindestens einen Flüssigkristall besteht.

9. Das System gemäß Anspruch 7 und einem der Ansprüche 3, 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass der polarisationsabhängige Strahlteiler (6) ein erstes und ein zweites Prisma (6A, 6B) umfasst, die einen Strahlteilerwürfel des Strahlteilers (6) bilden, wobei das erste und/oder das zweite Prisma (6A,6B) den mindestens einen Flüssigkeitskristall umfasst, insbesondere wobei sowohl

das erste als auch das zweite Prisma (6A, 6B) einen Flüssigkeitskristall gemäß Anspruch 7aufweisen.

10. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Brennebene (3B) des ersten Metalinsen-Arrays (3) und eine Brennebene (4B) des zweiten Metalinsen-Arrays (4) aufeinander liegen.

11. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in Propagationsrichtung hinter dem zweiten Metalinsen-Array (4) und vor dem Detektor (5), ein Analysator (14) angeordnet ist, der dazu eingerichtet ist, die Polarisationszustände des ersten und des zweiten Anteils (101, 102) anzugleichen, so dass eine Interferenz des ersten Anteils (101) mit dem zweiten Anteil (102) auf dem Detektor (5) erreicht wird.

12. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Eingangsapertur (2) einen Polarisator (15) umfasst, der dazu eingerichtet ist, das Objektlicht (10) aus dem ersten Spektralbereich in den vordefinierten Polarisationszustand zu bringen.

13. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Eingangsapertur (2) zumindest eine Linse (2a) umfasst, die dazu eingerichtet ist, das vom Untersuchungsgegenstand (S) kommende Objektlicht (10) zu kollimieren.

14. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das System (1) dazu eingerichtet ist, die Propagationsrichtung des auf das System (1) treffenden Objektlichts (10) aus dem ersten Spektralbereich wellenlängenabhängig abzulenken, so dass das Objektlicht (10), sowie der erste und der zweite Anteil (101, 102) zusätzlich zum ersten Neigungswinkel (β) einen wellenlängenabhängigen Winkel mit der optischen Achse (OA) einschließen.

15. Das System (1) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche , dadurch gekennzeichnet, dass das Objektlicht (10) des ersten Spektralbereichs aus

zwei oder mehr disjunkten Wellenlängenbereichen besteht und/oder wobei das System (1) dazu eingerichtet ist, das Objektlicht (10) in zwei oder mehr disjunkte Wellenlängenbereich zu filtern, die den ersten Spektralbereich formen, wobei zwischen den Wellenlängenbereichen Lücken sind, wobei für jeden Wellenlängenbereich ein Interferenzmuster auf dem Detektor (5) generiert wird, aus denen eine dreidimensionale Lageinformation und eine Farbzusammensetzung bezüglich der Wellenlängenbereiche eines Objektbereichs des Untersuchungsgegenstandes (S) erstellt werden kann.

16. Das System (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche sofern rückbezogen auf Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Objektlicht (10) mindestens einen weiteren Spektralbereich umfasst, der von dem ersten Spektralbereich verschieden und disjunkt ist, wobei das erste und das zweite Metalinsen-Array (3, 4) sowie der polarisationsabhängige Strahlteiler (6) für Licht aus dem mindestens einen weiteren Spektralbereich transparent und optisch inaktiv sind, wobei der polarisationsabhängige Strahlteiler (6) weiterhin ein Volumen-Phasen-Hologramm (16) umfasst, das dazu eingerichtet ist, das Licht aus dem mindestens einen weiteren Spektralbereich polarisations- und winkelabhängig zu beugen und für das Licht aus dem ersten Spektralbereich transparent und optisch inaktiv zu sein, insbesondere wobei sich das Volume-Phasen-hologramm (16) entlang einer Reflexionsfläche (6F) des Strahlteilers (6) erstreckt.

17. Das System gemäß Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass das System dazu eingerichtet ist, Referenzlicht aus dem zweiten Spektralbereich, insbesondere über einen Referenzarm, über eine der Eingangsapertur gegenüberliegenden Seite des Strahlteilers (6) auf das VPH zu leiten, wobei der erste Spiegel insbesondere für Referenzlicht transparent ist.

18. Das System gemäß Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass das System (1) ein drittes λ/4-Element (9c) umfasst, das auf einer dem Strahlteiler (6) abgewandten Seite des ersten Spiegels (7) angeordnet ist, und das dazu eingerichtet ist, in Zusammenwirken mit dem zweiten λ/4-Element (9b), das Referenzlicht (20-2, 20-2‘) in einen vordefinierten Polarisationszustand zu

bringen, so dass das Referenzlicht (20-2, 20-2‘) s-polarisiert ist, wenn es vom ersten Spiegel kommend auf das VPH (16) trifft.

19. Das System (1) gemäß einem der Ansprüche 16 bis 18, wobei das System (1) zwischen dem Reflektor-Array (8) und dem Strahlteiler (6) eine wellenlängenselektive Prismaanordnung (17) aufweist, die dazu eingerichtet ist, Licht des mindestens einen weiteren Spektralbereichs unter einem Prismawinkel ($\Delta\alpha$) in Richtung des Detektors (5) zu reflektieren und wobei die Prismaanordnung (17) für Licht aus dem ersten Spektralbereich transparent und optisch inaktiv ist.

*****

Fig. 1

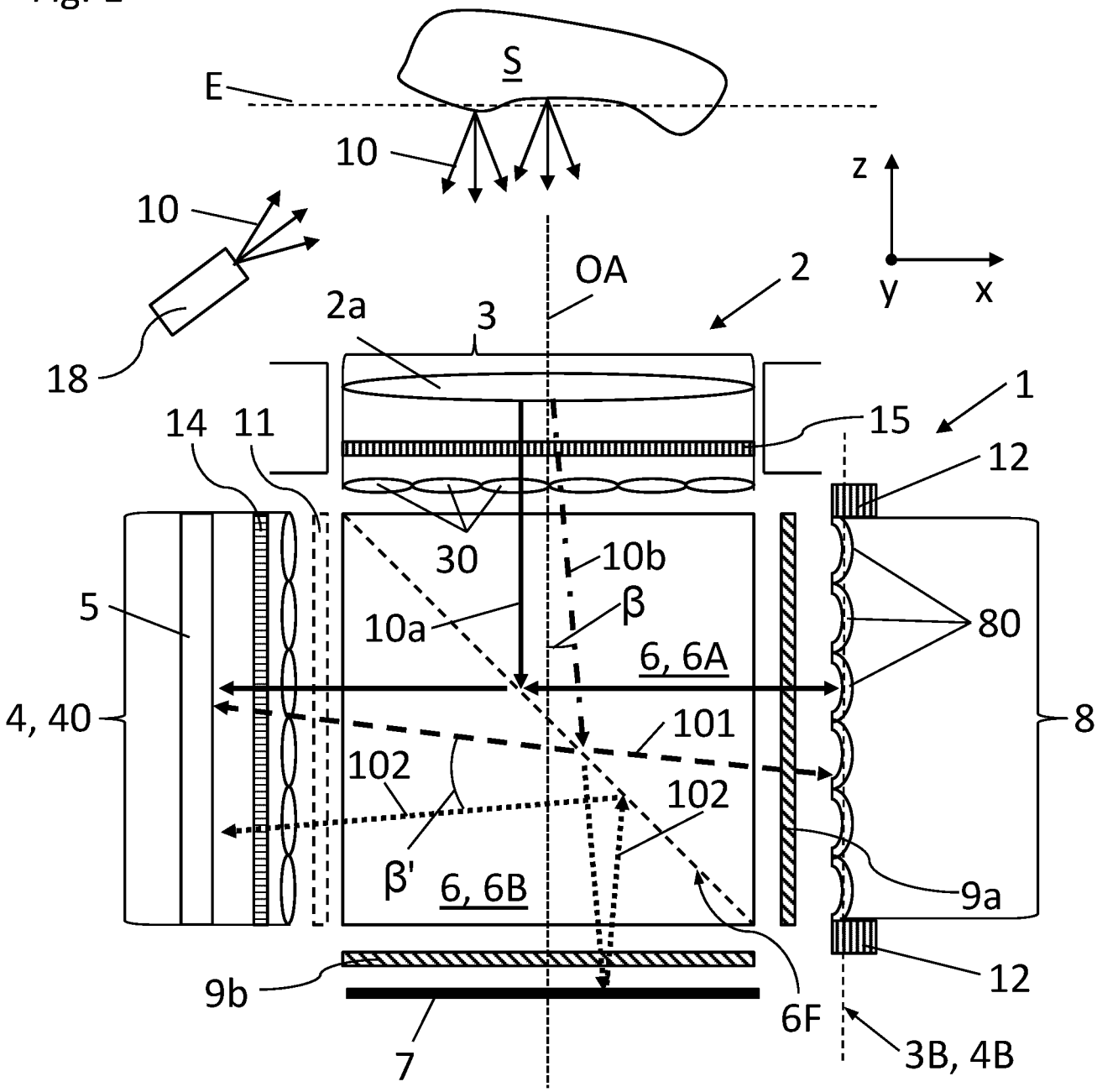

S
E
10
10
18
z
y
x
OA
2
2a
3
1
14
11
15
12
30
10b
5
10a
β
80
6, 6A
4, 40
101
8
102
102
β'
6, 6B
9a
9b
12
6F
7
3B, 4B

Fig. 2

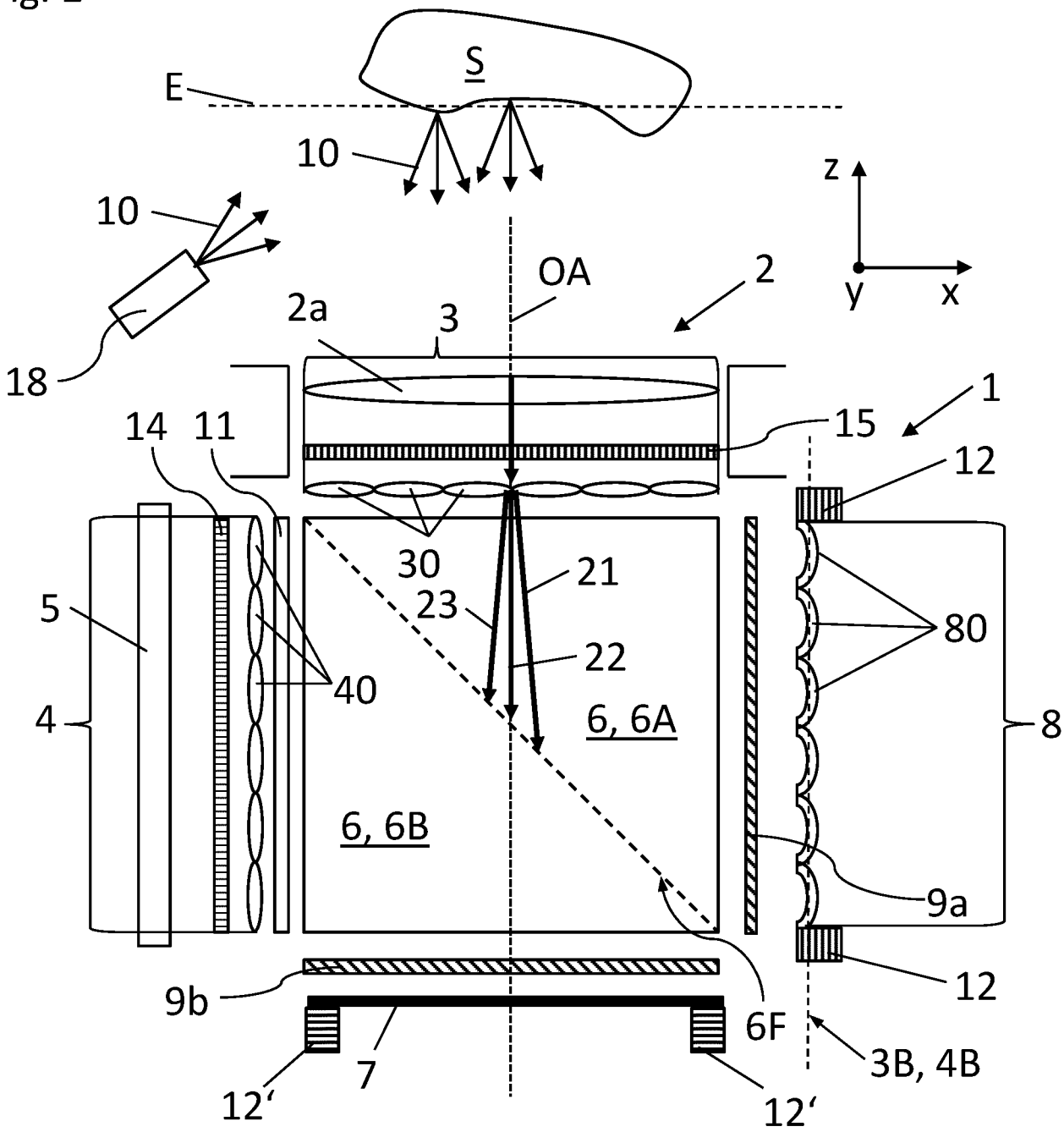

S
E
10
10
18
z
y
x
OA
2
2a
3
1
14
11
15
12
30
21
23
22
5
40
80
4
6, 6A
8
6, 6B
9a
9b
12
6F
3B, 4B
7
12'
12'

Fig. 3

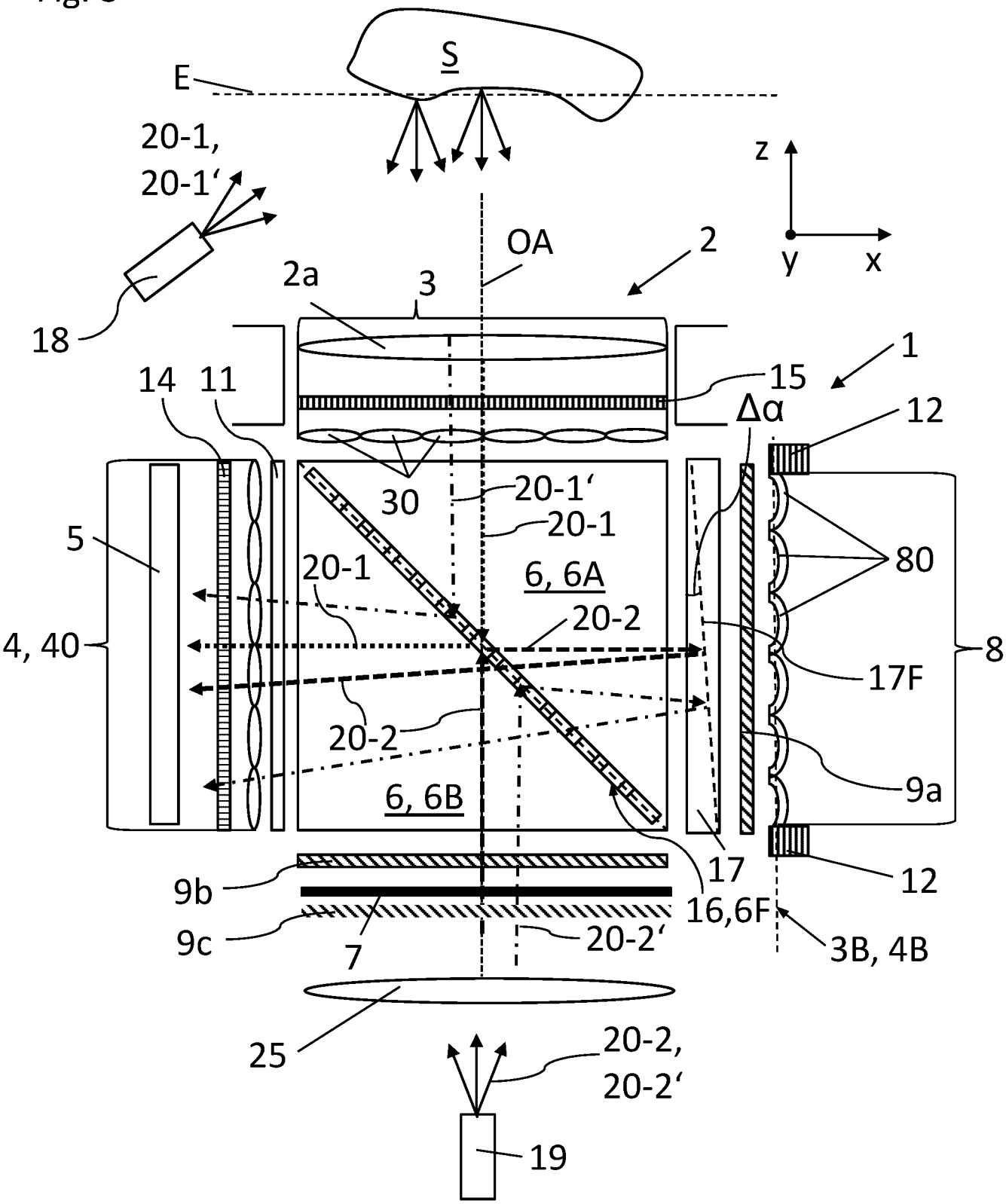
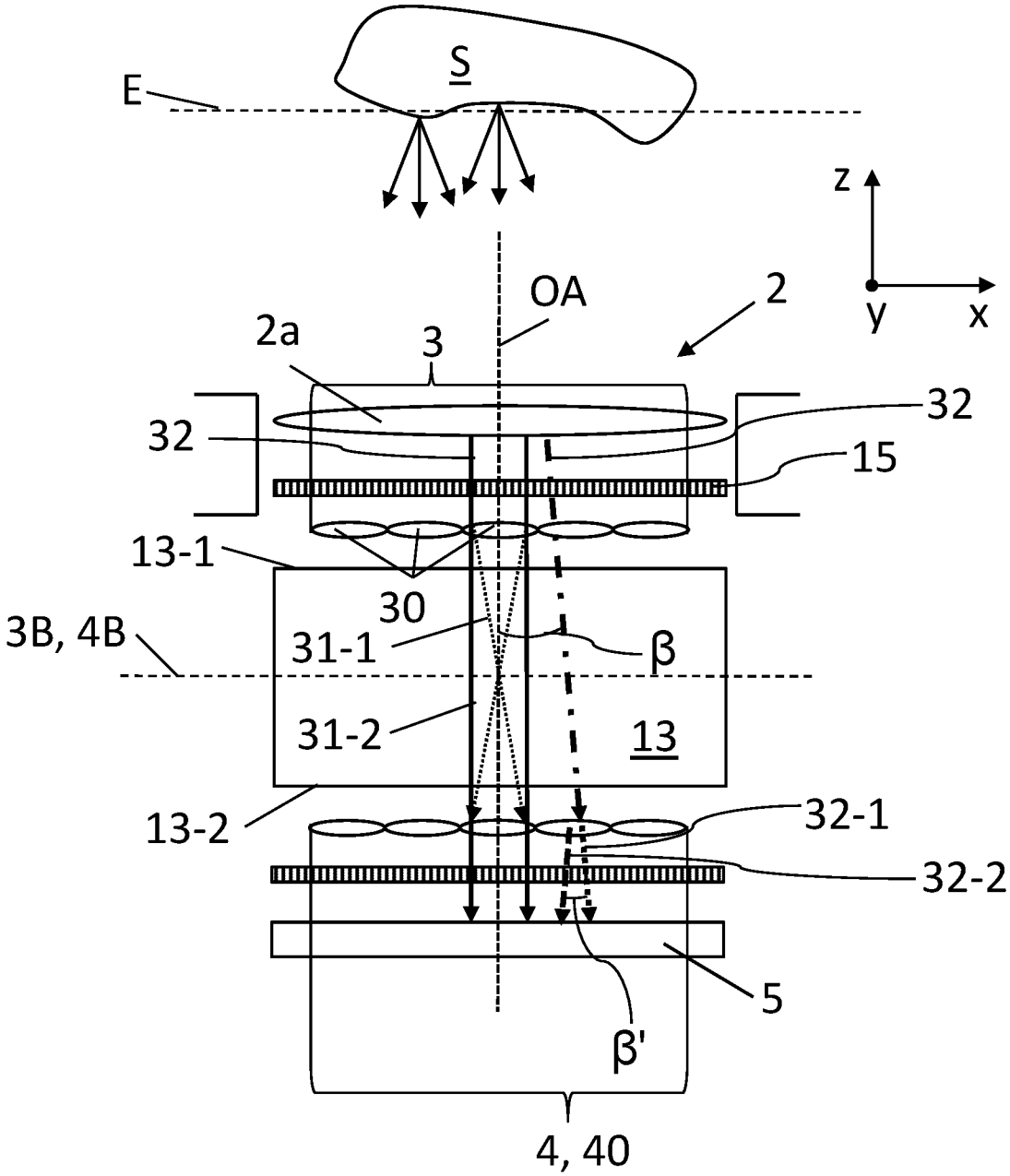

S
E
20-1,
20-1‘
18
z
y
x
OA
2
2a
3
1
14
11
15
Δα
12
30
20-1‘
20-1
5
20-1
6, 6A
80
4, 40
20-2
8
17F
20-2
9a
6, 6B
17
12
9b
16,6F
9c
7
20-2‘
3B, 4B
25
20-2,
20-2‘
19

Fig. 4



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2023/080862

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G03H 1/04(2006.01)i; ***G02B 27/10***(2006.01)i; ***G03H 1/08***(2006.01)i; ***G03H 1/26***(2006.01)i; *G03H 1/06*(2006.01)n; *G02F 1/13*(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02F; G02B; G03H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ROSEN JOSEPH ET AL. "Roadmap on Recent Progress in FINCH Technology" *JOURNAL OF IMAGING*, Vol. 7, No. 10, 29 September 2021 (2021-09-29), page 197 DOI: 10.3390/jimaging7100197 XP055891358 sections 4-6; page 8 - page 15; figures 7, 9, 11, 13, 14	1-19
A	ZHOU HONGQIANG ET AL. "All-dielectric bifocal isotropic metalens for a single-shot hologram generation device" *OPTICS EXPRESS*, US, Vol. 28, No. 15, 07 July 2020 (2020-07-07), page 21549 DOI: 10.1364/OE.396372 ISSN: 1094-4087, XP093124966 the whole document	1-19
A	LEE JONGHYUN ET AL. "Digital Incoherent Compressive Holography Using a Geometric Phase Metalens" *SENSORS*, CH, Vol. 21, No. 16, 20 August 2021 (2021-08-20), page 5624 DOI: 10.3390/s21165624 ISSN: 1424-8220, XP093124975 the whole document	1-19

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
30 January 2024	**15 February 2024**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Lutz, Christoph** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2023/080862

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LIN REN JIE ET AL. "Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging" *NATURE NANOTECHNOLOGY, NATURE PUB. GROUP, INC, LONDON,* Vol. 14, No. 3, 21 January 2019 (2019-01-21), pages 227-231, [retrieved on 2019-01-21] DOI: 10.1038/S41565-018-0347-0 ISSN: 1748-3387, XP036718420 the whole document	1-19

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2023/080862

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G03H1/04 G02B27/10 G03H1/08 G03H1/26
ADD. G03H1/06 G02F1/13

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

G02F G02B G03H

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	ROSEN JOSEPH ET AL: "Roadmap on Recent Progress in FINCH Technology", JOURNAL OF IMAGING, Bd. 7, Nr. 10, 29. September 2021 (2021-09-29), Seite 197, XP055891358, DOI: 10.3390/jimaging7100197 Sections 4.- 6.; Seite 8 - Seite 15; Abbildungen 7, 9, 11, 13, 14	1-19

-/--

[x] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [ ] Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
30. Januar 2024	15/02/2024

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Lutz, Christoph

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2023/080862

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	ZHOU HONGQIANG ET AL: "All-dielectric bifocal isotropic metalens for a single-shot hologram generation device", OPTICS EXPRESS, Bd. 28, Nr. 15, 7. Juli 2020 (2020-07-07), Seite 21549, XP093124966, US ISSN: 1094-4087, DOI: 10.1364/OE.396372 das ganze Dokument	1-19
A	LEE JONGHYUN ET AL: "Digital Incoherent Compressive Holography Using a Geometric Phase Metalens", SENSORS, Bd. 21, Nr. 16, 20. August 2021 (2021-08-20), Seite 5624, XP093124975, CH ISSN: 1424-8220, DOI: 10.3390/s21165624 das ganze Dokument	1-19
A	LIN REN JIE ET AL: "Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging", NATURE NANOTECHNOLOGY, NATURE PUB. GROUP, INC, LONDON, Bd. 14, Nr. 3, 21. Januar 2019 (2019-01-21), Seiten 227-231, XP036718420, ISSN: 1748-3387, DOI: 10.1038/S41565-018-0347-0 [gefunden am 2019-01-21] das ganze Dokument	1-19

1